

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

Situationsspezifische Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Benny Drescher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Die Dissertation wurde am 30.10.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30.03.2018 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld von Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München sowie an der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in München und Augsburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern der Institute gilt mein besonderer Dank für die Förderung und die Unterstützung meiner Arbeit sowie für ihre Hinweise und Anregungen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Michael Zäh für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ferner gilt mein Dank den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am *iwb* und der Projektgruppe RMV sowie den Studierenden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dabei möchte ich meine Kollegen Herrn Julian Backhaus, Herrn Thorsten Klein, Herrn Richard Popp, Herrn Christoph Richter und Herrn Peter Stich hervorheben, deren fachliche Hinweise für mich sehr wertvoll waren. Ich möchte ihnen für die gemeinsame Projektarbeit danken, die als Grundlage in die Arbeit eingeflossen ist. Außerdem bedanke ich mich bei den ehemaligen Studierenden Herrn Thomas Bartnik, Frau Maria Franke, Herrn Christian Läufer, Herrn Georg Mayer und Herrn Thomas Semm, die mich durch konzeptionelle Tätigkeiten in der Modellbildung und bei der Erstellung der Methodik unterstützten.

Des Weiteren danke ich den Mitwirkenden am Forschungsprojekt Mechatronisches Engineering zur effizienten Produktentwicklung im Maschinen- und Anlagenbau (MEPROMA). Hervorzuheben sind dabei die hilfreichen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge von Herrn Dr. Bernd Spiegelberger, Herrn Dr. Rainer Stetter und Herrn Alfred Tenner, die zu der praxistauglichen Ausgestaltung und der industriellen Anwendbarkeit der Methodik beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung der Mechatronik im Maschinenbau	1
1.2 Herausforderungen an digitale Werkzeuglandschaften	5
1.3 Nutzenpotenziale einer Bewertung und Gestaltung	8
1.4 Zielstellung und Forschungsfragen	10
1.5 Wissenschaftstheoretische Positionierung	11
1.6 Aufbau der Arbeit	13
2 Grundlagen	15
2.1 Übersicht	15
2.2 Begriffe aus der Mechatronik	15
2.2.1 Mechatronik	15
2.2.2 Mechatronisches Handlungsprinzip	18
2.3 Begriffe aus der digitalen Entwicklung	22
2.3.1 Digitales Werkzeug	22
2.3.2 Digitale Werkzeuglandschaft	25
3 Stand der Wissenschaft und Technik	29
3.1 Übersicht	29
3.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau	31
3.2.1 Besonderheiten des deutschen Maschinenbaus	31
3.2.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau	34
3.2.3 Vorgehensmodelle	36
3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung .	40
3.3.1 Einordnung in die Entwicklung	40
3.3.2 Nutzenpotenziale	42
3.3.3 Architektur und Charakterisierung	44
3.3.4 Integration und Interoperabilität	47
3.3.5 Referenzmodelle	54
3.4 Anpassung an die Entwicklungssituation	58
3.5 Ansätze zur Bewertung und Gestaltung	62

3.5.1	Untersuchungsbereich und Anforderungsfelder	62
3.5.2	Verfahren aus dem Fachgebiet der Informatik	66
3.5.3	Verfahren aus dem Fachgebiet des Maschinenbaus	72
3.5.4	Beurteilung der Verfahren	75
3.6	Fazit	77
4	Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau	81
4.1	Übersicht	81
4.2	Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften	83
4.2.1	Aufbau	83
4.2.2	Modellgrenze aus mechatronischen Handlungsprinzipien	85
4.2.3	Referenzsicht des Prozesses	88
4.2.4	Referenzsicht der Funktion	91
4.2.5	Referenzsicht der Information	95
4.2.6	Referenzanforderungen	98
4.3	Anpassung an die Entwicklungssituation	101
4.3.1	Übersicht	101
4.3.2	Charakterisierung der Entwicklungssituation	101
4.3.3	Einflüsse auf das Referenzmodell	105
4.3.4	Wesentliche Erkenntnisse	106
4.3.5	Eingrenzung des Bewertungsobjektes	107
4.4	Bewertung der digitalen Werkzeuglandschaften	109
4.4.1	Übersicht	109
4.4.2	Kartographie der digitalen Werkzeuglandschaften	110
4.4.3	Fähigkeitsstufen der Mechatronik	114
4.4.4	Quadranten der Interoperabilität	116
4.5	Gestaltung des Beschaffungsprozesses	118
4.5.1	Übersicht und Einordnung	118
4.5.2	Lastenheft zur Software-Pflege und -Beschaffung	120
4.5.3	Auswahlunterstützung bei der Einführung oder der Migration	123
4.5.4	Realisierung in einem Rechnerwerkzeug	128
4.6	Fazit	130
5	Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel	133
5.1	Übersicht	133
5.2	Analyse der Entwicklung	134
5.3	Situationsspezifische Bewertung	137

5.4	Gestaltung der Beschaffung	141
5.5	Fazit	145
6	Beurteilung der Methodik	147
6.1	Forschungsfragen und Anforderungen	147
6.2	Praktische Anwendung	148
6.3	Wirtschaftlichkeit	150
7	Zusammenfassung und Ausblick	155
	Betreute Studienarbeiten	159
A	Anhang	161
A.1	Forschungsprojekte und Veröffentlichungen	161
A.2	Referenzmodell digitale Werkzeuglandschaft	164
A.3	Anpassungsmatrix an die Entwicklungssituation	194
	Literaturverzeichnis	197

Abkürzungsverzeichnis

Allgemein:

AutomationML	Automation Markup Language
AUTOPHYS	Forschungsprojekt „Automobilbau mit Hilfe einer physikbasierten mechatronischen Simulation“
BAZMOD	Forschungsprojekt „Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule“
DW	Digitales Werkzeug
DWL	Digitale Werkzeuglandschaft
FF	Forschungsfrage
IT	Informationstechnik
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KOMFORCE	Kommunikations- und Forschungskreis für Integrationstechnologien in Computer Aided Design und Engineering
LPP	Linear Performance Pricing
MEPROMA	Forschungsprojekt „Mechatronisches Engineering zur effizienten Produktentwicklung im Maschinen- und Anlagenbau“
MH	Mechatronisches Handlungsprinzip
QFD	Quality Function Deployment
SA	Software-Anwendung
SADT	Structured Analysis and Design Technique
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VBA	Visual Basic for Application

Prozessreferenzsicht:

AM	Anforderungsmanagement
KM	Konfigurationsmanagement
PP	Projektplanung
PV	Projektverfolgung
QM	Qualitätsmanagement
SE	Systementwurf
SR	Systemrealisierung

Funktionsreferenzsicht:

AT	Automatisierung
KK	Kommunikation
RV	Rollenvergabe
VK	Verifikation
VW	Verwaltung
WV	Wiederverwendung

Informationsreferenzsicht:

A	Ausgangsinformation
DS	Disziplinspezifische Maschineninformation
E	Eingangsinformation
IB	Inbetriebnahmebezogene Maschineninformation
ID	Interdisziplinäre Maschineninformation
OG	Organisationsbezogene Maschineninformation
ST	Simulations- und testbezogene Maschineninformation

Digitale Technik:

CAA	Computer Aided Analysis
CAC	Computer Aided Conceptioning
CAE	Computer Aided Engineering
CAEX	Computer Aided Engineering eXchange
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAO	Computer Aided Office
CAP	Computer Aided Planning
CAT	Computer Aided Testing
CAQ	Computer Aided Quality Assurance
CACE	Computer Aided Control Engineering
CAD	Computer Aided Engineering
CASE	Computer Aided Software Engineering
ECAD	Electrical Computer Aided Design
FEM	Finite Element Methode
MCAD	Mechanical Computer Aided Design
PDM	Product Data Management
PLM	Produktlebenszyklusmanagement

TAM	Technik des Anforderungsmanagement
TDM	Team Data Management
TFM	Technik der Funktionsmodellierung
TPM	Technik des Projektmanagements
TPP	Technik der Publikationsplattform
TWM	Technik des Wissensmanagement
TZR	Technik zur Recherche
TZK	Technik der Kommunikation
VR	Virtual Reality
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme

1 Einleitung

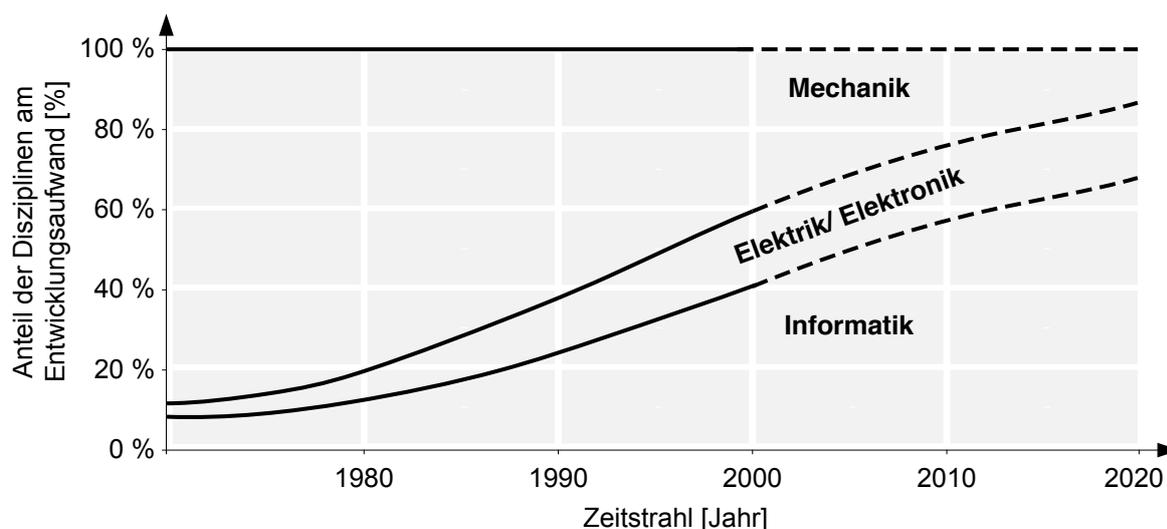
1.1 Bedeutung der Mechatronik im Maschinenbau

Das produzierende Gewerbe bildet das Rückgrat der deutschen Wirtschaft (ABELE & REINHART 2011, S. 1). Mit einem Anteil von 23,7 Prozent an der Bruttowertschöpfung (SBD 2011, S. 74) – beachtlich im Vergleich zu anderen Industrienationen (ABELE & REINHART 2011, S. 6) – sind es die Branchen des Automobilbaus, der chemischen Industrie sowie des Maschinenbaus, die ihre Produkte und Prozesse international zu *Exportschlägern* ausbauen (SBD 2011, S. 81). Mit 931.000 Beschäftigten und einem Umsatz von 200,5 Mrd. Euro im Jahr 2012 (VDMA 2013a, S. 15–17) zählt der Maschinenbau in Deutschland zu den größten und innovativsten Wirtschaftszweigen (HAGENKORT-RIEGER 2012; RAMMER ET AL. 2012, S. 15). Die kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Branche sind dabei stark exportorientiert (VDMA 2013a, S. 250) und leisten einen nachhaltigen Beitrag zur Stabilität und zum fortwährenden Wohlstand in Deutschland (vgl. SEUS & SEELE 2013), wodurch die internationale Reputation als „(...) Europe's powerhouse (...)“ (LEMKE 2013, S. 3) in der geografischen Mitte Europas bestärkt wird.

Der Maschinenbau steht vor einem Paradigmenwechsel, der durch den technologischen Fortschritt in den maschinenbaulichen Erzeugnissen geprägt ist. Die Maschinen und Anlagen werden auch in Zukunft aus einem mechanischen Grundgerüst bestehen (MAUDERER 2011; WÜNSCH 2007; VDI 2004), jedoch fortwährend um elektrisch angetriebene und komplexe, informationstechnische Komponenten ergänzt werden (MM 2011). Während der Anteil durch elektrische und elektronische Komponenten annähernd unverändert bleibt, treten mechanisch-konstruktive Lösungen zugunsten von informationstechnisch geprägten Ansätzen in den Hintergrund (Abbildung 1.1). Die Informatik hat sich dabei in den letzten Jahren von einer unterstützenden zu einer bestimmenden Disziplin herausgebildet (JUNGKUNZ 2005, S. 9).

Der Wandel von einer „(...) Maschine mit Softwarekomponenten (...hin zu einer...) Software mit Mechanikkomponenten (...)“ (STETTER & BLUM 2010, S. 70) tritt beispielsweise in dem Einsatz von intelligenten Feldgeräten in der Produktion zutage (SPIEGELBERGER 2011, S. 2). Dabei handelt es sich um Feldgeräte, die zusätzlich zu ihrer Kernaufgabe weitere Funktionalitäten – etwa zur Wartung oder zur vereinfachten Inbetriebnahme – zur Verfügung stellen. So müssen Lichtschranken heute nicht nur Objekte erkennen, sondern auch

1 Einleitung



Legende:
— literaturbasiert - - - prognostiziert

Abbildung 1.1: Anteil der Disziplinen an den Entwicklungsaufwänden in Anlehnung an MAUDERER (2011), STETTER (2008), WÜNSCH (2007, S. 2)

die Parametrierung und die Überwachung der Zustände ermöglichen sowie verschiedene Kommunikationsprotokolle anbieten. Neben Feldgeräten werden auch pneumatische Systeme durch dezentrale Informationstechnik ergänzt. Diese bieten neben einer kompakten Bauweise auch eine Anbindung zu diversen Komponenten mittels offener Kommunikationsprotokolle (MICHALKOWSKI 2015, S. 44). Ausgestattet mit einer zusätzlichen dezentralen Steuerung können überflüssige Verdrahtungen verringert und anwendungsspezifische Konfigurationen vorgenommen werden. Weitere Beispiele treten im Zuge der Forschungs- und Industriearbeiten zum Einsatz von Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPS) zutage (WITTENSTEIN ET AL. 2015, S. 134). So bieten CPS-Spannsysteme für moderne Drehmaschinen über die klassischen Funktionen hinausgehende Alternativen. Mit der Elektrifizierung von Spannsystemen können auftretende Zentrifugalkräfte minimiert und materialabhängig konfiguriert werden. Die Beispiele zeigen die Erweiterung von klassischen Maschinen und Anlagen um zusätzliche Funktionen, die sich aus dem Zusammenspiel der Disziplinen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik ergeben. Diese Nahtstelle stellt für die KMU ein erhöhtes Innovationspotenzial dar (KIEFER 2007, S. 82). Für eine Überführung der Potenziale in marktgerechte Produkte und Prozesse ist es notwendig, eine gemeinschaftliche und ganzheitliche Arbeitsweise im Sinne der Mechatronik in den Entwicklungsabteilungen der KMU zu etablieren (vgl. KICKINGER 2012, S. 334; HEIMANN ET AL. 2007, S. 14; ISERMANN 1999, S. 851).

Das Arbeitsfeld der Entwicklerinnen und der Entwickler entfernt sich im Zuge der Mechatronik von der ursprünglichen Aufgabe des mechanischen Konstruierens (WARTZACK 2007, S. 25–26). Neben den planerischen Aufgaben und der Beschaffung von entwicklungsrelevanten Informationen werden Forderungen nach einem grundlegenden „(...) Basiswissen in jeder Fachdisziplin (...)“ (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 51) laut. Das Verständnis in angrenzenden Gebieten soll es ermöglichen, die Diskussion auf Augenhöhe sowie den kreativen Austausch von Entwicklungsideen und -ansätzen mit vielfältigen Spezialisten zu fördern (KÜMMEL 2000, S. 122; HELFER 2013, S. 1). Diese zentrale Aufgabe kann aus Sicht der Industrie als „(...) gar nicht hoch genug eingeschätzt werden (...)“ (HELFER 2013, S. 1). Für die Konstrukteurinnen und Konstrukteure der KMU bedeutet dies, dass sie sich ein generelles Verständnis für die Fragestellungen und die technische Herausforderungen in der elektrischen/elektronischen und informationstechnischen Entwicklung aneignen müssen. Ein allgemeingültiger und übergreifender Wissens- und Erfahrungsschatz, beispielsweise in der Programmierung von Steuerungen, der Konfiguration von Aktoren und Sensoren und der virtuellen Inbetriebnahme, kann den fachlichen Austausch und die koordinierte Gemeinschaftsarbeit maßgeblich unterstützen.

Neben den Anforderungen an den Einzelnen ist die synergetische Zusammenwirkung aller Beteiligten, von den ersten Ideen bis zum Betrieb der Maschine oder Anlage beim Kunden, für eine erfolgreiche Durchführung eines Entwicklungsprojektes entscheidend (vgl. ABELE & REINHART 2011, S. 60). In diesem Zusammenhang ist auch der Bedarf an mechatronischen Vorgehensweisen, d. h. Prinzipien, Methoden oder Modellen für die Gestaltung des Entwicklungsprozesses unter den Gesichtspunkten der Mechatronik, gestiegen (GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 116). Diese stellen den Ingenieurinnen und den Ingenieuren Instrumentarien zur Verfügung, um mit der einhergehenden Komplexität von mechatronischen Systemen umzugehen (GAUSEMEIER 2012, S.4–5; MAUDERER 2011). Auch leisten diese eine Hilfestellung bei der Verknüpfung von Fachdisziplinen wie der Mechanik, Elektronik/Elektrik und Informatik (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 16; ABELE & REINHART 2011). Zusätzlich werden Gestaltungsvorschläge unterbreitet, um die hohen Änderungseinflüsse sowie Adaptionen, die oftmals durch veränderte Kundenwünsche im Projektgeschäft verursacht werden (THRAMBOULIDIS 2008; KIEFER ET AL. 2006), während der Entwicklung zu beherrschen. Ein bekanntes Beispiel für eine methodisch-gestützte Vorgehensweise ist das V-Modell der Mechatronik nach VDI (2004). Es repräsentiert einen ganzheitlichen und systemorientierten Ansatz mit besonderem Fokus auf die frühe und späte Phase der mechatronischen Entwicklung. Im V-Modell wird beispielsweise vorgeschlagen, disziplinenübergreifende Lösungskonzepte zu erarbeiten, die die

wesentliche physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes beschreiben (VDI 2004, S. 29–30). Dadurch sollen bereits vor einer Realisierung alternative Lösungen festgehalten und mögliche Abhängigkeiten erkannt werden. Aufbauend auf dem V-Modell sind vielfältige Ergänzungen und Derivate mit spezifischen Charakteristika entstanden, z. B. VI-Modell nach HENSEL (2013). In Summe werden in den Vorgehensweisen praxistaugliche Hilfsmittel zur Beherrschung der Mechatronik vorgeschlagen. Für die KMU des Maschinenbaus dienen diese als Soll-Konzepte und unterstützen bei der Überführung in die industrielle Anwendung.

Trotz der Vielzahl an methodischen Vorgehensweisen zur Beherrschung der Mechatronik zeigt die von GAUSEMEIER ET AL. (2013a) durchgeführte Befragung von produzierenden Unternehmen im deutschsprachigen Raum auf, dass es dem Maschinenbau, im Vergleich zu Vorreiterbranchen wie der Luft- und Raumfahrt, an einem effizienten und effektiven Einsatz von mechatronischen Vorgehensweisen mangelt. Die zumeist im wissenschaftlichen Umfeld entstandenen Ansätze, wie beispielsweise das o. g. V-Modell der Mechatronik, werden kaum in der industriellen Praxis eingesetzt. Wesentliche Hindernisse liegen in den hohen Aufwänden zur Einführung und den Defiziten in der Flexibilität der Methoden (GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 31). Es wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass die Anwendung von mechatronischen Vorgehensweisen auf deren unzulängliche Unterstützung durch die digitalen Werkzeuglandschaften (DWL), d. h. den Verbund der digitalen Werkzeuge entlang des Entwicklungsprozesses zurückzuführen ist (Definition siehe Abschnitt 2.3). Basierend auf diesen Hindernissen identifiziert die Umfrage Handlungsfelder aus dem Blickwinkel von industriellen Anwendern (Abbildung 1.2). Dabei bestätigt sich die Relevanz einer durchgängigen Virtualisierung und die aufeinander abgestimmter Werkzeuge (vgl. EIGNER ET AL. 2012). Jeder zweite Befragte benannte die Durchgängigkeit von DWL als maßgebliches Handlungsfeld, um einen Ablauf der Entwicklungsprojekte in den KMU unter den Gesichtspunkten der Mechatronik zu ermöglichen (vgl. GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 19). Es sind kohärente DWL zusammenzustellen, welche zur Beherrschung der Komplexität von Produktionssystemen und zur Konsistenzsicherung zwischen fachspezifischen Entwicklungssträngen beitragen, wie beispielsweise zwischen den Teilmodellen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik (vgl. EIGNER ET AL. 2012).

Die fehlende digitale Repräsentation durch geeignete DWL in den KMU führt dazu, dass die Bedürfnisse des umsetzungsorientierten Tagesgeschäfts im Maschinenbau nicht ausreichend berücksichtigt werden. Der Wandel zur Mechatronik findet zwar in den Maschinen und Anlagen statt, jedoch mangelt es bisher an angepassten digitalen Hilfsmitteln, um diesen Wandel effektiv und effizient zu begleiten. Für eine erfolgreiche

1.2 Herausforderungen an digitale Werkzeuglandschaften

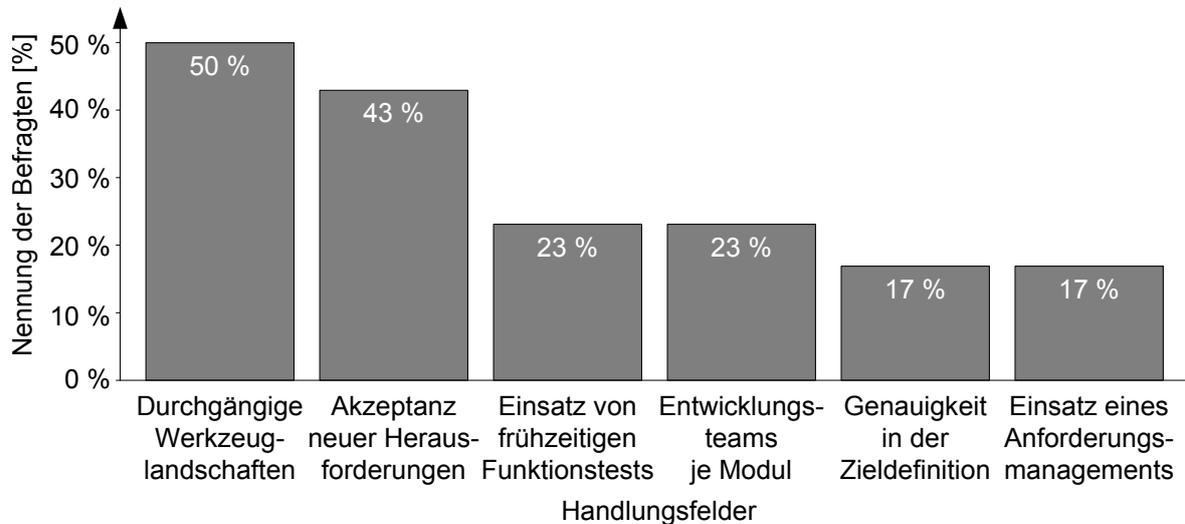


Abbildung 1.2: Handlungsfelder in der Entwicklung aus dem Blickwinkel von industriellen Anwendern in Anlehnung an GAUSEMEIER ET AL. (2013a, S. 19)

Anwendung der Vorgehensweisen in den KMU müssen die Chancen und Potenziale der Digitalisierung berücksichtigt werden. Die DWL sehen sich folglich mit vielfältigen Herausforderungen im Maschinenbau konfrontiert. Ihre praxistauglichen Lösungsansätze stellen jedoch einen entscheidenden Erfolgsfaktor dar, um im internationalen Wettbewerb weiterhin durch innovative und wettbewerbsfähige Produkte überzeugen zu können.

1.2 Herausforderungen an digitale Werkzeuglandschaften

Für eine praxistaugliche Gestaltung der Mechatronik sind Vorgehensweisen zu entwickeln, die für die betriebliche Anwendung in den Entwicklungsabteilungen der KMU bestimmt sind (GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 116). Dabei können die digitalen Werkzeuge, d. h. Informations- und Kommunikationssysteme entlang des Entwicklungsprozesses wesentliche *Befähiger* darstellen, um den Transfer eines methodisch gestützten Entwicklungsablaufs in die Praxis zu beschleunigen und sich in diesem Zusammenhang als zweckmäßige Hilfsmittel für die tägliche Arbeit der Ingenieurinnen und Ingenieure etablieren (EIGNER 2012a, S. 20; ANDERL 2012, S. 8; KÜMMEL 2000, S. 105–112). Informationstechnischen Systeme in der Entwicklung des Maschinenbaus sind heute vielfach unumgänglich geworden (JUNGKUNZ 2005, S. 12). Sie unterstützen die Entwicklung von Maschinen und Anlagen und setzen sich zum Ziel, nutzbringend computergestützte Methoden und Techniken entlang des Entwicklungsprozesses einzusetzen, um die

Qualität der Produktionssysteme zu steigern, Entwicklungskosten zu reduzieren und auch maßgeblich zur Verkürzung von Entwicklungszeiten beizutragen (ZÄH 2006, S. 67).

Aufbauend auf den diskutierten Erkenntnissen der Veröffentlichungen HERRMANN ET AL. (2015), STICH ET AL. (2015), STICH ET AL. (2013b), STICH ET AL. (2013a), REINHART ET AL. (2012) und DRESCHER ET AL. (2012) kann resümiert werden, dass es den bisherigen DWL an der *Bereitstellung geeigneter Vorgehensweisen zur Beherrschung der Mechatronik* mangelt (vgl. GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 119). Da ein einzelnes Werkzeug kaum die Ganzheitlichkeit der Mechatronik erfassen und umsetzen kann, spielt der Verbund der Werkzeuge, eine sogenannte digitale Werkzeuglandschaft, in den Unternehmen eine wesentliche Rolle. Neben der Bereitstellung von geeigneten Informationen, Funktionen und Techniken durch die Landschaft muss auch eine *systematische, aufeinander abgestimmte Zusammenarbeit der Werkzeuge* ermöglicht werden (vgl. DRATH ET AL. 2011, S. 452; MAUDERER 2011, S. 102; GAUSEMEIER 2008, S. 13). Dabei müssen die DWL zum einen die mechatronische Entwicklung unterstützen und zum anderen *passgenau für den situationsspezifischen Rahmen der KMU zugeschnitten* werden können (vgl. GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 32; EIGNER & ABRAMOVICI 2008).

Unterstützung von mechatronischen Vorgehensweisen:

Den KMU fehlen definierte Prozesse, strukturierte Abstimmungen zwischen den Disziplinen und ein ausgereiftes Krisenmanagement (SPIEGELBERGER 2011, S. 7). Neben Defiziten in den Entwicklungsprozessen ist es auch die mangelnde Unterstützung durch geeignete und ausgereifte digitale Werkzeuge (ANDERL 2012, S. 9; BAJAJ ET AL. 2011, S. 2), die dem Wandel zu einer mechatronischen Entwicklung im Maschinenbau entgegensteht (GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 119). So sind die digitalen Werkzeuge für einen disziplinspezifischen Einsatz und Zweck entwickelt worden (ANDERL 2012, S. 9) und an den organisatorischen Aspekten der jeweiligen Abteilungen ausgerichtet (TRISTL ET AL. 2013, S. 84). Es wird sich zu wenig an den Chancen und Risiken der Informationstechnologie orientiert, wodurch parallel ablaufende Teilentwicklungen sowie getrennte digitale Werkzeuge entstehen und kostspielige Nachbesserungen notwendig sind (TRISTL ET AL. 2013, S. 84; BROY ET AL. 2010). Ein solches Beispiel ist das CAD-Referenzmodell von ABELN (1997), welches Architektur und Funktionen aus Sicht der mechanischen Konstruktion beschreibt, wobei trotz der weiten Verbreitung und Relevanz des Modells die interdisziplinären Gedanken zu den angrenzenden Domänen der Elektrik/Elektronik und Informatik keine Würdigung erfahren. Die Folge ist, dass der tiefgreifende Wandel von mechanischen zu mechatronischen Maschinen und Anlagen in den digitalen Werkzeugen bisher kaum berücksichtigt wird (GAUSEMEIER ET AL. 2013a, S. 19; BAJAJ ET AL. 2011, S. 2).

1.2 Herausforderungen an digitale Werkzeuglandschaften

Durchgängige Zusammenarbeit der digitalen Werkzeuge:

Die Architektur von DWL spielt einen entscheidenden Faktor für eine effiziente und effektive Umsetzung von ganzheitlichen, mechatronischen Ansätzen. Die unterschiedlichen digitalen Werkzeuge entlang der Entwicklungsprozesse, wie beispielsweise des *Produkt Lebenszyklus Management (PLM)*, des *Computer Aided Design (CAD)* oder auch der Simulation, bilden zumeist heterogene und nur zum Teil kompatible Insellösungen (KIEFER 2007, S. 34). Sie berücksichtigen den interdisziplinären und ganzheitlichen Gedanken zwischen den Disziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik in der Mechatronik nur unzureichend (EIGNER 2012a; BAJAJ ET AL. 2011, S. 2). Beispielsweise sind Modellinformationen und Entwicklungsartefakte dezentral verteilt und beinhalten unterschiedliche Versionsstände, mit der Konsequenz, dass die Kompatibilität für eine durchgängige Entwicklung gemindert wird (HUMPERT 1995, S. 3). Eine durchgängige Digitalisierung durch systematisch aufeinander abgestimmte digitale Werkzeuge wird daher als unabdingbar angesehen, um die Komplexität von Maschinen und Anlagen zu beherrschen (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 18–19; GAUSEMEIER 2008, S. 13).

Anpassung an den situationsspezifischen Rahmen der KMU:

Neben der fehlenden Unterstützung mechatronischer Vorgehensweisen in den digitalen Werkzeugen ist zudem generell ein defizitärer Einsatz digitaler Hilfsmittel im Maschinenbau zu verzeichnen (ROTHHÖFT 2012). Die Anwendung von digitalen Standardwerkzeugen, wie sie z. T. von führenden Software-Herstellern angeboten werden, ist meist zu kostenintensiv und – aufgrund ihres originären Fokus auf die Flugzeug- und Automobilindustrie (BIERSCHENK ET AL. 2005, S. 27) – nicht an die Anforderungen des durch KMU geprägten Maschinenbaus angepasst (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 32; EIGNER & ABRAMOVICI 2008). Die mögliche Ursache, so vermuten JÄGER ET AL. (2013), liegt darin begründet, dass zum einen die Entwicklung im Maschinenbau spezifischer ist als es die digitalen Werkzeuge erlauben und zum anderen „(...) das Projektgeschäft stark abstrahiert werden müsste, um die Standard-Werkzeugfunktionen einfach nutzen zu können (...)“. Es ist also eine Diskrepanz zwischen dem Zusammenspiel der Entwicklungsprozesse und dem am Markt angebotenen Software-Systemen zu erkennen, was zur Folge hat, dass die Potenziale einer digitalen Unterstützung der Mechatronik in den Unternehmen unzureichend ausgeschöpft werden.

Die Unterstützung von mechatronischen Vorgehensweisen, die durchgängige Zusammenarbeit der digitalen Werkzeuge und die Anpassung an den Rahmen der KMU sind maßgebliche Herausforderungen an die DWL, um einen effektiven und effizienten Entwicklungsablauf unter den Gesichtspunkten der Mechatronik in der Branche des Maschinenbaus zu ermöglichen. Die Erreichung dieser Zielstellungen kann durch eine strukturierte

Methodik erfolgen, die die KMU bei einer auf ihre Entwicklung abgestimmten Gestaltung der DWL unterstützt. Dazu ist es zunächst erforderlich, den *Ist*-Zustand der Landschaft in den Unternehmen zu analysieren und einem *Soll*-Zustand unter den Aspekten der Mechatronik gegenüberzustellen. Ausgehend von der Bewertung können spezifische Gestaltungsvorschläge zur Verbesserung für die Unternehmen abgeleitet werden. Dadurch kann eine schrittweise Einführung der Mechatronik in die digitale Entwicklung der KMU begünstigt werden.

1.3 Nutzenpotenziale einer Bewertung und Gestaltung

In KMU werden Entscheidungen über einen Einsatz von Informations- und Kommunikationssystemen mangels geeigneter Instrumente überwiegend aufgrund qualitativer Aussagen getroffen, also auf der Basis von „Daumenregeln“ (PIETSCH 2003, S. 20). Die Auswahl von digitalen Werkzeugen basiert häufig auf geringen Informationen und z. T. auf Intuition. Es bleiben dabei die organisatorischen Folgen ebenso unberücksichtigt wie die Frage nach dem Sinn eines Einsatzes von digitalen Technologien. Die Vernachlässigung einer quantitativen Begleitung der Zielerreichung führt in den Unternehmen zu Fehlentscheidungen, wie die der falschen Einschätzung der Anwenderakzeptanz der Werkzeuge oder die einer vermeintlichen Kosteneinsparung durch Rationalisierungseffekte in der Unternehmensorganisation (PIETSCH 2003, S. 12–14).

Eine Methodik zur Bewertung und Gestaltung von DWL kann hierbei Abhilfe schaffen, indem Maßgrößen gebildet werden, die es ermöglichen den *Ist*-Zustand der DWL im untersuchten Unternehmen festzustellen. Es können Abweichungen vom Zielsystem bestimmt und darauf aufbauend korrektive Maßnahmen vorgeschlagen werden (WILD 1982, S. 151). Die Methodik leistet hierfür einen wertvollen Beitrag, indem sie die Zielerreichung einer Integration der Mechatronik in die DWL unter den genannten Herausforderungen (vgl. Abschnitt 1.2) systematisch und schrittweise begleitet. Die KMU werden maßgeblich unterstützt, indem innerhalb der Methodik

- ein *Soll*-Zustand formuliert wird, um ein Zielsystem für bestehende digitale Werkzeuglandschaften unter mechatronischen Gesichtspunkten zu erarbeiten,
- die Situation in der Entwicklung berücksichtigt wird, um den allgemeingültigen *Soll*-Zustand spezifisch an den Rahmen der KMU zu adaptieren,
- ein Hilfsmittel geschaffen wird, welches die stufenweise Verbesserung der DWL von einem *Ist*- zu einem *Soll*-Zustand begleitet sowie

1.3 Nutzenpotenziale einer Bewertung und Gestaltung

- ein Vorgehen bereitgestellt wird, welches die Gestaltungsvorschläge praxistauglich in die bestehenden Unternehmensprozesse integriert, beispielsweise im Rahmen des Beschaffungsprozesses.

Die Grundlage einer Bewertung ist in der Festlegung eines Zielsystems zu sehen. Dazu ist es erforderlich, einen Soll-Zustand zu erarbeiten, der konkrete und eindeutige Anforderungen an die digitalen Werkzeuglandschaften stellt. Dieser Soll-Zustand repräsentiert eine *ideale* Referenz, die die aktuellen Ansätze einer mechatronischen Entwicklung für die DWL systematisiert. Neben der Schaffung von Transparenz und Klarheit zur Bedeutung der Mechatronik in der *digitalen Welt*, kann eine solche Referenz beispielsweise in Form eines Lastenheftes die praktische Anwendung in den Unternehmen fördern.

In Ergänzung zu einem allgemeingültigen Soll-Zustand birgt eine Anpassung an die Gegebenheiten der Entwicklung eine spezifische und konkrete Aussagekraft für die KMU des Maschinenbaus. Durch die Adaption des Soll-Zustands können die Anforderungen gefiltert und auf einen für die Anwendung relevanten Bereich eingeschränkt werden. In der Folge sind zusätzlich Zeitersparnisse bei der Ein-, Vorbereitung und auch der Durchführung der Methodik zu erwarten, wodurch den Bedürfnissen eines umsetzungsorientierten Tagesgeschäfts im Maschinenbau nachgekommen werden kann.

Um eine Aussage über die Erfüllung des Soll-Zustand zu geben, ist es zudem notwendig, die Anforderungen an eine ideale Landschaft um eine Mess- und Bewertungsskala zu ergänzen. Diese gibt Aussagen über den Erfüllungsgrad des Ist-Zustands einer DWL im betrachteten Unternehmen. Ausgehend von dem Ist-Zustand kann eine Kategorisierung der Werkzeuglandschaft erfolgen, die als Grundlage dient, um eine stufenweise Verbesserung mittels Handlungsempfehlungen vorzuschlagen. Der Nutzen für KMU liegt in einer strukturierten Lenkung, Steuerung und Optimierung der unternehmensinternen DWL.

Das Vorgehen zur Gestaltung ist sowohl auf die digitale Werkzeuglandschaft des Anwenderunternehmens wie auch die Anpassung der Unternehmensprozesse bezogen. Die Handlungsempfehlungen können dabei in Form eines Lastenheftes als Gestaltungsvorschlag für die Überführung der Ist- zur Soll-Werkzeuglandschaft dienen. Der Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen wird als ein praxistauglicher *Stellhebel* in den KMU angesehen, der angepasst werden muss, um die Handlungsempfehlung im Rahmen einer Migration oder Einführung eines Informationssystems zu berücksichtigen. Der Nutzen für die Unternehmen liegt in der Integration der Methodik in vorhandene Unternehmensprozesse.

Die Methodik sollte einen Soll-Zustand der Mechatronik formulieren, eine Anpassung an die Entwicklung der KMU ermöglichen, eine stufenweise Verbesserung der DWL von

einem Ist- zu einem Soll-Zustand vorschlagen und die Integration in den Beschaffungsprozess vornehmen. Der Nutzen für das Anwenderunternehmen liegt in einem strukturierten, transparenten und praxistauglichen Vorgehen. Qualitative Einschätzungen auf Basis von „Daumenregeln“ (PIETSCH 2003, S. 20) können verringert und damit verbundene Fehlentscheidungen vermieden werden. Die Nutzenpotenziale motivieren für die Zielstellung und die Forschungsfragen der Methodik, die im Verlauf der Arbeit adressiert werden.

1.4 Zielstellung und Forschungsfragen

Um den Wandel von mechanisch zu mechatronisch geprägten Maschinen und Anlagen innerhalb der digitalen Werkzeuglandschaften systematisch zu begleiten, verfolgt die Arbeit die Zielstellung, eine

Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

zu erarbeiten. Aus der Zielstellung leiten sich vier Forschungsfragen (FF) ab, die das Zentrum der Betrachtungen darstellen und im Verlauf der Arbeit beantwortet werden:

FF 1:

Wie kann ein Soll-Zustand für DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik beschrieben werden?

FF 2:

Wie kann eine Anpassung des Soll-Zustands an den Rahmen der Entwicklungssituation der KMU des Maschinenbaus vorgenommen werden?

FF 3:

Wie kann der Ist-Zustand von DWL innerhalb der KMU bewertet werden?

FF 4:

Wie können Handlungsempfehlungen zur Gestaltung von DWL abgeleitet und in den Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen integriert werden?

Die Methodik ist als ein Instrumentarium zu verstehen, welches einen Soll-Zustand für digitale Werkzeuglandschaften unter mechatronischen Gesichtspunkten abbildet (FF1) und eine Anpassung an die Entwicklungssituation des Unternehmens im Maschinenbau zulässt (FF 2). Die Systematiken zu der Bewertung und der Gestaltung von Werkzeuglandschaften in der Methodik (FF 3) ermöglichen die praxistaugliche Anwendung und berücksichtigen im Besonderen den Beschaffungsprozess als einen *Stellhebel* zur

Überführung von Handlungsempfehlungen in die KMU des Maschinenbaus (FF 4). Zur Beantwortung der Fragestellungen ist eine Orientierung an einem wissenschaftlichen Vorgehen gefordert. Dazu ist es notwendig, die Arbeit in den wissenschaftstheoretischen Rahmen einer Handlungswissenschaft einzuordnen. Es werden Forschungsphasen der Wissenschaftsdisziplin vorgestellt, der Bezug zu den Kapiteln hergestellt und somit die Grundlage zur Ergründung der Zielstellung und der Forschungsfragen gelegt.

1.5 Wissenschaftstheoretische Positionierung

Wissenschaftliche Forschung kann in Formal- und Realwissenschaften unterschieden werden (ULRICH & HILL 1976, S. 305). Formalwissenschaften, wozu beispielsweise die Mathematik zählt, bezeichnen keinen konkreten und empirisch zugänglichen Gegenstandsbereich (SCHURZ 2011, S. 34). Es werden keine Aussagen über die Realität getroffen, sondern abstrakte Modelle, Strukturen und Axiome aufgestellt und deren Konsequenzen abgeleitet (SCHURZ 2011, S. 34). Im Gegensatz dazu orientieren sich die Realwissenschaften am *Explizieren*, *Generalisieren* und *Entwerfen* von Wirklichkeitsabschnitten (ULRICH & HILL 1976, S. 306). Es soll die Realität durch präzise Begrifflichkeiten beschrieben, durch eine Verallgemeinerung von spezifischen Situationen und Fällen abstrahiert und letztlich auch durch eine Ableitung von Handlungsalternativen gestaltet werden. Mit diesem Ziel gliedern ULRICH & HILL (1976, S. 305) die Realwissenschaften wiederum in Grundlagen- und Handlungswissenschaften. Grundlagenwissenschaften versuchen Erklärungsmodelle der Wirklichkeit zu bilden. Eine Vertreterin der Grundlagenwissenschaft ist die Naturwissenschaft. Die Ingenieurwissenschaft zählt zu den Handlungswissenschaften, die zwar die Grundlagenwissenschaften benötigen, sich jedoch in der Art abgrenzen, dass nicht „(...) beschrieben wird was existiert (...)“ (SCHEITHAUSER 2012, S. 5), sondern „(...) immer wieder neue Dinge (...erdacht werden müssen...), die bis dato noch nicht existieren (...)“ (SCHEITHAUSER 2012, S. 5). Diese beinhalten also einen Anwendungscharakter, der eine Analyse menschlicher Handlungsalternativen bedarf, um soziale und auch technische Systeme zu gestalten (ULRICH & HILL 1976, S. 305).

Wesentliche Merkmale der Handlungswissenschaften sind im Entstehungs-, Begründungs- und Anwendungszusammenhang zu sehen (ULRICH 1981, S. 5–9). Dem Entstehungszusammenhang liegt die Zielsetzung zugrunde, nützliches und verwertbares Wissen zu generieren (HOFMANN 2004, S. 289). Dabei entstehen im Vergleich zur Grundlagenwissenschaft die Fragestellungen nicht in der Theorie, sondern in der Praxis: Es sind maßgeblich die Probleme von Praktikern, bei denen das nötige

Wissen einer adäquaten Lösung bisher fehlt (ULRICH 1981, S. 5). Im Fall der Handlungswissenschaften liegt die Begründung wissenschaftlicher Aussagen in der Untersuchung von möglichen zukünftigen Realitäten (HOFMANN 2004, S. 290). Die gestalterischen Aspekte stehen im Vordergrund, wodurch sich die Handlungswissenschaften stark von den Grundlagenwissenschaften unterscheiden. Während in der Grundlagenforschung die empirische Forschung zur Überprüfung des Wahrheitsgehalts genutzt wird (HOFMANN 2004, S. 289), ist die Empirie für die Handlungswissenschaften ein Instrument, um die Relevanz und die Anwendbarkeit der Gestaltungsempfehlungen herauszustellen (vgl. ULRICH 2001, S. 24). Den Anwendungszusammenhang wissenschaftlichen Wissens sieht ULRICH (1981, S. 7) in der Praxis. Unter dem Praxisbegriff wird menschliches Verhalten im Kontext sozialer und natürlicher Systeme verstanden (ULRICH 1981, S. 7–8). Dadurch wird nach HOFMANN (2004, S. 290) auch die „gesellschaftlich-natürliche Dynamik“ inkludiert, wodurch eine vollständige Prognostizierbarkeit und Gestaltung aller denkbaren Zustände nicht möglich ist. Die Anwendung benötigt somit auch eine hinreichende Abgrenzung des Untersuchungsobjektes, die den Transfer in die Praxis sicherstellt (WEBER 2000, S. 137 nach HOFMANN 2004, S. 290).

Die Arbeit folgt dem Bezugsrahmen der Handlungs- bzw. der Anwendungswissenschaften. Der Entstehungszusammenhang liegt in der Notwendigkeit eines Instrumentariums zur Integration von mechatronischen Gesichtspunkten in die DWL des Maschinenbaus. Dazu werden die praxisrelevante Problemlage erfasst und die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit gelegt (Kapitel 1 und 2). Es werden ebenfalls Theorien und Verfahren untersucht, die sich bereits in Wissenschaft und Praxis etabliert haben (Kapitel 3). Der Begründungszusammenhang wird durch die Entwicklung von Gestaltungsregeln und -modellen hergestellt, die in einer Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau zusammengeführt werden (Kapitel 4). Der Anwendungszusammenhang der Arbeit lässt sich zum einen in der Problemlage erkennen (Kapitel 1) und zum anderen durch den Transfer in die industrielle Praxis anhand eines repräsentativen Anwendungsbeispiels nachweisen (Kapitel 5). Unterstützend wird eine Beurteilung der Methodik vorgenommen, werden Grenzen und weiterführende Forschungsbedarfe aufgezeigt (Kapitel 6 und 7).

Die Arbeit folgt den Vorgaben einer Handlungswissenschaft. Während die Vorbetrachtungen in der Analyse der Problemlage liegen, wird im Kern der wissenschaftlichen Arbeit eine Methodik zur Bewertung und Gestaltung entworfen. Dazu werden die FF 1 bis 4 in einem wissenschaftlichen Vorgehen ergründet (vgl. Beiträge aus Forschungsprojekten und Veröffentlichungen im Anhang A.1) und die Ergebnisse in einer praxistauglichen Methodik zusammengeführt. In der Folge kann der Aufbau der Arbeit abgeleitet werden.

1.6 Aufbau der Arbeit

Während Kapitel 1 eine Einführung zur Thematik darstellt, werden in Kapitel 2 wesentliche Begriffe aus den Bereichen der Mechatronik und der digitalen Produktentwicklung bestimmt (Abbildung 1.3). Die Problemstellungen der Arbeit werden in Kapitel 1 ausgeführt, wobei die Bedeutungen und Herausforderungen der Mechatronik für DWL erläutert, für eine Methodik zur Bewertung und Gestaltung nutzbar gemacht und die Zielsetzungen sowie Forschungsfragen abgeleitet werden. In Kapitel 3 wird der problemrelevante Untersuchungsbereich im Maschinenbau, in der Mechatronik und in der digitalen Entwicklung dargelegt. Es werden die Branche des Maschinenbaus charakterisiert, bekannte mechatronische Entwicklungsansätze dargelegt und der Stand der Wissenschaft und Technik der DWL bewertet. In Kapitel 4 werden die Forschungsfragen beantwortet, indem ein Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften (vgl. FF 1), ein Vorgehen zur Anpassung an die Situation der Entwicklung (vgl. FF 2), eine Systematik zur Bewertung nach Gesichtspunkten der Mechatronik (vgl. FF 3) und die Gestaltung im Rahmen von Handlungsempfehlungen und der Integration in den Beschaffungsprozess (vgl. FF 4) dargelegt werden. Die Methodik wird in Kapitel 5 anhand eines Praxisbeispiels angewandt, in Kapitel 6 einer Beurteilung unterzogen und in Kapitel 7 zusammengefasst.

Kapitel 1 Einleitung	Bedeutung und Herausforderung der Mechatronik, Zielstellung, Forschungsfragen, Vorgehen und Aufbau
Kapitel 2 Grundlagen	Diskussion und Ableitung der Begriffe aus der Mechatronik und aus der digitalen Entwicklung
Kapitel 3 Stand der Wissenschaft und Technik	Branche des Maschinenbaus, mechatronisches Vorgehen, digitale Entwicklung, Bewertungsansätze
Kapitel 4 Methodik	Referenzmodell, Anpassung an die Entwicklungssituation, Fähigkeiten, Integration und Gestaltung
Kapitel 5 Anwendung	Anwendung der Methodik an einem Praxisbeispiel im Maschinenbau
Kapitel 6 Beurteilung	Erfüllung der Anforderungen und Forschungsfragen, Wirtschaftlichkeit der Methodik
Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblick	Zusammenfassung der Kapitel und Identifikation weiterer Forschungsbedarfe

Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Der Abschnitt 2.2 formuliert den Wesenskern der *Mechatronik* und stellt die Besonderheiten von mechatronischen Systemen für die Produktionstechnik heraus. Ausgehend von der Bedeutung im Maschinenbau findet eine Übertragung in den Kontext der digitalen Entwicklung statt. Die Ausführungen tragen zum Verständnis des Arbeitsumfeldes der digitalen Werkzeuge bei. Infolgedessen werden verschiedene Interpretationen des *mechatronisches Handlungsprinzips* diskutiert und eine Arbeitsdefinition aufgestellt, wobei der Sammelbegriff der Vorgehensweisen aufgelöst und eine Abgrenzung zu den Begriffen der Methode und des Vorgehensmodells vorgenommen wird. Die Handlungsprinzipien werden im Verlauf der Arbeit genutzt, um Soll-Anforderungen an die DWL abzuleiten und eine schrittweise Verbesserung im Sinne der Mechatronik zu befähigen.

Während die Begriffe aus der Mechatronik die Grundlagen für das *Zielsystem* darstellen, erläutert der Abschnitt 2.3 das strukturelle und inhaltliche Grundgerüst für das betrachtete *Objekt* der Bewertungs- und Gestaltungsmethodik. Es werden dazu die in der Literatur vorhandenen Bedeutungen des Begriffes des *digitalen Werkzeuges* analysiert, eine für die Arbeit anwendbare Definition abgeleitet und der grundlegende Aufbau eines digitalen Werkzeuges vorgestellt. Für den Verbund der digitalen Werkzeuge wird die Begrifflichkeit der *digitalen Werkzeuglandschaft* geprägt und anhand eines Vergleiches zur Landschaftskunde diskutiert. Folglich können markante Merkmale in den Maschinenbau übertragen und das Bewertungs- und Gestaltungsobjekt für die Methodik festgelegt werden.

2.2 Begriffe aus der Mechatronik

2.2.1 Mechatronik

Die Begrifflichkeit der Mechatronik stammt ursprünglich aus Japan und wurde im Rahmen der Weiterentwicklung der Regelungstechnik geprägt (GRÄSSLER 2013, S. 36; VDI 2004, S. 10–11). Die Mechatronik gehört seit vielen Jahren zum Standardrepertoire japanischer

2 Grundlagen

Produkte, was sich in dem stetigen Erfolg der japanischen Innovationen wie der Autofokus-Kamera und der Camcorder widerspiegelt (TOMIZUKA 1996, S. 101). Während bis in die 1990iger Jahre unter Mechatronik nicht mehr als eine „(...) good engineering practice (...)“ (TOMIZUKA 1996, S. 101), d. h. eine anerkannte technische Regel verstanden wurde, ist das Potenzial in Kontinentaleuropa und den Vereinigten Staaten von Amerika frühzeitig erkannt worden. Der originäre Gedanke von einer synergetischen Fusion der mechanischen und elektrischen Disziplinen in modernen Produkten und Prozessen spiegelt sich bereits in der Wortsynthese aus den Disziplinen **Mechanik** und **Elektronik** wider (ISERMANN 2008, S. 8; AUSLANDER 1996, S. 5). Mit Gründung des Journals *Transactions on Mechatronics* im Jahr 1996 wurde das Begriffsverständnis der Mechatronik um die Software-Sicht erweitert (KAYNAK 1996, S. 2) und nach TOMIZUKA (1996, S. 101) definiert als:

„Mechatronics is the synergetic integration of mechanical engineering with electronic and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.“

Die Arbeit schließt sich der Definition von TOMIZUKA (1996, S. 101) an und versteht Mechatronik als die Integration der Disziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik. Die Begrifflichkeit hält dabei Einzug sowohl in das Verständnis der produktionstechnischen Produkte als auch in die hierfür notwendigen Entwicklungs- und Produktionsprozesse in der Branche des Maschinenbaus. Auf der technischen Seite spiegelt sich der Einfluss der Mechatronik im Systemverständnis der Maschinen und Anlagen wider. Mechatronische Systeme unterscheiden sich im strukturellen Aufbau und dem Funktionsspektrum von rein mechanischen Lösungen. Unter Mechatronik im Entwicklungsprozess werden im Gegensatz dazu organisatorische Maßnahmen zusammengefasst, die eine optimale Zusammenarbeit der disziplinspezifischen Akteurinnen und Akteure von der ersten Idee bis zur Inbetriebnahme der Maschine oder Anlage fördern.

Sowohl mechanische als auch mechatronische Systeme bestehen aus mehreren Teilen und formieren ein zusammengesetztes Ganzes mit einer konkreten Absicht. Die Systeme zeichnen sich durch eine Systemgrenze, ein Gefüge bzw. eine Ordnung zwischen einzelnen Elementen und durch *Inputs* und *Outputs* zur Bestimmung der Relation zwischen den Elementen aus (LINDEMANN 2009, S. 10). Ein mechatronisches System im Besonderen ist bestimmt durch ein mechanisches Grundgerüst, elektrische Sensoren sowie Aktoren und eine Informationsverarbeitung (Abbildung 2.1). Die Komponenten sind räumlich und funktional in ein System integriert. Das Grundsystem ist mit den Sensoren und Aktoren verbunden, deren Aufgaben in der Überwachung, Steuerung und Regelung von Produktionsabläufen liegen. Um dies zu ermöglichen, bestimmen die Sensoren Zustandsgrößen

des Grundsystems und stellen diese als Eingangsgrößen der Informationsverarbeitung zur Verfügung. Die Informationsverarbeitung bestimmt die Arbeitsweise des Systems, indem sie anhand der Eingangsgrößen die Aktoren einstellt. (VDI 2004, S. 14–15)

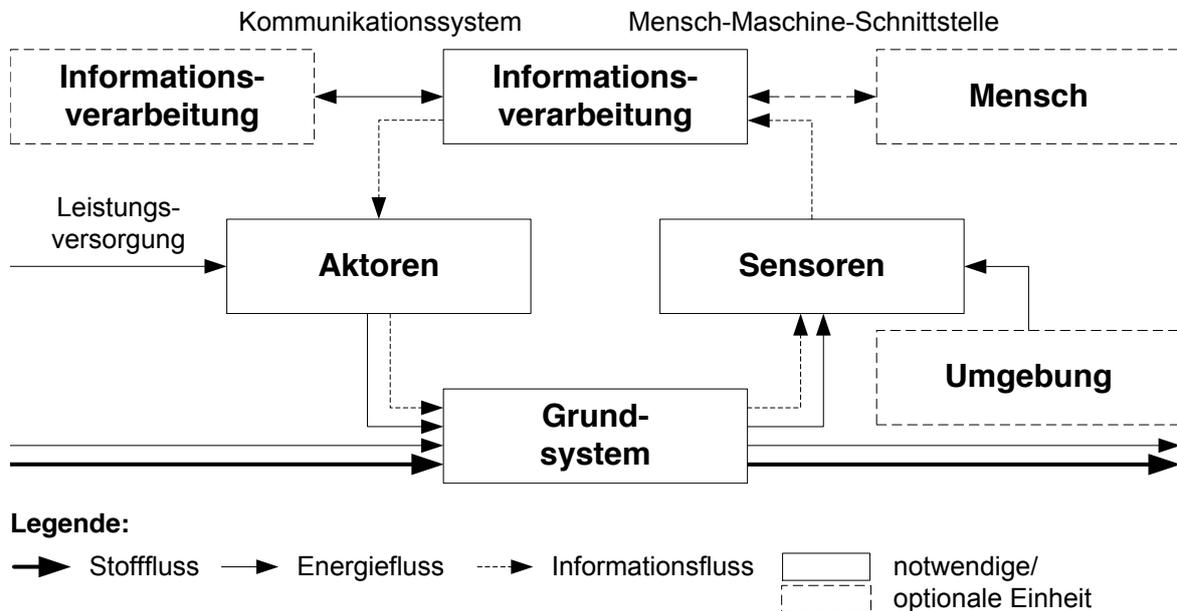


Abbildung 2.1: Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach VDI (2004, S. 14)

Neben den technischen Produkten spiegelt sich die zunehmende Bedeutung der Mechatronik auch in den Entwicklungsprozessen des Maschinenbaus wider (vgl. Abschnitt 1.1). Dabei beinhaltet die Mechatronik mehr als nur eine „(...) reine Addition der Disziplinen (...)“ (ISERMANN 1999, S. 851), sondern sie bietet darüber hinaus die Notwendigkeit, eine optimale Balance zwischen den fachlichen Belangen der Disziplinen zu schaffen. Dies bedeutet, dass mechanische, elektrische sowie informationstechnische Funktionen gleichberechtigt und im gegenseitigen Abhängigkeitsgefüge entlang des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen sind (GRÄSSLER 2013, S. 36; HEIMANN ET AL. 2007, S. 14). Eine ganzheitliche Systembetrachtung ist dabei unausweichlich (WERNICKE 1996), da sie zum einen die Entwicklung von den ersten Ideen bis zur Inbetriebnahme der Maschinen und Anlagen beim Kunden *mechatronisch* verfolgt (vgl. KOEHNE 2011, S. 44; ISERMANN 2008, S. 3; KAYNAK 1996) und zum anderen die beteiligten Interessensparteien, wie bspw. die der disziplinspezifischen Entwicklerinnen und Entwickler, in die Entwicklung ganzheitlich involviert.

Die o. g. Ausführungen nehmen die in der Literatur vorherrschenden Blickwinkel auf die Mechatronik zum einen aus der Sichtweise der Maschinen und Anlagen und zum anderen aus der Sichtweise des Entwicklungsprozesses ein. Die Gedanken der Mechatronik sind bisher nicht in den Kontext der digitalen Werkzeuglandschaften übertragen worden.

Da die digitalen Werkzeuglandschaften als das informationstechnische Pendant zum Entwicklungsprozess verstanden werden können (vgl. Abschnitt 2.3), knüpft die Arbeit im Kern an die Betrachtung der Mechatronik im Rahmen der Entwicklungsprozesse an. Im Besonderen bedeutet dies, dass ganzheitliche Ansätze zur Systembetrachtung der Maschinen und Anlagen in den digitalen Werkzeugen unterstützt werden müssen. Die Zusammenarbeit der Ingenieurinnen und Ingenieure aus den Entwicklungsabteilungen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik muss gefördert werden. Dabei werden Maßnahmen entwickelt, die das rein prozessuale Verständnis um die informationstechnischen Möglichkeiten erweitert (z. B. mechatronische Simulation). Es werden hierfür sogenannte mechatronische Handlungsprinzipien systematisiert, die als Ausgangslage dienen, um einen idealen Soll-Zustand für die digitalen Werkzeuglandschaften unter den Gesichtspunkten der Mechatronik zu beschreiben.

2.2.2 Mechatronisches Handlungsprinzip

Die mechatronische Entwicklung kann in Form von Denk- und Handlungsabläufen beschrieben werden. Im Vergleich zur klassischen Konstruktionsmethodik bietet die Betrachtung auf einem elementaren Niveau eine höhere Anpassbarkeit und Flexibilität bei der Anwendung (WULF 2001, S. 14). Vielfältige Anstöße zu der Elementarbetrachtung kamen aus der empirischen Konstruktionsforschung (z. B. BIRKHOFER & LINDEMANN 1999), der Psychologie (z. B. WITTE & DAVIS 2013) und der Praxis (z. B. BIRKHOFER ET AL. 2001). Im Hinblick auf die Arbeit erwiesen sich diese als förderlich, da sie das Strukturieren und das Zuschneiden von mechatronischen Vorgehensweisen auf die Entwicklungssituation der KMU ermöglichten. Eine Unterteilung der mechatronischen Entwicklung in wiederverwendbare *Elemente* wird in der Arbeit für die Beschreibung von DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik verwendet. Es werden hierzu sogenannte *mechatronische Handlungsprinzipien* abgeleitet, die als Zielsystem für eine Bewertung und Gestaltung fungieren und in das Referenzmodell der DWL einfließen (vgl. Abschnitt 4.2).

Der Prinzipienbegriff kann an die Bedeutung eines festen Grundsatzes in der Produktentwicklung angeknüpft werden (GRIMM & GRIMM 2014). So klassifiziert PENNY (1970, S. 344) die Gesamtheit der Sammlungen von bewusst oder unbewusst entstandenen Folgen an Mustern als Prinzipien. Er weist aus, dass es sich dabei um oftmals über Jahre gewachsenes Erfahrungswissen handelt, welches sich in der Anwendung der Konstrukteure und Entwickler als erfolgreich herausstellte. Im Gegensatz zu PENNY (1970) sieht EDER & HOSNEDL (2008, S. 377) Prinzipien in der Produktentwicklung als „(...)

general guidelines and formalized heuristics for engineering designers, and acceptability of solutions, and so forth, usually without prescribing a procedure (...)“. Dies bedeutet, dass es sich um allgemeine Richtlinien und Heuristiken zur Ideensuche und Lösungsfindung handelt, wobei eine muster- oder prozessuale Abbildung in definierten Schritten selten und auch nicht als notwendig anzusehen ist.

PAHL ET AL. (2006, S. 68–69) erwähnen hingegen Prinzipien als Strategien, die bei der Problemlösung angewandt werden können. Diese sind von generellem Charakter, branchenunabhängig und sollen das Denken in einer geordneten und effektiven Form unterstützen. Sie argumentieren, dass ein intuitives Vorgehen im Entwicklungsprozess zwar zulässige Lösungen findet, jedoch eine reine intuitive Arbeitsweise nachteilig ist. Dies ist damit zu begründen, dass der richtige Einfall selten zum gewünschten Zeitpunkt erfolgt (ZOBEL 2009, S. 15). Auch sind die Ergebnisse stark von den Erfahrungen des Bearbeiters abhängig. Eine Abhilfe kann beispielsweise das Prinzip des *diskursiven Vorgehen* schaffen. Dabei handelt es sich um ein Vorgehen, das stufenweise die Lösung eines Problems begleitet. Es werden einzelne Ideen analysiert, variiert und miteinander kombiniert.

Auch LINDEMANN (2009, S. 55) nutzt die Begrifflichkeit in einer ähnlichen Weise, indem er acht wesentliche *Grundprinzipien des Handelns* (LINDEMANN 2009, S. 55) im Entwicklungsprozess herausstellt. Er sieht die Grundprinzipien als Grundsätze, die durch ihren präskriptiven Charakter elementare Verhaltensweisen bilden, die das Vorgehen im Entwicklungsprozess prägen. Dabei sind Allgemeingültigkeit und Unabhängigkeit der mechatronischen Handlungsprinzipien von einer konkreten Lösung gegeben. Der Vergleich zu einem *Element* rückt Modularität und Wiederverwendbarkeit entlang des Entwicklungsprozesses in den Vordergrund. HABERFELLNER ET AL. (1994, S. 29–30) unterstützen das Verständnis von LINDEMANN (2009) und sprechen allerdings in diesem Zusammenhang von „Vorgehensprinzipien“, die im Wesentlichen als kombiniert zu verwendende Komponenten angesehen werden. Sie bestätigen die Eigenschaft eines modularen und wiederverwendbaren Charakters von Prinzipien. Ebenfalls WINZER (2013, S. 15–20) folgt gleicher Auffassung.

Die vorliegende Arbeit lehnt sich an die Begriffsverständnisse der Produktentwicklung an, folgt der allgemeinen Auffassung eines *festen Grundsatzes* und dem Verständnis von einer Strategie zur Problemlösung nach PAHL ET AL. (2006). Diese werden den Ansätzen von LINDEMANN (2009) und HABERFELLNER ET AL. (1994) gerecht, indem ein mechatronisches Handlungsprinzip durch Modularität und Wiederverwendung geprägt ist. Aufgrund der hohen Bedeutungsvermischung mit dem Methodenbegriff werden die Auffassungen von PENNY (1970) und EDER & HOSNEDL (2008) von einer prozeduralen Schrittfolge

hingegen nicht weiter verfolgt. Die Arbeit definiert ein *mechatronisches Handlungsprinzip* wie folgt:

Ein mechatronisches Handlungsprinzip ist ein Grundsatz zur Unterstützung des Handelns in der Entwicklung mechatronischer Maschinen und Anlagen. Es ist als ein allgemeingültiges Element zu verstehen, das im wiederholten Maße entlang des Entwicklungsprozesses Anwendung findet und zur flexiblen Charakterisierung der Mechatronik in digitalen Werkzeuglandschaften dient.

Die mechatronischen Handlungsprinzipien grenzen sich von den zuvor betrachteten Werken ab, indem der Ursprung durch den nominalen Zusatz der *Handlung* gestärkt wird. Es sollen Begriffsverwechslungen mit dem in der Produktentwicklung verwendeten Begriffen des „Lösungs- und Wirkprinzips“ (z. B. PAHL ET AL. 2006), des „Innovationsprinzips“ (z. B. SPUR & ESSER 2013) und des „Innovativitätsprinzips“ (z. B. BANNERT 2008) vermieden werden. Weiterhin rückt die Arbeit die Anwendung im Rahmen einer Entwicklung von mechatronischen Maschinen und Anlagen in den Vordergrund. Die Mechatronik nimmt innerhalb der Betrachtung von Handlungsprinzipien einen zentralen Stellenwert ein. Es werden in der Literatur angewandte Prinzipien auf deren Nutzung innerhalb einer mechatronischen Entwicklung geprüft, ggf. übertragen oder auch adaptiert.

Die Arbeit systematisiert zu diesem Zweck insgesamt zwölf mechatronische Handlungsprinzipien (vgl. Abschnitt 4.2). Als ein Beispiel sei das mechatronische Handlungsprinzip der *Berücksichtigung von Alternativen aus Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software* in Anlehnung an HABERFELLNER & DAENZER (2002) genannt. Komplexe Aufgaben in einer interdisziplinären Entwicklung zeichnen sich durch eine Vielzahl an Lösungswegen aus. Eine Beachtung der Lösungsalternativen kann somit einen Wettbewerbsvorteil bedeuten. So kann beispielsweise der Transport von Materialien erfolgen, indem diese auf einem elektrisch angetrieben Band befördert werden. Alternativ können auch einfache und rein mechanische Bewegungen der Transportwagen durchgeführt werden. Beide Lösungswege sollten in der Entwicklung betrachtet werden. Eine Entscheidung für oder gegen eine der beiden Varianten ist zumeist abhängig von den situationspezifischen Rahmenbedingungen.

Eine Einordnung des Prinzipienbegriffs in den Rahmen der mechatronischen Vorgehensweisen kann anhand des Blickwinkels auf die Entwicklung erfolgen. Es werden oftmals verschiedene Blickwinkel verwendet, um eine gezielte und zweckgebundene Betrachtung der Entwicklung zu ermöglichen (LINDEMANN 2009, S. 38). In Anlehnung an die Vorstellungen aus der Handlungstheorie, wonach in individuelle Akteure (Mikroebene)

und überlagerte Phänomene (Makroebene) unterschieden werden kann (COLEMAN 2010, S. 24), wird deutlich, dass der Auflösungsgrad der Betrachtung eines Prozesses, im Besonderen eines von Ingenieurteams bestimmten Entwicklungsprozesses, als wesentlich zu erachten ist. Eine solche Unterscheidung ist in die Abbildung 2.2 eingeflossen. Die Mikrologik betrachtet elementare Denk- und Handlungsabläufe, wie beispielsweise mechatronische Handlungsprinzipien. Daneben können Vorgänge auf operativer Ebene, mit Aktivitäten und Handlungsschritten, dem Methodenbegriff zugeordnet werden. Eine Betrachtung auf Ebene eines Gesamtprojektes wird beispielsweise im Rahmen von Vorgehensmodellen vorgenommen. Eine Abgrenzung zwischen mechatronischen Handlungsprinzipien, Methoden und Vorgehensmodellen wird im Folgenden beschrieben.

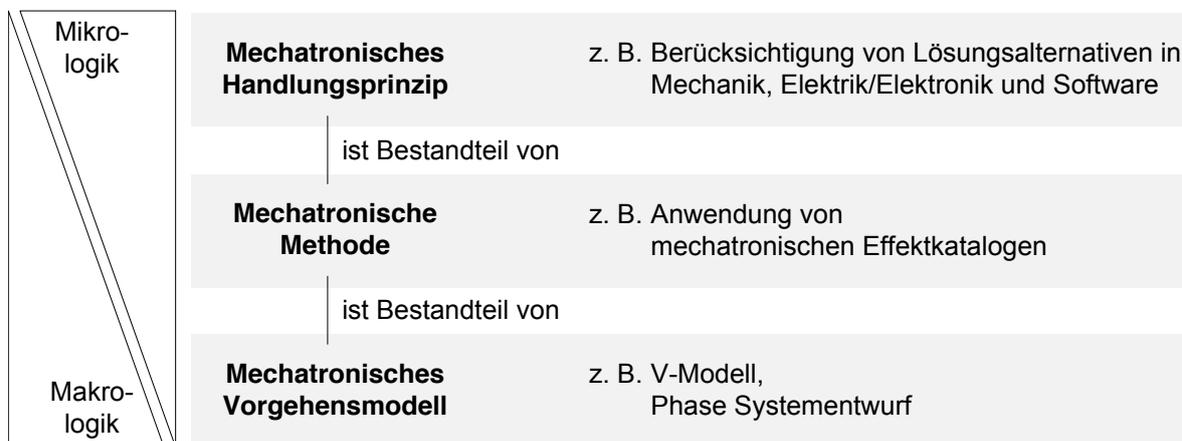


Abbildung 2.2: Einordnung des Handlungsprinzips in die mechatronischen Vorgehensweisen beruhend auf den Vorstellungen zum Auflösungsgrad in der Produktentwicklung nach LINDEMANN (2009, S. 38) und dem Dreieck der Informatik nach CHROUST (1992, S. 52)

Im Gegensatz zu einem mechatronischen Handlungsprinzip ist eine Methode eine Vorgehensweise zur Entwicklung von Produkten. Es handelt sich dabei um einen konkreten Leitfaden mit detaillierten Einzelschritten bzw. Aktivitäten und einem hohen operativen Charakter (LINDEMANN 2009, S. 57). Diese sind als Regeln einzuhalten und beinhalten konkrete Vorschläge für die Notation zur Dokumentation von Entwicklungsergebnissen (FRITZSCHE & KEIL 2007, S. 3–4). Mechatronische Handlungsprinzipien sind allgemein und problemunabhängig, während eine Methode eine konkrete Problemlösung zum Ziel hat. Prinzipien finden sich in vielen Methoden wieder (LINDEMANN 2009, S. 58). Als ein Beispiel für das mechatronische Handlungsprinzip der *Berücksichtigung von Alternativen aus Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software* kann die Anwendung mechatronischer Effektkataloge gesehen werden. Diese charakterisieren und beschreiben physikalische

Effekte, die dem Entwickler als Lösungsalternativen zur Verfügung stehen (KAHLERT ET AL. 2004, S. 1–6). Zugeordnet zu Teilfunktionen des Produktionssystems unterstützt ein Katalog die Suche nach möglichen Wirkprinzipien und Lösungselementen (VDI 2004, S. 22) wie beispielsweise der Konstruktionskatalog von KAHLERT ET AL. (2003) oder ROTH, K. (2000).

Ein Vorgehensmodell setzt sich die Lösung eines Problems zum Ziel (KOPP 2014, S. 73) und weist einen präskriptiven und prozeduralen Charakter mit konkreten Handlungsempfehlungen auf (HACKEL 2010, S. 111). Es ist in Phasen, Aktivitäten und Prozessschritte gegliedert (WIECZORREK & MERTENS 2008, S. 64; PAHL ET AL. 2006, S. 19). Neben einer zeitlichen Reihenfolge, werden auch Rollen und Entwicklungsergebnisse festgehalten (FRITZSCHE & KEIL 2007, S. 4). Vorgehensmodelle finden Anwendung als prozessorientierte Richtlinien oder Leitfäden (EIGNER 2014, S. 15), die bestimmte Entwicklungsmethoden und auch Prinzipien enthalten können (FRITZSCHE & KEIL 2007, S. 4). Ein mechatronisches Vorgehensmodell ist beispielsweise das V-Modell der Mechatronik, enthalten in der VDI-Richtlinie 2206 (VDI 2004). Das V-Modell untergliedert in die Phasen des Systementwurfs (*linke Ast* des V-Modells), des domänenspezifischen Entwurfs und der Systemintegration (*rechte Ast* des V-Modells).

2.3 Begriffe aus der digitalen Entwicklung

2.3.1 Digitales Werkzeug

Neither the naked hand nor the understanding left to itself can effect much. It is by instruments and aids that work is done.

— Francis Bacon (1960, S. 39), zitiert nach BABER (2003, S. 1)

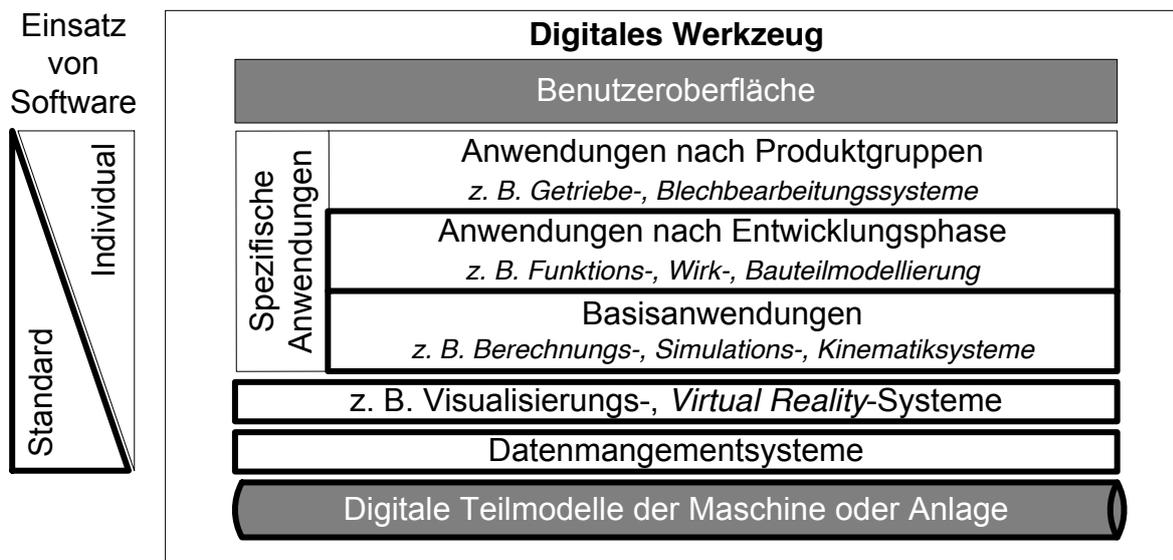
Francis Bacon zeichnet die Relevanz von Instrumentarien für Mensch und Gesellschaft auf, ohne deren Existenz eine Verrichtung von Arbeit nicht möglich wäre. Er argumentiert, dass die bloße Hand wie auch der bloße Verstand des Menschen nicht ausreichend sind, sondern es bedarf entsprechender Instrumente, Werkzeuge oder auch Hilfsmittel, die den Menschen bei der Arbeit unterstützen. Ähnlich zum lateinischen *Istrumentarium* hat sich in der deutschen Sprache der Begriff des *Werkzeuges* etabliert (GRIMM & GRIMM 2014), der ebenfalls in der Produktentwicklung wiederzufinden ist. So sprechen LINDEMANN (2009, S. 62) und PONN & LINDEMANN (2008, S. 20) davon, dass Werkzeuge die Anwendung von methodisch geführten Vorgehensweisen effektiver und effizienter unterstützen sollen. Sie

sehen die Bandbreite möglicher Werkzeuge von einfachen Hilfsmitteln (z. B. Checklisten) bis hin zu komplexer Software (z. B. Simulation).

Mit dem Einzug von Computern und Rechnern in die Produktentwicklung hat sich das Spektrum der Werkzeuge und Hilfsmittel um die Möglichkeiten erweitert, die die Informationstechnik (IT) bieten. Im Allgemeinen unterstützen die digitalen Werkzeuge den Produktlebenszyklus von Maschinen und Anlagen (MAURMAIER & DENCOVSKI 2010, S. 1, VAJNA 2009, S. 1, PAHL ET AL. 2006, S. 87) und im Speziellen die Aktivitäten und Phasen während des Entwicklungsprozesses (MAURMAIER & DENCOVSKI 2010, S. 15). Die Übertragung des Werkzeugbegriffs in die *digitale Welt* repräsentiert die „(...) softwaretechnische Implementierung einer Methode oder einer Kombination von mehreren Methoden (...)“ (BRACHT ET AL. 2011, S. 83). Darunter ist nicht ausschließlich die Umsetzung von isolierten Methoden zu verstehen (EHRENSPIEL 2009, S. 143), sondern alle Arten von methodisch gestützten Vorgehensweisen, so auch die der Handlungsprinzipien (vgl. Abschnitt 2.2). Diese anwendungsorientierte Sicht auf die digitalen Werkzeuge entspricht auch den Vorstellungen nach LINDEMANN (2009, S. 62), PONN & LINDEMANN (2008, S. 20) und EDER & HOSNEDL (2008, S. 377).

Der Begriff der digitalen Werkzeuge wird im Verlauf der Arbeit genutzt und bedarf einer Abgrenzung von zumeist synonym verwendeten Begrifflichkeiten. So wird in einem ähnlichen Bedeutungszusammenhang auch der Begriff *computergestützte Werkzeuge/Methoden* oder *IT-Werkzeuge* verwendet (vgl. BRACHT ET AL. 2011, S. 83; EHRENSPIEL 2009, S. 109; VAJNA 2009, S. 10; KIEFER 2007, S. 34; PAHL ET AL. 2006, S. 87; ABRAMOVICI 2005, S. 6). Der Zusatz des *Computers* oder der *Informationstechnik* stellt einen starken Bezug zur Hardware und zum jeweiligen Arbeitsplatz des Entwicklungsingenieurs her. Im Gegensatz dazu schließen die Begrifflichkeiten der *Software-Werkzeuge* oder *Software-Programme* die Hardware des Computers aus (vgl. PONN & LINDEMANN 2008, S. 20; DRATH 2010; MAURMAIER & DENCOVSKI 2010, S. 15; KÜMMEL 2000, S. 46–61). Im Terminus der CAD-Werkzeuge wird auf den Einsatz von Techniken entlang des Entwicklungsprozesses hingewiesen, allerdings ist der CAx-Begriff (Computer Aided x, mit x als Platzhalter für die spezifische digitale Technik) mehrheitlich von der mechanischen Entwicklung geprägt. Es bleiben vielfältige technische Weiterentwicklungen unberücksichtigt.

Um die Unterstützung der Entwicklung bestmöglich zu gewährleisten, lässt sich der Aufbau von digitalen Werkzeugen nach ABRAMOVICI (2013, S. 29) in die Schichten der *Anwendung*, der *Benutzeroberfläche* und der *Teilmodelle* unterteilen (Abbildung 2.3). Die Anwendung spiegelt eben genau o. g. Umsetzung von Vorgehensweisen, bzw. wesentliche Teile davon, wider. Mögliche Anwendungen sind Datenmanagementsysteme,



Legende:

— Fokus der Arbeit

Abbildung 2.3: Aufbau eines digitalen Werkzeuges in Anlehnung an ABRAMOVICI (2013, S. 29)

Basisanwendungen (z. B. Simulationssysteme) oder auch spezifische Anwendungen in den Entwicklungsphasen (z. B. Modellierungssysteme). Die Benutzeroberfläche stellt innerhalb eines digitalen Werkzeuges die Schnittstelle zu den Bedienern der Software her, d. h. den Ingenieurinnen und Ingenieuren im Entwicklungsprozess (vgl. KÜMMEL 2000, S. 46–61). Eine benutzergerechte Gestaltung der Hilfsmittel ist dabei unabdingbar für einen erfolgreichen Einsatz der Werkzeuge (EHRENSPIEL 2009, S. 109). Die digitalen Werkzeuge generieren und verarbeiten ebenfalls digitale Teilmodelle von den Maschinen und Anlagen, so beispielsweise mechanische Konstruktionszeichnungen (PONN & LINDEMANN 2008, S. 20). Diese stellen die Grundlage für einen Informationsaustausch zwischen den Werkzeugen dar. Die digitalen Werkzeuge in den Unternehmen des Maschinenbaus können in Individual- und Standard-Software unterschieden werden. Die Individual-Software setzt auf eine maßgeschneiderte Problemlösung durch kundenindividuelle Programmierungen (DIEHL 2013, S. 12). Bei einer Standard-Software handelt es sich hingegen um kommerziell erhältliche digitale Werkzeuge (MASAK 2006, S. 241–242).

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff des digitalen Werkzeuges verwendet und sich folglich an den ganzheitlichen Ansätzen der Digitalen Fabrik und der digitalen Produktentwicklung orientiert (vgl. SCHACK 2007; DOMBROWSKI & TIEDEMANN 2005; ZÄH ET AL. 2004). Ein digitales Werkzeug sei folgendermaßen definiert:

Ein digitales Werkzeug ist ein Hilfsmittel für Ingenieurinnen und Ingenieure bei der Entwicklungsarbeit. Es unterstützt bei der Umsetzung von methodisch gestützten Vorgehensweisen, indem ein digitales Werkzeug Funktionen und Techniken der IT entlang des Entwicklungsprozesses zur Verfügung stellt. Dazu ist es in die Schichten der Benutzeroberfläche, der Anwendung und der digitalen Teilmodelle gegliedert.

Im Besonderen wird die Anwendung von mechatronischen Handlungsprinzipien durch den Verbund der digitalen Werkzeuge, d. h. der digitalen Werkzeuglandschaft, untersucht. Es werden Soll-Anforderungen aus den Sichten des Prozesses, der Funktion und der Information gestellt (vgl. Abschnitt 4.2). Der Fokus der Arbeit wird vorwiegend auf Standard-Werkzeugen liegen, d. h. Software-Systemen, die kommerziell von Software-Herstellern angeboten werden und nicht wie Individual-Werkzeuge kundenspezifisch programmiert werden müssen (Abbildung 2.3).

2.3.2 Digitale Werkzeuglandschaft

Die Bezeichnung *Landschaft* ist als ein vielfach verwendetes sowie definiertes Konzept aufzufassen (HOKEMA 2009, S. 243). Es zeigen sich in den Bereichen der Geografie, der Landschaftsplanung und der Landschaftsarchitektur unterschiedliche Begriffsverständnisse. In der Geografie wird die Landschaft als ein „(...) physiognomisch erfassbarer Ausschnitt der Erdoberfläche definiert, der durch das charakteristische Zusammenwirken der Geofaktoren (Relief, Boden, Klima, Wasserhaushalt, Pflanzen- und Tierwelt) geprägt (...)“ (BREUSTE & KEIDEL 2008, S. 279) ist. Die Landschaftsplanung hingegen definiert den Begriff Landschaft als ein Gebiet, das von Menschen wahrgenommen wird und dessen Beschaffenheit als Ergebnis der Wechselwirkung von natürlichen und menschlichen Faktoren zu verstehen ist (MARSCHALL & WERK 2007, S. 720). Es wird dabei eine Landschaft nur als eine solche verstanden, wenn eine Wirkpaarung zwischen Mensch und der Natur auftritt. SIEFERLE (1997) diskutiert den kulturellen Einfluss in der Landschaftsarchitektur. Es werden dabei drei Phasen des kulturellen Einflusses unterschieden: Die Naturlandschaft ist vom Menschen nahezu unbeeinflusst. Die Agrikulturlandschaft ist durch Nutzpflanzenanbau und Industrialisierung geprägt. Die totale Landschaft verdankt ihre Entstehung einem aktiven gestalterischen Entwurf seitens eines Landschaftsarchitekten.

Der Landschaftsbegriff wird auch in Ansätzen in der digitalen Produktentwicklung genutzt. Bezogen auf den Lebenszyklus einer Produktionsanlage (VDI 2010, Blatt 4) verstehen DRATH ET AL. (2011, S. 451–453) eine DWL als einen Nutzungsraum verschiedener

digitaler Werkzeuge, die Tätigkeiten im Prozess unterstützen. Bereits in der Erläuterung von DWL wird in *heterogene* und *homogene* Landschaften anhand des Datenaustauschs unterteilt. Die DWL eines Unternehmens beinhalten aufgrund des großen Funktionsumfangs verschiedene Systeme wie beispielsweise CAX-Systeme, die integriert und zusammenarbeiten müssen (VDI 2002, S.19–23). Im Hinblick auf die Verbindungen der digitalen Werkzeuge entlang des Lebenszyklusses einer Maschine oder Anlage zu einer Werkzeuglandschaften sei darauf verwiesen, dass „(...) die Daten und Informationen zwischen (...den...) Werkzeugen elektronisch austauschbar (...sein müssen...), um menschliche Fehler bei der Übertragung zu vermeiden (...)“ (VDI 2010, Blatt 4, S. 4). Unter Berücksichtigung der Durchgängigkeit von Informationen wird auch die Forderung nach Interoperabilität zwischen den digitalen Werkzeugen laut, da die Konsistenz durch einen möglichst computergestützten, systematischen und wiederholbaren Informationsaustausch hergestellt werden soll (DRATH ET AL. 2011, S. 452). Eine analoge Auffassung gegenüber digitalen Werkzeuglandschaften findet sich auch in FOEHR ET AL. (2013, S. 696), RICHTER (2013) und LENTES & EICHERT (1999).

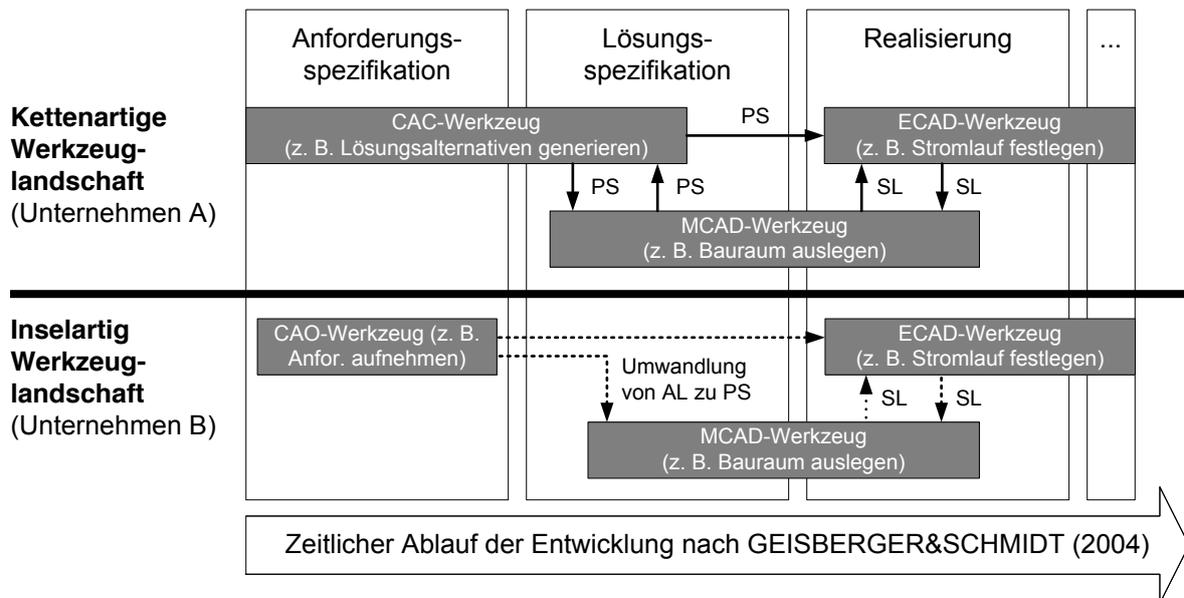
Das Verständnis aus der Geografie und Architektur erfasst Landschaften systemisch und begrenzt diese räumlich. Für die Beschreibung von digitalen Werkzeuglandschaften kann eine Bildung von Analogien hilfreich sein. Auch die Ansätze aus der digitalen Produktentwicklung orientieren sich an der Zusammenarbeit der Systeme, stellen dabei die Verschiedenartigkeit und Vielfalt der digitalen Techniken und den elektronischen Austausch als maßgeblich heraus. Das legt den Schluss nahe, dass eine Analogie zur Geografie als berechtigt angesehen und an die Vorüberlegungen aus der Produktentwicklung problemlos angeknüpft werden kann. In Deutschland wird beispielsweise die Kategorie *Waldlandschaften* nach dem prozentualen Waldanteil in Ausprägungen unterschieden (BN 2014). Für eine DWL kann eine Analogie in der Form geschaffen werden, dass beispielsweise der Waldanteil den Einsatz von digitalen Werkzeugen im Entwicklungsprozess verkörpert, wobei die Art des Waldes (Laub-, Nadel- o. Mischwald) eine der Techniken der Werkzeuge, wie Mechanical Computer Aided Design (MCAD) repräsentiert. Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen bietet sich folgende Definition an:

Eine digitale Werkzeuglandschaft bildet den Verbund der digitalen Werkzeuge und deren Informationsflüsse untereinander entlang des Entwicklungsprozesses von Maschinen und Anlagen in der Branche des Maschinenbaus.

Die Werkzeuglandschaft ist dabei als ein digitales Pendant zum Entwicklungsprozess zu verstehen (Abbildung 2.4). So unterstützen die enthaltenen Werkzeuge die Phasen und Aktivitäten einer Entwicklung und stellen in diesem Zusammenhang den Anwendern

2.3 Begriffe aus der digitalen Entwicklung

Funktionen und Techniken zur Verfügung, die für eine effektive Bearbeitung der Aufgaben notwendig sind. In der Phase des Anforderungsmanagements werden beispielsweise Werkzeuge eingesetzt, die die Technik des Computer Aided Conceptioning (CAC) und, in der Phase der Lösungsspezifikation, die Technik des MCAD den Ingenieurinnen und Ingenieuren für eine erfolgreiche Bewältigung der täglichen Arbeit bereitstellen.



Legende:

Informationsfluss
 —> IT-unterstützt
> manuell

Teilmodell
 AL – Anforderungsliste
 PS – Prinzipskizze
 SL – Stückliste

Digitale Technik
 CAC – Computer Aided Conceptioning
 CAO – Computer Aided Office
 E/MCAD – Electrical/Mechanical CAD

Abbildung 2.4: Kettenartige und inselartige Ausprägung einer digitalen Werkzeuglandschaft (Beispiele aus Unternehmen des Maschinenbaus)

Die Digitalisierung des Entwicklungsprozesses bildet sich dabei aus dem Verbund der Werkzeuge. Maßgeblich dabei ist zum einen der Grad der Unterstützung des Entwicklungsprozesses und zum anderen die Kommunikation zwischen den Werkzeugen. Für die Unterstützung der Entwicklung stellt sich die Frage, ob die Werkzeuglandschaft die notwendigen Funktionen und Techniken in geeigneter Form für die Anwender zur Verfügung stellen. Für die Kommunikation hingegen sind die Informationsflüsse zwischen den Werkzeugen entscheidend. Infolgedessen können Ausgangsgrößen eines digitalen Werkzeuges gleichermaßen eine Eingangsgröße eines weiteren digitalen Werkzeuges darstellen. So kann beispielsweise ein CAC-Werkzeug im Ergebnis eine Prinzipskizze generieren, die als Eingangsinformation für ein MCAD-Werkzeug verwendet wird.

Für die Arbeit wurden zwei Unternehmen des Maschinenbaus analysiert und deren DWL verglichen. Im Ergebnis ist erkennbar (Abbildung 2.4), dass die DWL von Unternehmen A

kettenartig und die von Unternehmen B inselartig ausgeprägt sind. Eine kettenartige Landschaft, auch genannt digitale Werkzeugkette (FOEHR ET AL. 2013, S. 696; DRATH ET AL. 2011, S. 451–460), zeichnet sich durch eine hohe IT-unterstützte Vernetzung der Informationen aus. So ist u. a. der bidirektionale Informationsfluss von Prinzipskizzen zwischen dem CAC- und dem MCAD-Werkzeug durch Konvertierungen oder eine gemeinsame Datenbank sichergestellt. Im Vergleich dazu ist die Landschaft in Unternehmen B inselartig, d. h. die Informationsflüsse müssen durch manuelle Aufwände und Überträge durch den Anwender erfolgen. Die Prinzipskizzen werden beispielsweise auf Basis der Anforderungen aus dem Computer Aided Office (CAO)-Werkzeug erstellt. Die Ingenieurinnen und Ingenieure nehmen darauf hin manuelle Eingaben im MCAD-Werkzeug vor. Aufgrund des Einsatzes von sowohl inselartigen als auch kettenartigen Landschaften in der Praxis müssen beide Ausprägungen auch in der Arbeit erfasst werden können. Dies bedeutet, dass manuelle Überträge durch den Anwender ebenso zu berücksichtigen sind wie IT-gestützte Informationsflüsse zwischen den Werkzeugen. Eine weiterführende Einordnung und Diskussion der DWL im Maschinenbau wird in Kapitel 3.3 vorgenommen.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Übersicht

Der Stand der Wissenschaft und Technik wird anhand der Forschungsfragen auf problemrelevante Themengebiete eingegrenzt. Für die Ergründung von FF 1 und 2 ist es notwendig, mechatronische Entwicklungsprozesse hinsichtlich des Einsatzes und der Anwendung der Informations- und Kommunikationstechnologien zu untersuchen. Ergänzend sind die in den Entwicklungsabteilungen vorhandenen DWL auf die Unterstützung einer integrativ-mechatronischen Vorgehensweise zu prüfen. Zusätzlich müssen zur Betrachtung von FF 2 methodische Ansätze ausgeführt werden, die eine Anpassung der Vorgehensweisen an die Entwicklungssituation bezwecken. Für die Beantwortung von FF 3 und 4 müssen Verfahren zur Bewertung und Gestaltung von DWL aufgezeigt und beurteilt werden. Im Folgenden seien die problemrelevanten Themengebiete vorgestellt und der Bezug zu den Forschungsfragen im Detail erläutert (Abbildung 3.1).

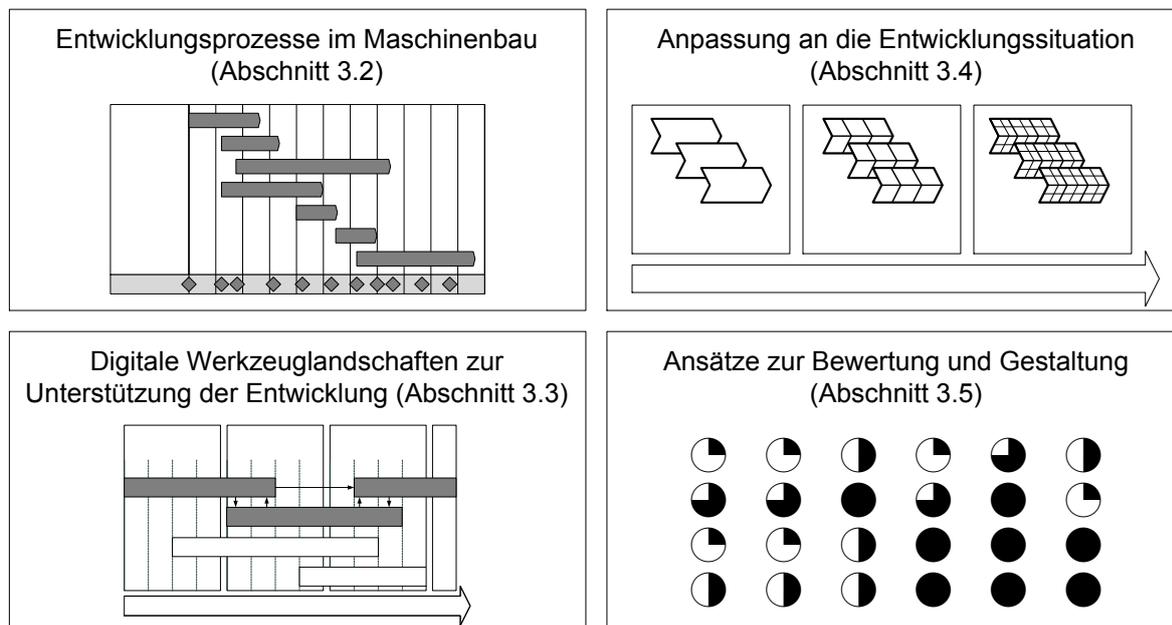
Entwicklungsprozesse im Maschinenbau (Abschnitt 3.2):

Um einen Soll-Zustand unter den Gesichtspunkten der Mechatronik zu formulieren (vgl. FF 1), wird das Umfeld der digitalen Werkzeuglandschaften untersucht. Dazu werden die Besonderheiten der Branche des Maschinenbaus herausgestellt und für eine Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten in der Methodik motiviert (vgl. FF 2). Die Einordnung von digitalen Werkzeuglandschaften in den Entwicklungsprozess trägt zur Festlegung des Bewertungs- und Gestaltungsobjektes bei. Anschließend werden mechatronische Vorgehensmodelle vorgestellt, die eine Soll-Vorstellung der Mechatronik aus Sicht des Prozesses repräsentieren. Die Modelle werden hinsichtlich der Integration von Merkmalen der Informations- und Kommunikationstechnik untersucht und als Orientierung für eine Ableitung eines idealen Soll-Zustandes für DWL verwendet.

Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung (Abschnitt 3.3):

Das Themengebiet schafft ein Verständnis für die Struktur, die enthaltenen Elemente und Abhängigkeiten innerhalb der DWL. Die Dimensionen und mögliche Ausprägungen des Bewertungs- und Gestaltungsobjektes können somit festgehalten werden (vgl. FF 1). Neben der Motivation für einen verstärkten Einsatz von digitalen Technologien in der

3 Stand der Wissenschaft und Technik



Abbildungen: schematisch und in den Abschnitt 3.2/3.3/3.4/3.5 erklärt

Abbildung 3.1: Problemrelevante Themengebiete

Branche des Maschinenbaus werden auch bestehende Soll-Zustände in der digitalen Entwicklung, sogenannte Referenzmodelle, aus angrenzenden Fachgebieten vorgestellt. Für die Entwicklung der Methodik kann sich an den Referenzmodellen angelehnt und eine Übertragung in den Maschinenbau diskutiert werden (vgl. FF 1).

Anpassung an die Entwicklungssituation (Abschnitt 3.4):

Die Besonderheiten der KMU in der Branche des Maschinenbaus spiegeln sich in der Entwicklung der Maschinen und Anlagen wider (vgl. FF 2). Es werden Möglichkeiten untersucht, inwiefern die spezifische Situation, die in der Entwicklung von Maschinen oder Anlagen auftritt, erfasst und in die Methodik der Arbeit aufgenommen werden kann. Da bisher keine Ansätze zur Anpassung von DWL vorhanden sind, wird sich maßgeblich an bestehenden Konzepten zur Anpassung von Vorgehensweisen orientiert. Es wird ebenfalls argumentiert, inwiefern eine Überführung in die digitale Entwicklung konkrete Aussagen für eine Bewertung und Gestaltung zu liefern imstande ist.

Ansätze zur Bewertung und Gestaltung (Abschnitt 3.5):

Im Themengebiet werden bestehende Verfahren zur Bewertung und Gestaltung von Informationssystemen beurteilt. Im Vergleich zu den vorangegangenen Themengebieten werden an dieser Stelle quantitative Anforderungsfelder aufgestellt. Da bisher keine geeignete Methodik für DWL vorhanden ist, werden zum einen Ansätze aus der Informatik auf eine mögliche Übertragung in den Maschinenbau geprüft und zum anderen beste-

hende Verfahren in der Branche des Maschinenbaus mit dem Fokus der Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeugen der Mechatronik untersucht (vgl. FF 3 und 4).

3.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau

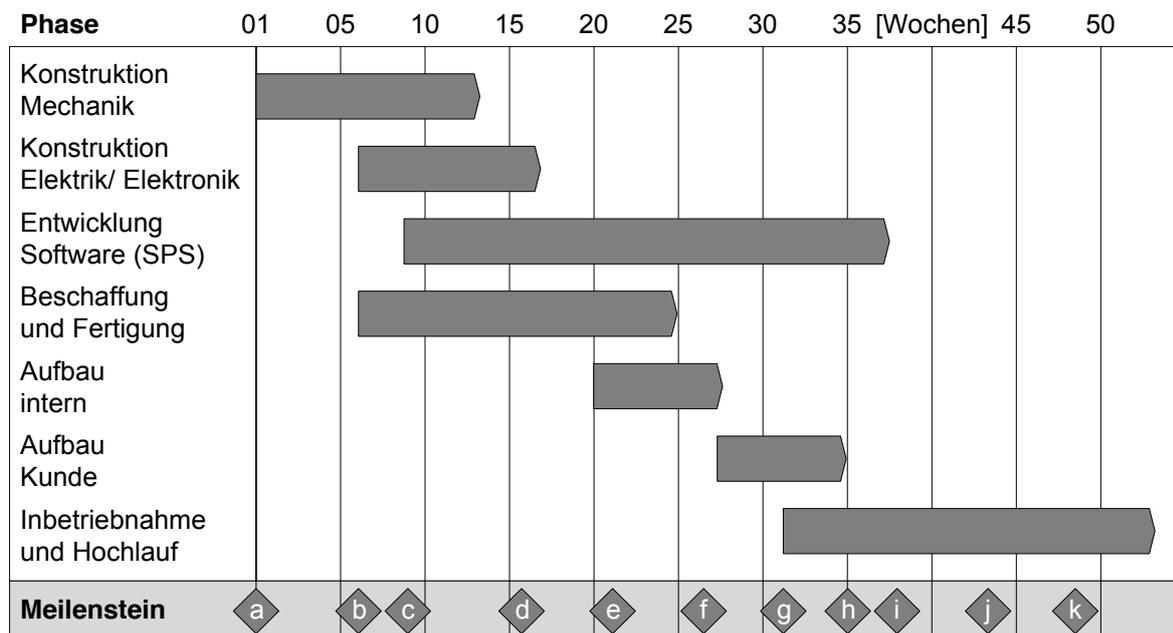
3.2.1 Besonderheiten des deutschen Maschinenbaus

Der Maschinenbau wird gemäß GNOSS (2008, S. 96 f.) als eigenständiger Wirtschaftszweig aufgeführt. Demnach lassen sich Abschnitte zuordnen, die wiederum in den Sektoren Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, produzierendes Gewerbe und Dienstleistungen eingegliedert werden. Der Maschinenbau wird dem Abschnitt des verarbeitenden Gewerbes zugeordnet, welches wiederum als Teil des produzierenden Gewerbes angesehen werden kann (HAGENKORT-RIEGER 2012, S. 504). Die Klassifikation gemäß GNOSS (2008) dient dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) als Grundlage für die Definition des *Maschinenbaus* (HAGENKORT-RIEGER 2012, S. 504). Zusätzlich berücksichtigt der VDMA Serviceleistungen wie Installation, Reparatur und Instandhaltung. Hierzu zählt beispielsweise die Montage von Maschinen und Anlagen zur Steuerung von industriellen Vorgängen. Insgesamt ergeben sich 38 Fachzweige, aus denen sich der Maschinenbau zusammensetzt (HAGENKORT-RIEGER 2012, S. 86).

Zur Charakterisierung des Maschinenbaus wurden im Rahmen der Arbeit führende Unternehmen des Maschinenbaus befragt. Im Ergebnis sind typische Phasen und Meilensteine festgehalten (Abbildung 3.2), die von der ersten Konzeption bis zur Inbetriebnahme beim Kunden durchlaufen werden. Trotz eines allgemeinen, sequenziellen Vorgehens in der Entwicklung spiegelt sich der fortwährende Wettbewerbsdruck zur Verkürzung der Entwicklungszeiten in der zunehmenden Parallelisierung und Verzahnung der Tätigkeiten (z. B. Mechanik- und Elektrokonstruktion) wider. Ein durchschnittlicher Entwicklungsprozess beinhaltet vielfältige Meilensteine (z. B. Konstruktionsfreigabe der Mechanik) und erstreckt sich über etwa ein Jahr, wobei die Dauer der einzelnen Phasen, in Abhängigkeit von der Komplexität der Montageanlage, variiert. Für eine ausführliche Darlegung der Ergebnisse sei auf DRESCHER ET AL. (2013a) verwiesen.

Neben dem zunehmenden Zwang einer Verkürzung der Entwicklungszeiten, ergeben sich Besonderheiten in den Entwicklungsabteilungen, welche den Maschinenbau von anderen Branchen maßgeblich unterscheidet und ein herausforderndes Umfeld für die DWL bildet:

3 Stand der Wissenschaft und Technik



Legende:

- a – Freigabe Mechanik
- b – Freigabe Elektrik
- c – Fertigungsfreigabe
- d – Prüfung Software
- e – Abnahme Software
- f – Flächenfreigabe
- g – Montageende
- h – Sicherheitstests
- i – Start der Produktion
- j – Abnahme
- k – Automatik-Betrieb

Abbildung 3.2: Typische Entwicklungsphasen und -meilensteine im Maschinenbau in Anlehnung an DRESCHER ET AL. (2013a)

- *Hohe Komplexität:*

Die Komplexität in technischen Entwicklungsprozessen nimmt durch die verstärkte Integration von Elektronik- und Software-Komponenten zu (GAUSEMEIER 2012, S. 4–5; MAUDERER 2011). Die Vielzahl und die Verschiedenartigkeit an Elementen und Abhängigkeiten und der hohe Grad an technischen Neuheiten in den Maschinen und Anlagen führen unweigerlich zu einem komplexen Entwicklungsprozess (BRUNS 2013).

- *Verknüpfung der Disziplinen:*

Die Wirkabhängigkeiten zwischen den Komponenten und Modulen von mechatronischen Maschinen und Anlagen sind eng miteinander verwoben, sodass eine isolierte Entwicklung von z. B. der Elektronik/Elektrik nicht möglich ist (SIMON 2006, S. 15). Da die Bündelung von Kompetenzen zur Entwicklung der hochkomplexen Systeme in einer Person auszuschließen ist, wird eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Ingenieurinnen und Ingenieure, einhergehend mit dem Abbau „(...) geistiger Mauern (...)“ (EHRENSPIEL 2009, S. 3) zwischen den Fächern unabdingbar (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 16; ABELE & REINHART 2011).

- *Kundenspezifische Adaption:*
Die steigende Komplexität der Anforderungen an mechatronische Maschinen und Anlagen (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 16) zeigt sich auch in dem hohen Grad der kundenspezifischen Entwicklung, wobei die Zusammenarbeit mit dem Maschinenanwender einen besonderen Stellenwert einnimmt. Neben den Universalmaschinen sind oftmals kundenspezifische Anpassungen gefordert, wie beispielsweise werkstückspezifische Spannsysteme oder anlagenspezifische Fördersysteme (SIMON 2006, S. 15).
- *Zunahme von Änderungseinflüssen:*
Die hohe Komplexität, die Verknüpfung der Disziplinen und die kundenspezifischen Adaptionen bewirken einen Wandel von einer Ablauf- und Matrixorganisation zu einer agilen, flexiblen und kooperativen Unternehmensstruktur. Entwicklungsabteilungen des Maschinenbaus sind gezwungen, zeitnah auf Änderungen während der Entwicklung zu reagieren bzw. diese antizipativ zu berücksichtigen (vgl. DRESCHER ET AL. 2013a).
- *Bedeutung der Funktionsvalidierung:*
Die Entwicklung von Maschinen und Anlagen ist aufgrund der Komplexität mechatronischer Systeme test- und prüfintensiv, wobei die Validierung durch den Einsatz von Prototypen von kritischer Bedeutung ist. Der Prototypenbau erhöht die Qualität der Maschinen, jedoch verlängert diese die Konstruktion um einige Wochen bis Monate und verursacht zusätzliche Entwicklungskosten. (SIMON 2006, S. 16)

Die Klassifikation und die Anzahl der KMU im Branchenprofil lassen erkennen, dass eine universelle und generelle Bewertung und Gestaltung von DWL nicht sinnvoll ist. Vielmehr sind in der Methodik die spezifischen Gegebenheiten eines jeweiligen Unternehmens zu berücksichtigen. So müssen Leistungskriterien für die DWL gefunden werden, welche zum einen die o. g. Besonderheiten aufgreifen (z. B. die kundenspezifischen Adaptionen) und zum anderen eine praxistaugliche Anpassung an die Entwicklungssituation der KMU zulassen. Zudem erfordern die Komplexität der Maschinen und die Verknüpfung der Disziplinen es, relevante Anspruchsgruppen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und der Informatik in das Vorgehen zur Bewertung und Gestaltung von DWL einzubeziehen. Auch können digitale Werkzeuge bereits vor dem Aufbau der Maschinen zur Funktionsvalidierung beitragen. Die hierfür geeigneten IT-Funktionen und digitalen Techniken müssen in der Methodik berücksichtigt werden. Ebenfalls ist die Integration von zusätzlichen Werkzeugen in bestehende Landschaften zu beachten. Neben den Herausforderungen der Branche des Maschinenbaus ermöglicht der Entwicklungsprozess die Einordnung der DWL und stellt in diesem Zusammenhang weitere Anforderungen an die Methodik.

3.2.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau

„Wer die Prozesse in seinem Unternehmen nicht beherrscht, beherrscht gar nichts in seinem Unternehmen.“ (JURAN 1989, S. 2)

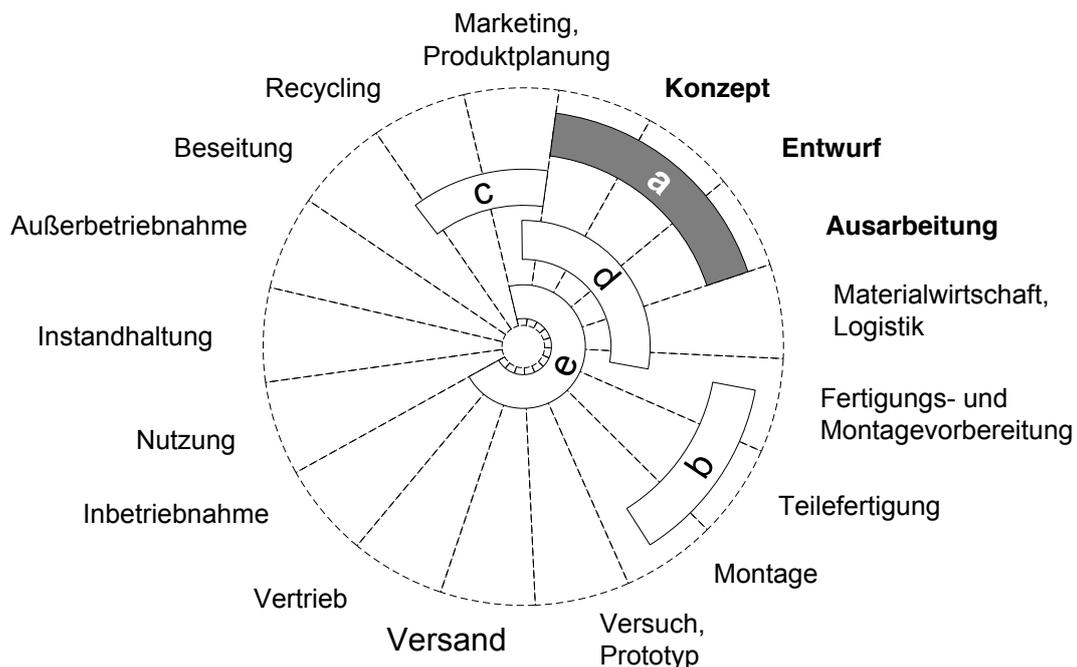
JURAN (1989) stellt mit seiner Behauptung die Relevanz von Prozessen in Unternehmen heraus. Als ein bekannter japanischer Vordenker vieler Managementlehren zeigt er, dass Prozesse verstanden und beherrscht werden müssen. Die Besonderheiten des Maschinenbaus spiegeln sich auch in den Prozessen wider. So gilt der Entwicklungsprozess als zentrales Umfeld und legt die wesentlichen Orientierungsgrößen für die digitalen Werkzeuglandschaften fest. Die digitalen Werkzeuge müssen dazu geeignete Methoden, Techniken und Funktionen bereitstellen (ZÄH 2006, S. 67). Aus diesen Gründen werden im Folgenden die Entwicklungsprozesse in der Branche des Maschinenbaus thematisiert, der Wesenskern einer technischen Problemlösung herausgestellt und eine Erläuterung sowie eine Einordnung der Entwicklungsphasen in den Produktlebenslauf vorgenommen.

Ein Prozess repräsentiert grundlegend jede Tätigkeit oder jeden Satz von Tätigkeiten, die/der Ressourcen verwendet, um Eingaben in Ergebnisse umzuwandeln (DIN 2005, S. 8). Wesentlich an dieser Betrachtungsweise ist, dass ein Prozess aus einer oder mehreren Tätigkeiten besteht, die materielle und immaterielle Güter, zusammengefasst als Ressourcen, nutzt bzw. nutzen (DIN 2005, S. 8). Auch wird in diesem Zusammenhang der Begriff der Aktivitäten anstatt desjenigen der Tätigkeiten verwendet und das Zusammenwirken der Faktoren Mensch, Information und Sachmittel in den Mittelpunkt gestellt. Eine ähnliche Auffassung vertritt auch REINHART (1996, S. 17), der ergänzend den systematischen Ablauf von Prozessen zur Verwirklichung von Zielen hervorhebt.

PORTER (1986, S. 14) nimmt zusätzlich eine Unterteilung in primäre und unterstützende Aktivitäten vor, die sich dadurch unterscheiden, dass erstere einen direkten Beitrag zum Kundennutzen leisten, letztere hingegen die primären Aktivitäten unterstützen. Ein ähnlicher Gedanken findet in einer aggregierten Form in den Unternehmensprozessen Berücksichtigung, die in die drei Prozesstypen Management-, Geschäfts- und Unterstützungsprozesse taxonomiert werden können (RÜEGG-STÜRM 2005, S. 111). Die Management-Prozesse fassen demnach die Aktivitäten zusammen, die einer Gestaltung oder einer Lenkung einer zweckorientierten soziotechnischen Organisation dienen (vgl. ULRICH ET AL. 1984). Während die Geschäftsprozesse marktbezogen und unmittelbar an die Stiftung von Kundennutzen ausgerichtet sind, stellen die Unterstützungsprozesse die Infrastruktur bzw. interne Dienstleistung zur effektiven und effizienten Umsetzung der Geschäftsprozesse dar (RÜEGG-STÜRM 2005, S. 111).

3.2 Entwicklungsprozesse im Maschinenbau

Ein Geschäftsprozess ist dadurch gekennzeichnet, dass dieser organisatorische, funktionale oder personelle Grenzen überschreitet (PFEIFER & SCHMITT 2014, S. 69). Ein Beispiel für einen solchen Prozess ist der Entwicklungsprozess (EHRENSPIEL 2009, S. 158), der an der Schnittstelle zur Produktplanung, nach Festlegung der Parameter und Konfiguration des Produktes, beginnt. Die Entwicklung ist ein Teil der Produktdefinition und Produkterstellung, wobei sie der Produktion zeitlich vorgelagert ist (Abbildung 3.3).



Legende:

a Entwicklung (Fokus der Arbeit)	c Produktplanung
b Produktion	d Produktdefinition
	e Produkterstellung

Abbildung 3.3: Lebenslauf eines Produktes in Anlehnung an EHRENSPIEL (2009, S. 158)

Dem Entwicklungsprozess liegt ein allgemeiner Lösungsprozess zugrunde, den PAHL ET AL. (2006) in einer Art und Weise systematisieren, wodurch ein grundlegendes Verständnis möglich ist. Orientiert an den Gedanken von PENNY (1970) und KRICK (1965) zeigen sie auf, dass zur Lösung einer Aufgabe eine Konfrontation, d. h. eine Gegenüberstellung von Problemen und bekannten oder nicht bekannten Realisierungsmöglichkeiten stattfindet (PULM 2004, S. 77; DÖRNER 1998). Die Information über die Aufgabenstellung, die Rahmenbedingungen und die möglichen Lösungsvarianten schwächt im Allgemeinen die Konfrontation und erhöht die Bereitschaft zur Lösungsfindung. Letztlich werden wesentliche Wissenskerne der Aufgabe abstrakt definiert, Ziele festgelegt und Bedingungen aufgenommen. Diese werden in der Kreation der eigentlichen Lösungsideen als

Voraussetzung benötigt. Mit Abschluss der schöpferischen Tätigkeit ist eine Beurteilung der Lösungsvarianten erforderlich, die mit einer Entscheidung abschließt. Ein ähnliche Auffassung ist ebenfalls erkennbar in ALBERS ET AL. (2012, S. 9), VDI (1999), VDI (1996a) und VDI (1993, S. 4).

Ausgehend von dem o. g. Lösungsprozess lässt sich der Entwicklungsprozess im Maschinenbau in drei maßgebliche Phasen unterteilen. In der Phase des *Konzeptes* ist die grundlegende und prinzipielle Lösung festgelegt, indem das wesentliche Problem abstrahiert und die Funktionsstrukturen sowie die Wirkprinzipien aufgestellt sind. Die Phase des *Entwurfs* legt die Baustruktur fest. Dabei werden vorläufige Entwürfe gestaltet und bewertet, bis eine Freigabe des Gesamtentwurfs die Phase abschließt. Die Phase der *Ausarbeitung* dient der herstellungstechnischen Festlegung der Lösung unter Berücksichtigung endgültiger Vorschriften (z. B. Werkstoffe der Einzelteile). Dieses grundlegende Phasenmodell fokussiert den mechanisch-gestalterischen Charakter des Entwicklungsprozesses im Maschinenbau, stammt originär von PAHL ET AL. (2006) und wird ebenfalls erwähnt in EHRENSPIEL (2009, S. 253–258), GAUSEMEIER ET AL. (2001, S. 216), VDI (1993, S. 14–16).

Die Untergliederung in primäre und unterstützende Aktivitäten kann für die Methodik übernommen werden. Dadurch ist es möglich, relevante Prozesse herauszustellen und den Fokus für die DWL zu konkretisieren. Die Ausführungen zum allgemeinen Lösungsprozess unterstreichen die besondere Rolle der Werkzeuge als ein Hilfsmittel zur Problemlösung und motivieren für die Arbeit. Die Phasen des Konzepts, des Entwurfs sowie der Ausarbeitung legen den Betrachtungsbereich für die Bewertung und Gestaltung der DWL fest. Mit der Zunahme von elektrischen/elektronischen und informationstechnischen Komponenten in den Maschinen und Anlagen können die Phasen um Ansätze ergänzt werden, die ein integriert-mechatronisches Vorgehen in den Entwicklungsprozessen zu fördern imstande sind. Im wissenschaftlichen Umfeld haben sich dazu sogenannte Vorgehensmodelle, d. h. Soll-Zustände für die Mechatronik etabliert.

3.2.3 Vorgehensmodelle

Ausgehend von der Bedeutung der Mechatronik (vgl. Abschnitt 1.1) sind in den letzten Jahren vielfältige Vorgehensmodelle entstanden. Diese sind zumeist präskriptiv, d. h. beschreiben ein aus praktischen Projekten nachgewiesenes *Soll*-Bild der Entwicklung (LINDEMANN 2009, S. 37). Die Modelle sind ebenfalls makroskopischer Natur (LINDEMANN 2009, S. 38). Mit anderen Worten: Es handelt sich um spezifische Vorgehensbeschreibungen, die anhand des Auflösungsgrades der Ebene des Gesamtprojektes zuzuordnen

sind. Sie stellen somit eine makrologische Betrachtung der Entwicklung dar, die im Vergleich zu den mechatronischen Handlungsprinzipien (vgl. Abschnitt 2.2) prozedural und schrittweise geprägt ist (BRAUN 2005, S. 31).

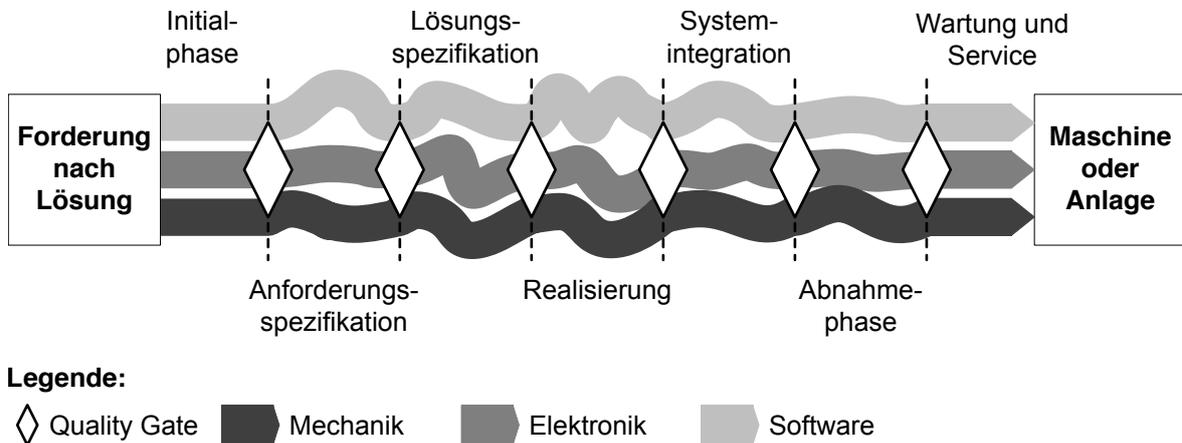


Abbildung 3.4: Quality-Gate-Modell in Anlehnung an HAMMERS (2012, S. 53) und GEISBERGER & SCHMIDT (2004, S. 9)

Ein weitverbreitetes Vorgehensmodell für den Maschinenbau ist das Quality-Gate-Modell nach GEISBERGER & SCHMIDT (2004). Das Modell erweitert den Entwicklungsprozess nach EHRENSPIEL (2009, S. 158) und hebt insgesamt sieben signifikante Projektphasen hervor (Abbildung 3.4). Beginnend von der ersten Produktidee bis zu der Abnahme, der Wartung und dem Service der Maschine oder Anlage werden die Phasen iterativ durchlaufen. Ebenfalls werden in allen Phasen „(...) neben den maschinenbaulichen Belangen auch die elektronischen, softwaretechnischen und regelungstechnischen Wirkungsweisen (...)“ (GAUSEMEIER ET AL. 2001, S. 216) betrachtet. Es herrscht Parallelität und weitgehend domänenspezifisches Vorgehen vor. Der Austausch zwischen den Disziplinen erfolgt zyklisch und mittels definierter Abstimmungspunkte, sogenannter Quality-Gates. Neben dem Quality-Gate-Modell sind weitere Vorgehensmodelle für eine mechatronische Entwicklung entstanden. Die Tabelle 3.1 stellt die untersuchten mechatronischen Vorgehensmodelle basierend auf GAUSEMEIER (2008, S. 6–15) zusammen und ergänzt diese um weitere, aktuelle Ansätze. Für weitere Einordnungen von Vorgehensmodellen sei auf KREHMER (2012, S. 6–28), LINDEMANN (2009, S. 37–50) und BRAUN (2005, S. 29) verwiesen.

Der Vergleich in Tabelle 3.1 verdeutlicht, dass aufgrund des Ursprungs der Modelle oder der anwendungsspezifischen Betrachtungsbereiche unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung des *Soll*-Zustandes für mechatronische Entwicklungsprozesse vorhanden sind. Die Herkunft der Modelle ist zumeist der integrierten Produktentwicklung oder –

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 3.1: Vorgehensmodelle zur Entwicklung von mechatronischen Systemen (Auszug basierend auf GAUSEMEIER (2008, S. 6–15) und erweitert um aktuelle Ansätze)

Ansatz	Wesentliche Merkmale
Integrierte Produktentwicklung nach ANDREASEN & HEIN (2000)	Die Entwicklung mechatronischer Systeme wird in die drei Ebenen „Problemlösungsprozess des Entwicklers“, die „Synthese des technischen Systems“ und die „ganzheitliche Produktentwicklung untergliedert.
Mechatronisches Spiralmodell nach CHAN & LEUNG (1996)	Das aus der Software-Entwicklung bekannte Spiralmodell wird auf die mechatronische Entwicklung übertragen. Im Besonderen werden Iterationen in der frühen Entwicklungsphase und die frühzeitige Validierung vorgeschlagen.
Zwölf-Schritte-Vorgehen nach ISERMANN (2008) und ISERMANN ET AL. (2002)	In dem Vorgehensmodell werden vor allem die technischen Aspekten der Prozesse betrachtet, wie beispielsweise die der Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten.
V-Modell nach (VDI 2004)	Der Ansatz übernimmt das aus der Software-Technik bekannte V-Modell und passt es an die Erfordernisse der Mechatronik an. Aufbauend auf dem V-Modell der Mechatronik sind vielfältige Derivate entstanden, z. B. das VI-Modell von HENSEL (2013).
Drei-Ebenen-Vorgehensmodell nach BENDER (2005)	Es wird eine Einteilung in System-, Subsystem und Komponentenebene der Entwicklungsaufgabe vorgenommen.
Integrative Entwicklung nach GAUSEMEIER & BIGL (2006)	Es wird ein Vorgehensmodell für die Entwicklung von mechanisch-elektronischen Modulen vorgestellt, wobei die Parallelisierung von Entwicklung und Fertigung herausgestellt wird.
Hardware/Software-Codesign nach TEICH & HAUBELT (2007) und TEICH (2012)	Die Integration in der Entwicklung wird insbesondere in den frühen Phasen mittels einer Systembeschreibung der Eigenschaften von Hardware und Software vorgeschlagen.
Modellbasiertes Systems Engineering nach EIGNER (2012a)	Das V-Modell wird um ein zentrales Entwicklungsmodell ergänzt, wobei die Modellbildung und Simulation einen wesentlichen Kern darstellen.
Agiles Vorgehen in der Entwicklung nach KLEIN & REINHART (2014)	Das Quality-Gate-Modell nach GEISBERGER & SCHMIDT (2004) wird um agile Elemente ergänzt (z. B. Scrum-Methode), wodurch Änderungsbedarfe während der Entwicklung erfasst werden können.

wegen des steigenden Anteils an Software-Funktionen – der Informatik zuzuordnen (z. B. V-Modell nach VDI 2004). Weiterhin ist der anwendungsspezifische Fokus im Vergleich erkennbar. Die Ansätze nach CHAN & LEUNG (1996) empfehlen die frühzeitige Validierung mit Hilfe von Iteration, während das Quality-Gate-Modell nach GEISBERGER & SCHMIDT (2004) einen ganzheitlichen Blickwinkel einnimmt, der die Modularisierung des Gesamtsystems entlang des Entwicklungsprozesses vorschlägt. In der Folge ist auch das Verständnis einer mechatronischen Entwicklung verschieden und keine Einheitlichkeit feststellbar. Für die Betrachtung der Mechatronik in der *digitalen Welt* kann nicht einer der Ansätze isoliert ausgewählt werden, sondern ist es notwendig, die mechatronischen Ansätze hinsichtlich Anwendbarkeit und Praktikabilität für einen Einsatz im Maschinenbau zu synthetisieren. Auch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die o. g. Vorgehensmodelle sowie die enthaltenen Methoden gleichermaßen einzusetzen sind. Aufgrund der verschiedenen Bedürfnisse der KMU ist vielmehr eine situationsspezifische Anpassung notwendig, die auch im Rahmen der Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften zu berücksichtigen ist.

Den untersuchten mechatronischen Vorgehensmodellen mangelt es an einer detaillierten Betrachtung der informationstechnischen Umsetzung und Gegebenheit in den Unternehmen des Maschinenbaus. Es werden die Architektur, die notwendigen Funktionen und der Informationsaustausch innerhalb einer digitalen Werkzeuglandschaft aus Sicht der Mechatronik kaum berücksichtigt. Initiale Ansätze zur Betrachtung der IT-Systeme sind in den Beschreibungen von GAUSEMEIER & BIGL (2006) und VDI (2004) z. T. erkennbar, jedoch ist eine detaillierte Betrachtung, unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungsfälle, der digitalen Werkzeuglandschaften (z. B. Verbesserung digitaler Werkzeuge) auch an dieser Stelle nicht vorzufinden.

Die Vorgehensmodelle sind aufgrund des makroskopischen Gedankens zumeist in Phasen und einzelne Aktivitäten untergliedert. Die Umsetzung mechatronischer Methoden durch ein einziges, monolithisches Werkzeug ist aufgrund des ganzheitlichen Charakters auszuschließen. Zwar sind Bestrebungen bei den Software-Herstellern erkennbar, die mehrere mechatronische Ansätze in ihren Lösungen vereinen, jedoch ist im Allgemeinen davon auszugehen, dass es mehr als eines einzelnen digitalen Werkzeuges bedarf, um die Aktivitäten einer mechatronischen Entwicklung anzuwenden.

Der makroskopische Charakter der mechatronischen Vorgehensmodelle ist ebenfalls nachteilig zur Betrachtung einer stufenweisen Einführung der Mechatronik in die Unternehmen des Maschinenbaus. Die Vorgehensmodelle geben oftmals keine Hinweise, wie eine Einführung vorgenommen werden soll. Zwar ist ein stufenweises Anpassen der Vorgehensmodelle möglich, diese sind allerdings oftmals starr, unflexibel und bedürfen

zusätzlicher Prüfungen in der Anwendung. Aus diesem Grund wird für die Arbeit eine reine makroskopische Betrachtung als nicht ausreichend erachtet, sondern bedarf es ergänzend einer flexiblen und modularen Sicht auf die Mechatronik. Es werden hierfür mechatronische Handlungsprinzipien zusammengestellt und in die Methodik integriert (vgl. Abschnitt 2.2).

Um den Herausforderungen der Mechatronik in den Entwicklungsprozessen zu begegnen, sind eine Vielzahl von Vorgehensmodellen entstanden. Die mangelnde Berücksichtigung der Risiken und Chancen von digitalen Technologien und die Vernachlässigung der Bedürfnisse der KMU in den Modellen motiviert für die Entwicklung der Methodik in der Arbeit. Im Ergebnis der Analysen kann festgehalten werden, dass sich im Allgemeinen an den mechatronischen Vorgehensmodellen orientiert, jedoch im Speziellen keine der Modelle ausgewählt werden kann. Letztlich bedarf es einer eigenständigen Systematisierung eines Soll-Zustandes für die DWL aus Sicht der Mechatronik.

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung

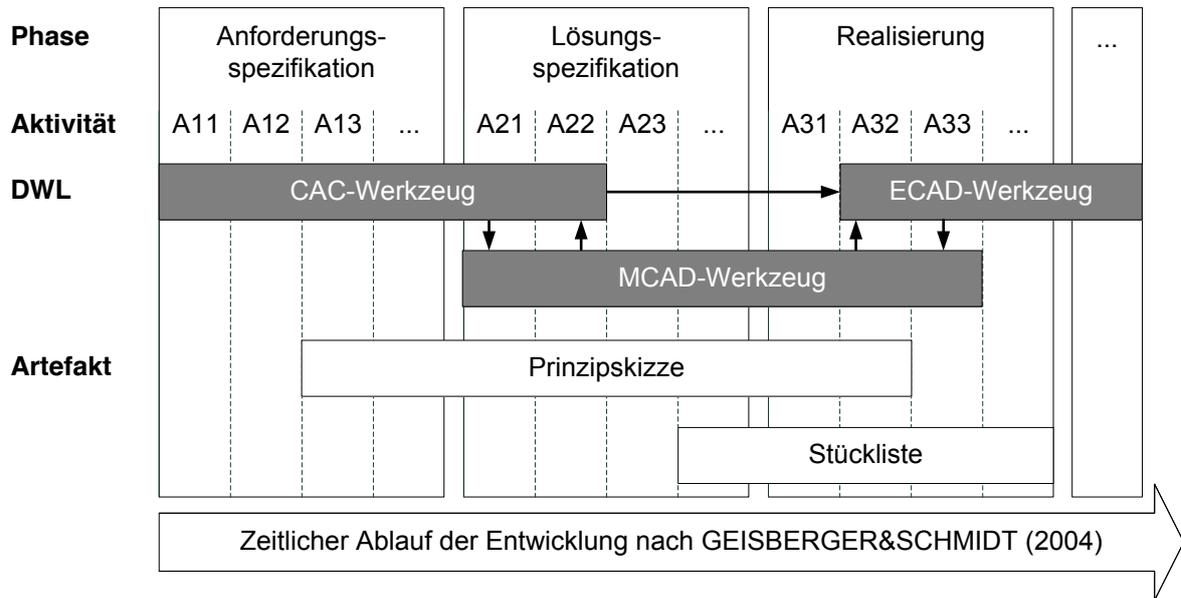
3.3.1 Einordnung in die Entwicklung

Um das Bewertungs- und Gestaltungsobjekt der Methodik zu konkretisieren, wird die Entwicklung in einem zeitlichen Ablauf betrachtet. Dazu wurde für die Arbeit die DWL eines Unternehmens des Maschinenbaus aufgenommen und in Anlehnung an die Vorstellungen zur Entwicklung nach FOEHR ET AL. (2013, S. 696) und TRISTL ET AL. (2013, S. 81–90) eingeordnet (Abbildung 3.5). Es kann in die Phasen sowie Aktivitäten des Prozesses, die DWL und die Artefakte unterschieden werden. Für die Methodik sind die Bestandteile der DWL und das Umfeld in der Entwicklung wie folgt zu berücksichtigen:

Phasen und Aktivitäten:

Die Entwicklungsprozesse bestehen aus Phasen und Aktivitäten, die, wie die makroskopischen Vorgehensmodelle, Vorgänge in der Entwicklung repräsentieren. Während eine zeitliche Gliederung durch die Phase möglich ist, stellen die Aktivitäten konkrete Aufgaben an die DWL. So wird beispielsweise in der Phase der Anforderungsspezifikation die Aktivität *Anforderung spezifizieren* durch das CAC-Werkzeug unterstützt. Zwischen Prozess und DWL ergibt sich eine Dualität, die ähnlich einem Schlüssel-Schloss-Prinzip aufgefasst werden kann. Nur die zum Entwicklungsprozess (Schloss) passende DWL

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung



Legende:

→ Informationsfluss
 DWL – Digitale Werkzeuglandschaft
 CAC – Computer Aided Conceptioning
 E/MCAD – Electrical/Mechanical Computer Aided Design

Abbildung 3.5: Einordnung der Werkzeuglandschaft in die Entwicklung (Auszug eines Beispiels aus dem Maschinenbau) in Anlehnung an FOEHR ET AL. (2013, S. 696) und TRISTL ET AL. (2013, S. 81–90)

(Schlüssel) vermag es, eine optimale Synergie herzustellen und die Entwicklung in Zeit, Kosten und Qualität positiv zu beeinflussen (KAPP & CONSTANTINESCU 2006, S. 11; HUMPERT 1995, S. 3). Für detaillierte Überlegungen zum Schlüssel-Schloss-Prinzip in der Mechatronik sei auf die Veröffentlichung DRESCHER ET AL. (2013b) verwiesen.

DWL:

Die digitalen Werkzeuge repräsentieren Lösungen für eine eng abgegrenzte Problemstellung oder einen Produktbereich (LINNER 1995, S. 53), sind meist abteilungsspezifisch (z. B. MCAD-Werkzeuge für die mechanische Konstruktionsabteilung) sowie unterstützen in diesem Rahmen eine oder mehrere Aktivitäten (z. B. Anforderung spezifizieren). Dabei stellen die Werkzeuge digitale Techniken (z. B. Technik des MCAD) und IT-Funktionen (z. B. Funktionen zur Spezifikation) den Aktivitäten zur Verfügung. Ein einzelnes Werkzeug deckt kaum einen kompletten Entwicklungsprozess ab, mit der Konsequenz, dass gezielte Informationsflüsse für die Zusammenarbeit der digitalen Werkzeuge unabdingbar sind (KIEFER 2007, S. 34). So stellt beispielsweise ein CAC-Werkzeug mechanische Prinzipskizzen zur Verfügung, die in einem MCAD-Werkzeug für weitere Detailkonstruktionen verwendet werden können (vgl. KÜMMEL 2000, S. 47).

Artefakte:

Trotz eines gemeinsamen mechatronischen Entwicklungsvorgehens zeigen sich in der Praxis Barrieren zwischen digitalen Werkzeugen, deren Ursprung in den zumeist heterogenen Datenformaten der Entwicklungsartefakte liegt (TRISTL ET AL. 2013, S. 84). Die Datenformate sind dabei mit spezifischen Begriffswelten versehen (BROY ET AL. 2010). Beispielsweise liegen die aus dem CAC-Werkzeug bereitgestellten Prinzipskizzen z. T. nicht in Formaten vor, die durch ein MCAD-Werkzeug übertragbar und nutzbar sind. Es herrschen manuelle Überträge im Gegensatz zu automatisierten Konvertierungen vor, die eine Durchgängigkeit behindern.

Für die Methodik können die digitalen Techniken und die IT-Funktionen für die Beschreibung der digitalen Werkzeuge genutzt werden. Auch sind die Informationsflüsse zwischen den Werkzeugen als ein Bestandteil der DWL in die Bewertung und Gestaltung einzubeziehen. Darüber hinaus bildet die DWL ein komplexes Abhängigkeitsgefüge zum Prozess und den Artefakten. Innerhalb der Methodik müssen die Einflüsse aus dem Prozess und den Artefakten berücksichtigt werden. Die Sichtweise des Prozesses ermöglicht es, die Belange der Mechatronik in die Beschreibung des Soll-Zustandes der DWL einfließen zu lassen. Die Sichtweise der Artefakte stellt eine inhaltsbezogene Komponente des Informationsflusses dar. Im Folgenden werden die Nutzenpotenziale durch den Einsatz von digitalen Werkzeugen (inkl. IT-Funktionen) im Entwicklungsprozess vorgestellt.

3.3.2 Nutzenpotenziale

Es ist feststellbar, dass der Einsatz von digitalen Werkzeugen zur Unterstützung der Entwicklung in heutigen Technologieunternehmen zum Stand der Technik zählt (EIGNER 2012b, S. 3; ABELE & REINHART 2011, S. 104; SCHLEIDT 2009, S. 34; VAJNA 2009, S. 443; ULRICH & WEIBEL 2007, S. 1; ABRAMOVICI 2005, S. 6). Als ein wichtiger Wettbewerbsfaktor (HERFS 2010, S. 12; GERNERT & AHREND 2002, S. 48–49) ist die Digitalisierung von Produkten und Produktionsmitteln eng mit der Produktivität der deutschen Wirtschaft verknüpft (SUCHOLD ET AL. 2009, S. 1). Die Effektivität und Effizienz in den Entwicklungsprozessen von Produktionssystemen kann maßgeblich gesteigert (KAPP & CONSTANTINESCU 2006, S. 11) und ein positiver Beitrag aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Unternehmen geleistet werden (BULLINGER ET AL. 2009, S. 258). Der Einsatz von digitalen Werkzeugen in Unternehmen des Maschinenbaus ermöglicht es, die Zeit von der ersten Idee bzw. dem Kundenauftrag bis zur Auslieferung des Produktionssystems zu verkürzen. Speziell drückt sich die positive Wirkung digitaler Werkzeuge aus, indem diese in folgenden Bereichen einen Nutzen bieten:

- *Beherrschung der Komplexität:*
Der Einsatz von Rechnern und Computern dient, neben der Lösung von Routineaufgaben, der Komplexitätsbeherrschung (BRACHT ET AL. 2011, S. 2). Die Entwicklerinnen und Entwickler können durch IT-Funktionen zur digitalen Modellerstellung und zum Suchen oder Strukturieren von Produktinformationen die Konstruktion von Maschinen und Anlagen unterstützen (MURPHY & SIMON 2001, S. 5; SPUR & KRAUSE 1997, S. 651–652). So kann die Entwurfsqualität durch die heutigen Technologien maßgeblich gesteigert werden (VAJNA 2009).
- *Simulative Absicherung:*
Ein frühzeitiger Erkenntnisgewinn durch die digitalen Werkzeuge kann durch IT-Funktionen zur Simulation und Animation sichergestellt werden (OPPELT ET AL. 2015, S. 18ff.; REINHART & STICH 2011; BRACHT ET AL. 2011, S. 1). Diese ermöglichen die zeitnahe Erstellung von Prototypen und eine Vermeidung von funktionalen und fertigungstechnischen Problemen wie beispielsweise in der Kinematiksimulation zur Absicherung räumlicher Restriktionen (VAJNA 2009).
- *Automatisierung von Abläufen:*
Die Automatisierung von Abläufen kann beispielsweise durch IT-Funktionen zur Ableitung von Dokumenten aus 3D-Produktmodellen (z. B. Montage- und Bedienungsanleitungen) unterstützt werden. Es werden Konsistenz und Vollständigkeit im Vergleich zu einer manuellen Erstellung sichergestellt (VAJNA 2009).
- *Unterstützung der Kommunikation:*
Die Kommunikation der beteiligten Ingenieurinnen und Ingenieure kann durch digitale Repräsentationsformen der Maschine oder Anlage gesteigert werden (GAUSEMEIER ET AL. 2001, S. 380). So können IT-Funktionen zur Verwaltung und zum Dokumentenmanagement von Entwicklungsprojekten den Austausch im Team unterstützen (VAJNA 2009).

Die o. g. Nutzenpotenziale motivieren im Allgemeinen für einen Einsatz von digitalen Werkzeugen in den Entwicklungsabteilungen und erleichtern somit die Einführung und Anwendung mechatronischer Vorgehensweisen, wie sie von etwaigen Vorgehensmodellen der Mechatronik als Ideal vorgeschlagen werden (vgl. Abschnitt 3.2). Für die Methodik im Speziellen müssen die Funktionen in den Soll-Zustand der DWL berücksichtigt werden. So kann beispielsweise die Einbindung der Funktionen zur Spezifikation oder zum Suchen von Produktinformationen durch geeignete digitale Werkzeuge bereitgestellt werden. Dazu ist es jedoch notwendig, die notwendigen IT-Funktionen passend zum Entwicklungsprozess der KMU auszuwählen. Für die Arbeit ist ein Detaillierungsgrad zu finden, der es

erlaubt, die Aktivitäten des Prozesses mit den IT-Funktionen der Werkzeuge zu verbinden. Der Soll-Zustand der DWL muss eine solch konkrete Zuordnung beinhalten. Für einen effektiven und einen effizienten Einsatz der Funktionen ist ebenfalls die im Unternehmen vorherrschende Entwicklungssituation zu berücksichtigen. Eine simple Übernahme der Funktionen, ohne die Erfordernisse der KMU des Maschinenbaus zu berücksichtigen, wird als nicht zielführend erachtet – ein Mangel ist dabei genauso wenig sinnvoll, wie ein übermäßiger Einsatz von Funktionen in der DWL (vgl. OTTOSSON 2004, S. 214).

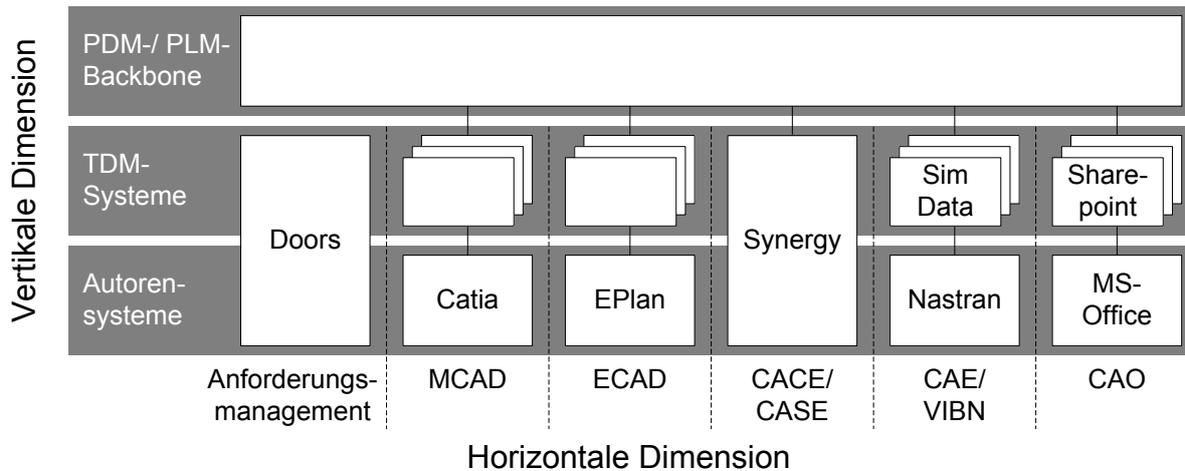
3.3.3 Architektur und Charakterisierung

Die betriebliche Architektur einer digitalen Werkzeuglandschaft kann in eine vertikale und horizontale Betrachtung untergliedert werden (Abbildung 3.6). Die vertikale Dimension ermöglicht es, Kategorien von digitalen Werkzeugen anhand der verwendeten Technik zu bilden, die sich nach Anwendung und grundlegender Zielstellung unterscheiden. So kann diese *landschaftliche Bebauung* in Autorensysteme, Team Data Management (TDM) und Product Data Management (PDM)/Product Lifecycle Management (PLM) unterschieden werden. Die Autorensysteme sind digitale Werkzeuge, um funktionale, logische, geometrische und technologische Produktinformationen zu erzeugen (EIGNER 2012b, S. 14; NYHUIS ET AL. 2009, S. 135–138; ABRAMOVICI 2005, S. 6). Oftmals als lokale PDM-Werkzeuge bezeichnet, handelt es sich bei der Technik des TDM um in erster Linie vom CAD-Anbietern realisierte Lösungen zur Verwaltung von Modellstrukturen und Konstruktionszeichnungen (EIGNER & STELZER 2013, S. 295; KRAUSE 2008, S. 19; DIETRICH & SCHIRRA 2006, S. 194). Während die Technik des TDM auf spezifische CAD-Werkzeughersteller beschränkt ist, ermöglichen die Techniken des PDM/PLM die Datenintegration unabhängig von System und Hersteller entlang des gesamten Entwicklungsprozesses (EIGNER & STELZER 2013, S. 43–44). Aufbauend auf der Übersicht zur Digitalen Fabrik von SCHACK (2007), werden die für die Arbeit als wesentlich erachteten digitalen Techniken in der Entwicklung im Folgenden vorgestellt und charakterisiert (alphabetische Reihenfolge):

Computer Aided Control Engineering (CACE):

Die digitale Technik des CACE unterstützt die Synthese, Analyse und Optimierung von Regelungs- und Steuerungssystemen (KÜMMEL 2000, S. 58). Auch ermöglichen diese Werkzeuge die Erstellung von Programmen für die speicherprogrammierbare Steuerung oder Prozessleitsysteme mit den dazugehörigen Anweisungslisten und Funktionsplänen (EIGNER & STELZER 2013, S. 293).

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung



Legende:

CACE – Computer Aided Control Engineering	MCAD – Mechanical Computer Aided Design
CAE – Computer Aided Engineering	PDM – Product Data Management
CAO – Computer Aided Office	PLM – Product Lifecycle Management
CASE – Computer Aided Software Engineering	TDM – Team Data Management
ECAD – Electrical Computer Aided Design	VIBN – Virtuelle Inbetriebnahme

Abbildung 3.6: Architektur von digitalen Werkzeuglandschaften mit industriellen Beispielen in Anlehnung an EIGNER & STELZER (2013, S. 43)

Computer Aided Office (CAO):

Unter der Technik des CAO werden Büroanwendungen verstanden, die zur Kommunikation, Verteilung und Verwaltung von Dokumenten mittels einfacher Editoren, Testverarbeitung, Tabellenkalkulation oder auch als E-Mail-Programm verwendet werden (ABRAMOVICI 2005, S. 6).

Computer Aided Software Engineering (CASE):

Zu der Technik des CASE zählen Programme, die die Analyse, Konzeption und Implementierung von Software ermöglichen. Es wird der Software-Lebenszyklus gesamtheitlich abgedeckt. (AUERHAMMER 2014, S. 33)

Computer Aided Engineering (CAE):

Die Technik des CAE wird genutzt, um das Verhalten von Bauteilen zu simulieren. Dazu zählt u. a. auch die Technik der Finite Elemente Methode, die zur Modellierung von Verformungen, Spannungen und Schwingungen genutzt wird (GAUSEMEIER ET AL. 2009, S. 379–382).

Electrical Computer Aided Design (ECAD):

Die Technik des ECAD ermöglicht die rechnerunterstützte Umsetzung von Schaltungen aus einem Stromlaufplan in ein Layout für die Hardware (KÜMMEL 2000, S. 50). Systemeigene Prüfroutinen und umfangreiche Analyse- und Simulationsmöglichkeiten,

3 Stand der Wissenschaft und Technik

wie beispielsweise elektromagnetische, thermische Analysen und Schaltungssimulation, stellen wesentliche Erweiterungen der Technik dar (BIRNBAUM 2004, S. 127).

Mechanical Computer Aided Design (MCAD):

Die Technik des MCAD repräsentiert die rechnerunterstützte Konstruktion von Einzelteilen und Baugruppen (vgl. MALETZ 2008, S. 25; KÜMMEL 2000, S. 49; LINNER 1995, S. 37). Es können geometrische, technologische und funktionale Eigenschaften der Produktionsmaschine definiert und um Materialien, Parameter, Bemaßungen und Toleranzen für die Fertigung ergänzt werden (EIGNER & STELZER 2013, S. 49; STARK ET AL. 2011). Oftmals werden zwei- und dreidimensionale Modelle, Zeichnungen und Stücklisten erstellt oder abgeleitet (SPUR & KRAUSE 1997, S. 13). Die Technik des MCAD basiert auf den grundlegenden Methoden, wie beispielsweise der Linien-, Flächen- oder Volumenmodellierung, sowie parametrischen und wissensbasierten Erweiterungen (STARK ET AL. 2011). Sie sind die Grundlage virtueller Prototypen, die neben gestalterischen auch strukturelle und lebenszyklusbezogene Informationen beinhalten (GAUSEMEIER 2000, S. 282).

Product Data Management (PDM):

Die Technik des *Produktdatenmanagements (PDM)* ermöglicht die Datenintegration im Entwicklungsprozess (EIGNER & STELZER 2013, S. 43–44). Es wird ein zentrales Produkt- oder Prozessmodell bereitgestellt, welches Inhalt, Konfiguration, Status (Freigabe/ Änderungen) und Version des Produktes verwaltet und verteilt (EIGNER & STELZER 2013, S. 34; EIGNER 2012b, S. 13; ANDERL & TRIPPNER 2000).

Product Lifecycle Management (PLM):

Die Technik des PLM stellen im Kern identische Funktionen bereit, jedoch erweitern sie den PDM-Ansatz auf den gesamten Lebenszyklus eines Produktes. EIGNER (2012b, S. 13) definiert auf dieser Grundlage die Aufgabe von PLM-Werkzeugen als „(...) das produktbezogene und unternehmensübergreifende Informationsmanagement (...mit dem Ziel der) Planung, Steuerung und Organisation der zur Erzeugung und ganzheitlichen Verwaltung aller Daten, Dokumente und Ressourcen erforderlichen Prozesse im gesamten Produktlebenszyklus (...)“. Im Rahmen der Ausbreitung über den gesamten Lebenszyklus ergaben sich auch zusätzliche Anwendungen, wie beispielsweise das Anforderungs-, Wartungs-, Service- und Ersatzteilmanagement (EIGNER 2012b, S. 17).

Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN):

Mit dem Ziel der frühzeitigen Simulation, Programmierung und Absicherung der Maschine oder Anlage beinhaltet die *virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)* die Kombination der Werkzeuge Ablaufsimulation, Hardware-in-the-Loop (Kopplung der realen Anlagensteuerung mit dem digitalen Anlagenmodell), Mechatronik- und Strukturmechaniksimulation,

3D-Prozesssimulation sowie *Virtual* und *Augmented Reality* (SCHACK 2007; ZÄH ET AL. 2004, S. 1–9).

Die aufgeführten digitalen Techniken, die innerhalb der Entwicklung von Maschinen und Anlagen angewandt werden, sind hochgradig spezialisiert und auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten. Einsatz und Integration von digitalen Techniken innerhalb der Entwicklung variieren entsprechend dem Unternehmen und der Branche (OTTOSON 2004, S. 214). Unter Berücksichtigung der Herausforderungen an die digitalen Werkzeuglandschaften (vgl. Abschnitt 1.2) ist zu erwarten, dass auch die Anzahl und Verschiedenartigkeit der digitalen Techniken in Zukunft zunehmen wird. Dieser Umstand lässt sich auch an dem Anstieg der Anzahl an Standardlösungen erkennen, die den KMU durch Software-Hersteller zur Verfügung stehen (DRATH 2010, S. 5). Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Werkzeuge von einem Hersteller bezogen werden, ist mit einer Zunahme von Heterogenität und Komplexität in der DWL zu rechnen.

Für die Arbeit kann abgeleitet werden, dass die digitalen Techniken in die Modellkonstruktion des Soll-Zustands für DWL aufzunehmen sind. Die Vielzahl und Heterogenität der Techniken stehen den ganzheitlichen Ansätzen der Mechatronik gegenüber. Daher ist es notwendig, die digitalen Techniken nicht isoliert zu betrachten, sondern für die DWL zusammenzustellen. Dazu muss analysiert werden, inwiefern und an welcher Stelle die digitalen Techniken einen Beitrag zur Mechatronik leisten. Ebenfalls ist zu prüfen, ob weitere digitale Techniken aus artverwandten Fachgebieten in die mechatronische Entwicklung übertragen werden können. Aufgrund der Vielfalt der Techniken werden Bestrebungen zur Integration und Interoperabilität in der DWL im Folgenden betrachtet.

3.3.4 Integration und Interoperabilität

Während die digitalen Werkzeuge anhand der eingesetzten Techniken charakterisiert werden können, ist auf der Ebene einer Landschaft ebenfalls ein Austausch an Informationen zwischen den Werkzeugen zu beachten, die u. a. für eine weitere Verarbeitung von CAX-Modellen notwendig sind. Die Werkzeuge können dabei durch Integration und Interoperabilität die Durchgängigkeit des Entwicklungsprozesses wesentlich verbessern (DOHMEN 2002), im Besonderen hinsichtlich der Datenqualitäten und -verfügbarkeiten. Aufbauend auf den Ergebnissen der unter maßgeblicher Mitwirkung des Autors entstandenen Veröffentlichungen STICH ET AL. (2015) und DRESCHER ET AL. (2012) werden die Bestrebungen zur Integration und Interoperabilität von digitalen Werkzeuglandschaften aufgeführt. Es haben sich vielfältige Konzepte herausgebildet, die bemüht und bestrebt sind, digitale Werkzeuge zusammenzuführen (ANDERL 2012). Während zum einen die

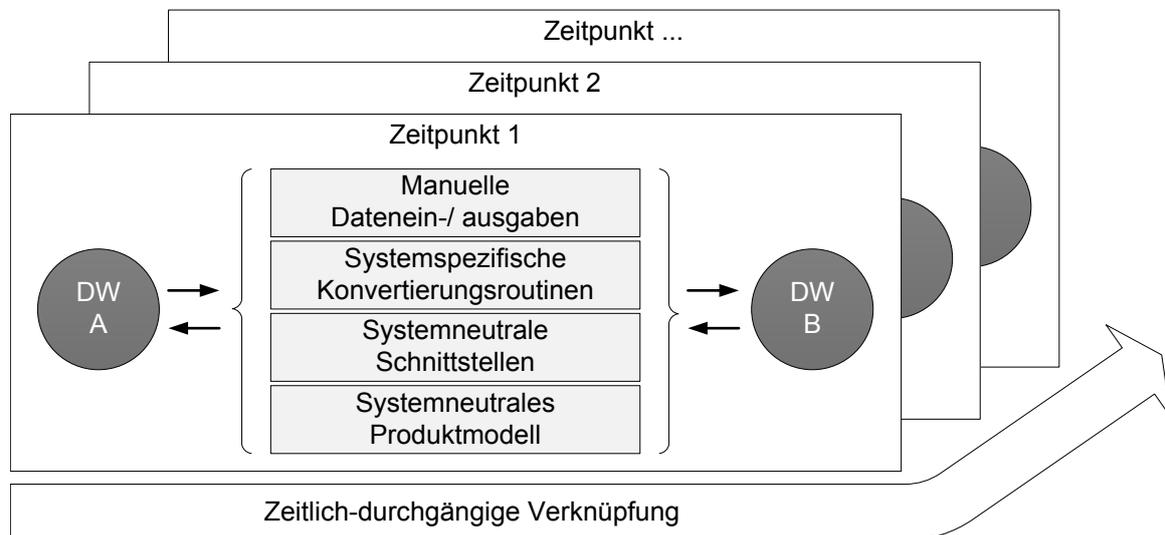
Steigerung der Interoperabilität durch die Standardisierungen der Austauschformate im Mittelpunkt der Betrachtungen steht, werden zum anderen Ansätze zur Integration verfolgt mit dem Ziel, eine monolithische Werkzeug-Suite mit einem einzigen zentralen Entwicklungsmodell zu entwickeln.

Ein möglicher Ansatz für einen durchgängigen Austausch der Daten liegt in der *Integration*, wobei unterschiedliche, zumeist heterogene digitale Werkzeuge zusammengefasst werden zu einem übergreifenden, umfassenden und führenden Werkzeug, sogenannten Werkzeug-Suiten. Dabei wird eine gemeinsame Datenbank verwendet, in der die Entwicklungsinformationen zentral abgelegt sind, wodurch die Austauschprobleme umgangen werden können (DRATH 2010, S. 7). Unterstützend treiben die Hersteller von PDM-/PLM-Werkzeugen die Zusammenführung und Verwaltung von Entwicklungsinformationen an zentraler Stelle voran (EIGNER & STELZER 2013, S. 36–39; GERHARDT 2010, S. 14). Die Bedeutung von PDM-/PLM-Systemen in der IT-Strategie und die Anbindung von bereichsspezifischen, spezialisierten Werkzeugen ist dabei von übergeordneter Rolle (LERCHER 2008, S. 53). Es werden digitale Werkzeuge vermehrt als umfangreiche Pakete in Form von Werkzeug-Suiten angeboten, die verschiedene Funktionen in zusammenstellbaren Modulen bereitstellen. Diese decken teilweise oder auch vollständig das Spektrum an Funktionen innerhalb der Entwicklung ab. Die Integrationsbestrebungen werden auch vonseiten der CAD-Hersteller verfolgt, die vermehrt Anbieter von PDM-/PLM-Lösungen übernehmen (EIGNER & STELZER 2013, S. 39). Die Realisierung eines durchgängigen Einsatzes der Entwicklungsdokumente mittels eines integrierten Werkzeuges besitzt den Vorteil der Konsolidierung von Planungsdaten in einer zentralen Datenbank. Im Gegenzug mangelt es den Werkzeugen oftmals an spezifischen Funktionen, die auf die Anforderungen der KMU zugeschnitten sind. Die Anpassung an individuelle Bedürfnisse ist aufwendig, die Erweiterung von Funktionalitäten muss in Abstimmung mit den Werkzeugen in der Werkzeug-Suite geschehen. Auch sind monolithische Systeme komplex im Vergleich zu spezialisierter Software, wodurch die Innovationsgeschwindigkeit verringert wird. Darüber hinaus gerät der Anwender von derartigen Werkzeugen in eine unerwünschte Abhängigkeit zum Software-Hersteller. (DRATH 2010, S. 8)

Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, die Technische Universität Wien und der Software-Hersteller Logi.cals führten unter Anwendern digitaler Werkzeuge eine Umfrage durch, die ergeben hat, dass trotz der Bestrebungen zur Integration von digitalen Werkzeugen der durchgängige und verlustfreie Datenaustausch als die zentrale Anforderung an DWL gesehen wird (BIFFL ET AL. 2013, S. 18–22). Es zeigt sich ebenfalls, dass spezialisierte Einzelwerkzeuge in der Praxis den umfassenden Werkzeug-Suits vorgezogen werden. Aus den Untersuchungen kann geschlussfolgert werden, dass eine

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung

vollständige Integration der digitalen Werkzeuge in der industriellen Anwendung aufgrund der Nachteile nicht angenommen wird oder bisher noch nicht stattgefunden hat. Aus diesem Grund zeigt sich, dass neben der Integration vielmehr die Kooperation von digitalen Werkzeugen von hoher Relevanz ist. Im Gegensatz zur Integration von digitalen Werkzeugen, hat sich dafür der Begriff der *Interoperabilität* etabliert. Dieser umfasst die Fähigkeit der Zusammenarbeit von digitalen Werkzeugen (MAIER & TAUCHNITZ 2009, S. 191) und verfolgt das Ziel, eine „(...) Konsistenz zwischen den Daten (...) computergestützt, systematisch und wiederholt (...)“ (DRATH ET AL. 2011, S. 452) herzustellen. Der Austausch von Informationen wirkt sich innerhalb der gesamten Werkzeuglandschaft aus, wobei die Konsistenz der Daten gewahrt bleiben muss. Die Minimalausprägung einer Werkzeuglandschaft besteht aus zwei digitalen Werkzeugen, deren bidirektionale Zusammenarbeit in Momentaufnahmen festgehalten werden kann. An bestimmten Zeitpunkten kommt es zwischen den Werkzeugen zu einem Austausch von Daten (Abbildung 3.7), der mittels manueller Dateneingabe und -ausgabe des Nutzers, mittels systemspezifischer oder systemneutraler Konvertierungsroutinen oder auch durch die Verknüpfung über Produktmodelle erfolgt.



Legende:

● Digitales Werkzeug (DW), z. B. CAE Technik □ Art des Datenaustauschs → Informationsfluss

Abbildung 3.7: Zeitliche Ausschnitte eines Datenaustauschs in Anlehnung an DYLA (2002, S. 62)

Systemspezifische Konvertierungen:

Ein gebräuchlicher Ansatz, um zwischen digitalen Werkzeugen einen Austausch an

Daten zu ermöglichen, erfolgt mittels des Einsatzes von bilateralen Schnittstellen (DRATH 2010, S. 6). Im Allgemeinen kann anhand der Richtung des Informationsflusses nach uni- oder bidirektionalen Verbindungen unterschieden werden. Ein gerichteter Fluss führt zu einem geordneten, strikt sequentiellen Vorgehen, wobei die Daten von einem Werkzeug exportiert und in ein anderes Werkzeug importiert werden (DRATH ET AL. 2011, S. 456). Ein solcher Austausch findet in der Art statt, dass Konverter (DRATH 2010, S. 6), auch Pre- bzw. Postprozessoren (DYLA 2002, S. 19–20) genannt, zum Einsatz kommen. Diese konvertieren systemspezifische, zumeist proprietäre Formate eines digitalen Werkzeuges in ein fremdes, natives Format eines anderen digitalen Werkzeuges (DYLA 2002, S. 19–20). Ein kontrollierter Datenaustausch (Einlesen/Konvertieren/Auslesen) zwischen den beteiligten Werkzeugen findet statt. Ein dateibasierter Austausch zwischen den digitalen Werkzeugen zeigt Potenziale in einer universellen und einfachen Handhabung (DRATH 2010, S. 6), der Möglichkeit einer Realisierung von verteilten Systemen und der Integration von Schnittstellen von bereits in Unternehmen vorhandenen Werkzeugen (DYLA 2002, S. 19–20). Nachteilig an dieser Art des Datenaustausches ist, dass die zu unterstützenden Fremdformate mit der Zahl der Konverter schnell ansteigt. Beispielsweise sind für zwei Werkzeuge auch zwei Konverter zu programmieren, für drei Werkzeuge sind bereits sechs Konverter und für fünf Werkzeuge, wie in Abbildung 3.8a dargestellt, 20 Konverter zur Verfügung zu stellen. Die Komplexität des Ansatzes wird zusätzlich durch die hohen Wartungsaufwände der Konverter im Fall des Versionswechsels der einzelnen Werkzeuge erhöht (DRATH 2010, S. 6).

Systemneutrale Konvertierungen:

Bei einem Austausch zwischen den digitalen Werkzeugen auf Basis eines systemneutralen und offenen Datenformats ist es möglich, die Anzahl der Konverter zu reduzieren. So sind bei fünf digitalen Werkzeugen nicht mehr 20 Konverter notwendig, wie bei einem Einsatz von systemspezifischen Formaten, sondern die Anzahl kann auf zehn Konverter reduziert werden. Wenn eines der digitalen Werkzeuge eine direkte Unterstützung des gemeinsamen Datenformats aufweist, kann die Anzahl der Konverter um weitere zwei eingespart werden (Abbildung 3.8b). Wird sich für den Datenaustausch auf einen gemeinsamen Standard geeinigt, können die Aufwände durch Konvertierungen verringert werden. Darüber hinaus wird es Anwendern ermöglicht, ihre Werkzeuglandschaft flexibel zu gestalten und jederzeit zu optimieren. Die Verwendung eines offenen Standards weist einen zusätzlichen Nutzen in Gestalt einer Lesbarkeit der Daten über einen langen Zeitraum und einer herstellerunabhängigen Wiederverwendung auf. Den Herstellern von *kleinen* Spezialwerkzeugen am Markt wird die Integration ihrer Ansätze erleichtert, da keine zusätzliche Einrichtung und Pflege von proprietären Formaten notwendig ist. Als

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung

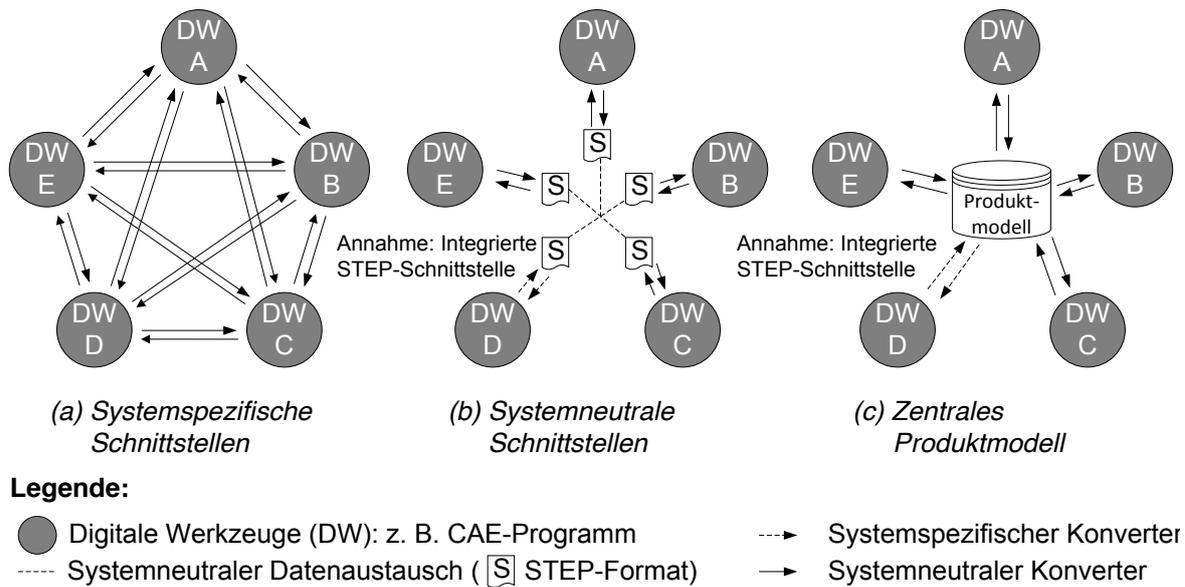


Abbildung 3.8: Zusammenspiel digitaler Werkzeuge in Anlehnung an DYLA (2002, S. 38–40)

Nachteil des Ansatzes ist die mangelnde zentrale Datenhaltung und -speicherung im Verbund der Werkzeuge zu sehen. (DRATH 2010, S. 6–7; DYLA 2002, S. 38)

Verknüpfung über Produktmodelle:

Eine zentrale Verwaltung bedeutet hingegen, dass die digitalen Werkzeuge auf eine gemeinsame, offene Datenbasis lesend und schreibend zugreifen können (Abbildung 3.8c). Die Datenbasis stellt in der Produktentwicklung das sogenannte Produktmodell dar, welches als „(...) zentrales Organ zur Verwaltung und Speicherung (...)“ (DYLA 2002, S. 39) dient. Maßgebliche Ansätze aus der wissenschaftlichen Forschung, die eine Zentralisierung vorschlagen sind: EIGNER (2014), HENSEL (2013), MAUDERER (2011), BELLALOUNA (2009) und DOHMEN (2002). Über den Import und Export von Daten hinaus ermöglicht ein zentrales Produktmodell die Nachverfolgung und Autorisierung von Änderungen, Prüfung und Konfliktauflösung von Daten und trägt zur Transparenz bei (DRATH ET AL. 2011, S. 457). Es wird jederzeit ein gültiges Datenmodell gepflegt und der Datenaustausch einem kontrollierbaren Ablauf unterzogen (DYLA 2002, S. 39). Nachteile bestehen in den Aufwänden zur Pflege und in einer verringerten Flexibilität der DWL.

Die gemeinsamen Bemühungen zur Zentralisierung von Informationen haben zu verschiedenen standardisierten Produktmodellen geführt (Tabelle 3.2). Eine systemneutrale Übertragung von allgemeinen Informationen auf die Ebene eines Produktmodells wurde im Maschinenbau erstmals mittels des Standard for the Exchange of Product model

data (STEP) im Jahr 2001 möglich (DYLA 2002, S. 10). Daher haben viele Anwender in der Vergangenheit eigene Austauschformate definiert, wie beispielsweise das *Gear Data Exchange Format* zur Synchronisation von Mess- und Prüftechnik von Zahnrädern nach VDI (2014) oder die ENGDAT-Richtlinie zur CAD-/CAM-Kopplung im Automobilbau nach VDA (2009). Die Übertragungsmethoden haben sich dabei meist auf deren originalen Anwendungsbereich beschränkt. Eine Abhilfe konnte das STEP-Austauschformat schaffen, indem es eine universelle bzw. produktneutrale Referenz darstellt, welche für spezifische Produktentwicklungen angepasst werden kann. Das Format STEP verfolgt das Ziel, eine eindeutige Darstellung aller Daten des Produktlebenszyklus eines Produkts zu ermöglichen und geht über die reine Geometrieinformationen hinaus (vgl. ANDERL ET AL. 2013).

Erweiterungen und Anpassungen des STEP-Formats sind vielfältig vorgenommen worden (vgl. DYLA 2002; ANDERL ET AL. 2000; DONGES ET AL. 1999; TOENSHOFF ET AL. 1999). Repräsentativ hat sich dabei für den Bereich der Mechatronik das Austauschformat MechaSTEP herausgebildet. Das Ziel des Formats liegt in der Abbildung fachübergreifender Daten, um Simulationen und Berechnungsdaten aus der Mechanik, Elektrotechnik, Hydraulik und Regelungstechnik darzustellen. Die mechatronischen Komponenten sollen verzahnt und interdisziplinäre Schnittstellen definiert werden, um eine vollständige Abbildung von disziplinspezifischen Modellen zu gewährleisten (LERCHER 2008, S. 61; DONGES ET AL. 1999).

Neben dem STEP-Ansatz adressiert das Datenformat *Computer Aided Engineering eXchange (CAEX)* den interdisziplinären Austausch und wurde als ein offenes Datenformat zum Informationsaustausch über die Betriebsphasen einer Anlage wie auch entlang der Automatisierungspyramide entwickelt (MERSCH ET AL. 2011, S. 3–4). CAEX beschreibt eine hierarchische Anlagenstruktur in einer abstrakten Weise, die neben ihrem Ursprung aus der Prozessindustrie auch zur Beschreibung von Maschinen und Anlagen der *diskreten Fertigung* geeignet ist (GÜTTEL & FAY 2008). Für eine Anpassung an die Belange des Maschinenbaus sind allerdings zusätzliche Konkretisierungen und Anwendungsvorschriften notwendig (MERSCH ET AL. 2011, S. 3–4).

Aufbauend auf dem CAEX-Datenformat ergänzt das Format *Automation Markup Language (AutomationML)* die konkrete Modellierung für den Maschinenbau (MERSCH ET AL. 2011, S. 4) und stellt ein auf Standards basierendes, offenes und herstellernerutrales Format zum Austausch von Anlageninformationen zur Verfügung (DRATH 2010, S. 12). Die Vorteile von AutomationML liegen in dem hohen Abdeckungsgrad, der sich darin zeigt, dass sowohl einfache Anlagenkomponenten als auch vollständige digitale mechatronische Modelle entlang des Entwicklungsprozesses abgebildet werden können. Auch greift es be-

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung

Tabelle 3.2: Standardisierte Produktmodelle für den interdisziplinären Austausch (Auswahl wesentlicher Beispiele)

Datenformat	Inhaltlicher Schwerpunkt	Literaturverweis
Automation Markup Language (AutomationML)	AutomationML integriert verschiedene disziplinspezifische Datenformaten wie beispielsweise <i>COLLABorative Design Activity</i> von ARNAUD & BARNES (2006).	DRATH (2010)
Computer Aided Engineering Exchange (CAEX)	Das Datenmodell ermöglicht die herstellerunabhängige Speicherung und Übertragung von hierarchischen Anlageninformationen (z. B. Klassen und Relationen von Anlagenstrukturen) und baut auf dem XML-Schema auf.	DIN (2010) MAYR & DRATH (2007)
STandard for the Exchange of Product model data (STEP)	Der STEP-Standard ermöglicht die physikalische, funktionale Beschreibung von Produktinformationen entlang des Lebenszyklus.	ANDERL & TRIPPNER (2000)
MechaSTEP	Das spezifische Datenmodell erweitert den STEP-Ansatz, um mechatronische Systeme abzubilden.	DONGES ET AL. (1999)
STEP-Erweiterung	Das STEP-Datenmodells wird zur Abbildung der Schmie- deprozesskette erweitert.	ANDERL ET AL. (2000)
Integriertes CAD-System	Der integrierte Ansatz empfiehlt ein Produktmodell für spezifische rechnerbezogene Arbeitsplätze.	WELLNIAK (1994)
STEP für die Getriebeentwicklung	Es werden Empfehlungen gegeben, die ein Produktmodell anhand von STEP AP214 für Getriebe darstellt.	DYLA (2002)
Interdisziplinäres STEP	Es wird eine Erweiterung des STEP-Ansatzes für einen systemneutralen Datenaustausch von technischen Elementen vorgeschlagen.	TOENSHOFF ET AL. (1999)

währte Datenformate auf, die zum Austausch von verschiedenen disziplinspezifischen Formaten dienen. (DRATH 2010, S. 11)

Im industriellen Umfeld herrschen verschiedene Mischformen der o. g. Ansätze vor. Ein pauschales Vorgehen zur Steigerung von Integration und Interoperabilität kann nicht getroffen werden. Für die Methodik bedeutet dies, dass der Ist-Zustand der DWL in dem KMU zu erfassen ist und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten sind. In diesem Zusammenhang sind die Informationsflüsse zu analysieren und im Vorgehen zur Bewertung und Gestaltung der DWL aufzugreifen. Zur Beschreibung des Soll-Zustandes von DWL werden bestehende Referenzmodelle in der digitalen Entwicklung im Folgenden betrachtet und geeignete Merkmale in die Modellbildung dieser Arbeit überführt.

3.3.5 Referenzmodelle

Die Aufgabe eines Referenzmodells ist die Nachbildung eines gedachten oder eines real existierenden Originalsystems (VDI 1996b, S. 9). GAJEWSKI (2004, S. 7–18) diskutiert das Begriffsverständnis ausführlich, wobei zu erwähnen ist, dass die vereinfachte Darstellung des Originalsystems, die Verallgemeinerung des Modells und der Empfehlungscharakter die wesentlichen Merkmale bilden (BROCKE & GROB 2003, S. 31–32). Die Vereinfachung ermöglicht die Reduktion von Komplexität des Originals (DEUSE ET AL. 2006, S. 67), wobei der Zweck des Modells wesentlich ist. Die Verallgemeinerung stellt hingegen die universelle Validität des Modells her (FUSCH 2005, S. 39–40), indem eine unabhängige Beschreibung von einer konkreten Situation (z. B. von einem spezifischen Unternehmen) in einem gewissen Gültigkeitsbereich erfolgt. Auf dieser Basis kann eine Anpassung und Skalierung von Modellen auf spezifische Anwendungsfälle ermöglicht werden (SCHUH 2006, S. 14–15; BROCKE & GROB 2003, S. 31–32; KRUMAR & SCHWARZER 1994, S. 2–4). Der Empfehlungscharakter fordert, dass Referenzmodelle die Rolle eines *Solls* oder *Ideals* einnehmen (BROCKE & GROB 2003, S. 31–32), dessen Empfehlungen im gegebenen Anwendungsfall entstehen (SCHUH 2006, S. 14–15). Die Referenzmodelle ermöglichen es, IT-Systeme zu beschreiben und stellen somit ein Pendant zu den in der *Prozesswelt* vorhandenen Vorgehensmodellen dar (vgl. Abschnitt 3.2). Für eine Methodik zur Bewertung und Gestaltung bilden solche Modelle den Soll-Zustand unter bestimmten Fragestellungen ab, wie es auch für die Beantwortung von FF 1 in der Arbeit als sinnvoll erachtet wird.

Bisher existieren keine Referenzmodelle zur Beschreibung von digitalen Werkzeuglandschaften in der Entwicklung von mechatronischen Maschinen und Anlagen. Aus diesem Grund orientiert sich die Arbeit an bestehenden Referenzmodellen, die ebenfalls die Bewertung und die Auswahl von Software-Systemen bezwecken. Es werden Ansätze aus dem Bereich des disziplinspezifischen Entwurfs, der Digitalen Fabrik und der Produktionsplanung/-steuerung betrachtet und auf eine mögliche Übertragung untersucht (Abbildung 3.9). Der disziplinspezifische Entwurf ist ein integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses, wodurch den Software-Systemen eine Ähnlichkeit zugesprochen werden kann. Die Digitale Fabrik fokussiert Software-Systeme in der Produktion, grenzt jedoch an den Entwicklungsbereich und besteht aus einer ähnlich diversen Ansammlung von digitalen Werkzeugen. Bei der Produktionsplanung/-steuerung handelt es sich zwar nicht um ein angrenzendes Betrachtungsgebiet, aber die Verwandtschaft zum Entstehungsprozess und die ähnliche Strukturierung der Prozesse in Phasen und Aktivitäten verspricht einen erweiterten Erkenntnisgewinn für die in der Arbeit geplante Modellbildung eines Referenzmodells für die digitalen Werkzeuglandschaften.

3.3 Digitale Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der Entwicklung

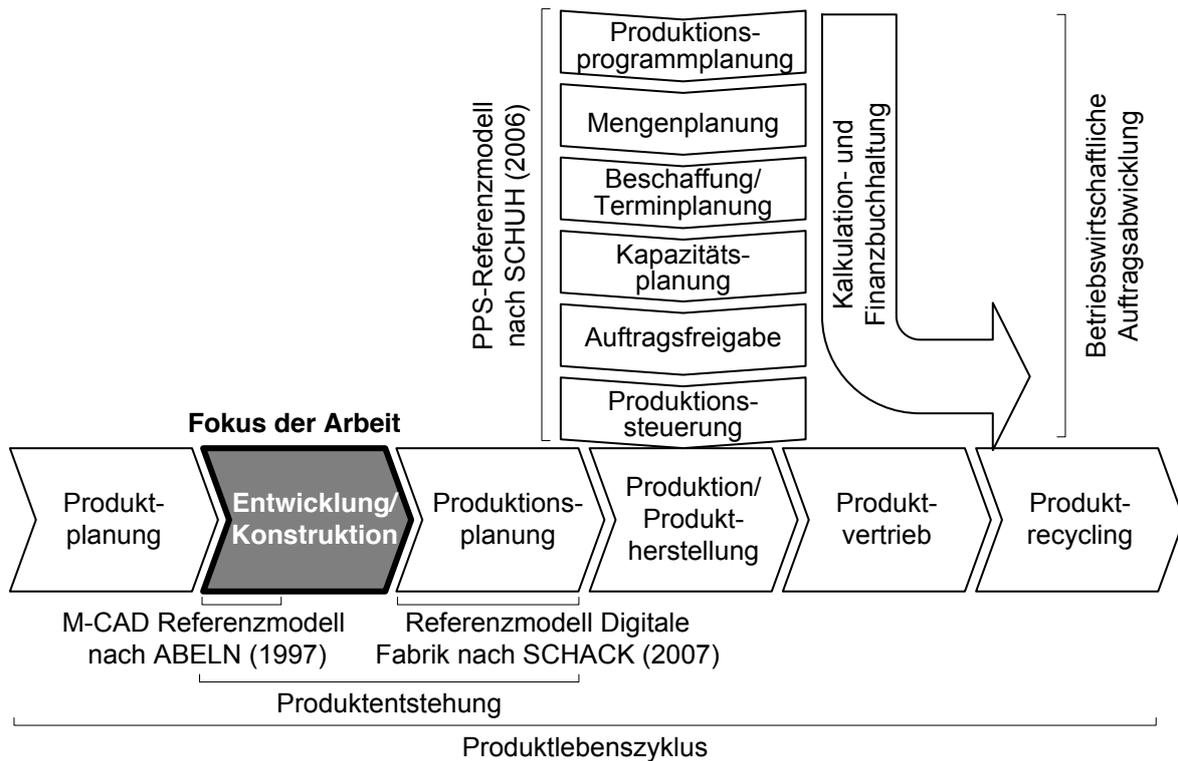


Abbildung 3.9: Betrachtungsbereich im Produktlebenszyklus in Anlehnung an ARNOLD ET AL. (2011, S. 10)

Referenzmodelle haben sich nach disziplinspezifischen Anwendungsgebieten und Techniken herausgebildet, wie beispielsweise das ECAD-Referenzmodell nach ROLLER & DETTLAFF (1996); das MCAD-Referenzmodell nach ABELN (1997); das Kommunikations-und-Forschungskreis-für-Integrationstechnologien-in-Computer-Aided-Design-und-Engineering (KOMFORCE)-Referenzmodell nach GAUSEMEIER ET AL. (1999). Repräsentativ für ein aus der mechanischen Konstruktion stammendes Anwendungsgebiets im Maschinenbau sei an dieser Stelle das bekannte CAD-Referenzmodell nach ABELN (1997) dargelegt, welches eine offene, modulare, flexible und anpassungsfähige Architektur zur Gestaltung von mechanischen CAD-Systemen verfolgt. Das Ziel ist es, einen Soll-Zustand darzulegen, der Lösungsansätze für bestehende Schwachstellen der CAD-Technik aufzeigt (z. B. Konfigurierbarkeit der Systeme), dabei internationale Standards zum Informationsaustausch (z. B. STEP-Modelle) berücksichtigt und aktuelle Erkenntnisse der Informationstechnik (z. B. Datenbanktechnologien) anwendet (ABELN 1997, S. 92). Es wird eine Grundstruktur vorgeschlagen, die in vier Hauptkomponenten untergliedert ist: Der *Anwendungsteil* repräsentiert die konstruktionsspezifischen Funktionalitäten der CAD-Technik. Der *Systemteil* beinhaltet Dienste, die für die Ausführung der Komponenten des Anwendungsteils benötigt werden (z. B. anwendungsspezifische Konfigurierbarkeit des Gesamtsystems). Das *anwendungsspezifische Wissen* umfasst

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Erfahrungs- und Expertenwissen, welches bei der Verarbeitung oder Präsentation die Konstrukteurinnen und die Konstrukteure unterstützen. Das Produktmodell referenziert sich auf den STEP-Standard und umfasst alle Informationen (z. B. Fakten, Konzepte und Instruktionen) über das Produkt im mechanischen Produktentwicklungsprozess (Kapitel 3.3.4). Die disziplinspezifischen Referenzmodelle geben eine detaillierte Sicht auf die in der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Konstruktion angewandten digitalen Werkzeuge, vernachlässigen jedoch meist den abteilungs- und disziplinenübergreifenden Gedanken der Mechatronik. Es werden die verschiedenen Techniken, die an der Entwicklung von mechatronischen Maschinen und Anlagen beteiligt sind, nicht hinreichend berücksichtigt.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Gestaltung des Prozesses und der Werkzeuglandschaft zum mechatronischen Entwicklungsprozess wird die Auftragsabwicklung betrachtet. Repräsentativ wird das Aachener Modell zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) nach SCHUH (2006) beleuchtet, welches sich als eine weitreichende Beschreibung des Auftragsabwicklungsprozesses etabliert hat (Abbildung 3.10a). Es betrachtet den Prozess unter den Blickwinkeln, die in verschiedenen Abschnitten eines Projektes notwendig sind, und besteht aus den folgenden vier lose zusammenhängenden Referenzsichten (vgl. SCHUH 2006, S. 18–26): Die *Aufgabensicht* spezifiziert und detailliert die Aufgaben der PPS in eine allgemeingültige, hierarchische Abstraktion. Die *Prozessarchitektursicht* bildet das Bindeglied zwischen der erweiterten Aufgabensicht und der nach Betriebstypen differenzierten Prozesssicht und liefert einzelne Prozessschritte auf Basis unterschiedlicher Betriebstypen. Die *Funktionssicht* repräsentiert die Teilaufgaben eines Prozesses, die durch IT-Systeme unterstützt werden können. Die *Prozesssicht* leitet aus der Aufgabensicht Prozesse ab und bringt diese in eine zeitlich-logische Ordnung.

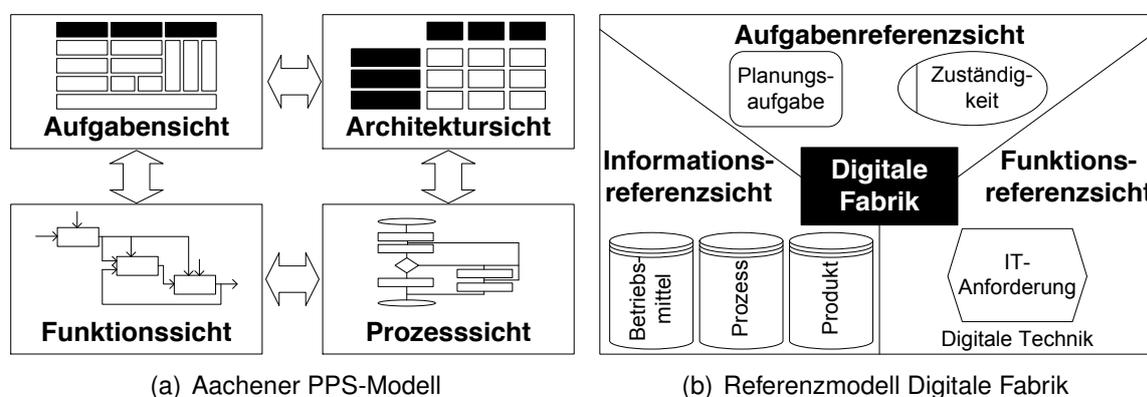


Abbildung 3.10: Vereinfachte Darstellung der Struktur des PPS-Referenzmodells nach SCHUH (2006, S. 18) und des Referenzmodells der Digitalen Fabrik nach SCHACK (2007, S. 93)

Im Gegensatz zu den Referenzmodellen im mechanischen Entwurf und der Auftragsabwicklung, stellt die Digitale Fabrik den Produktentstehungsprozess, im Besonderen die Produktionsplanung, in den Vordergrund. Obwohl SCHACK (2007) die Digitale Fabrik von der Produktentwicklung weitgehend abgrenzt und nur teilweise betrachtet, besteht auch an dieser Stelle eine Ähnlichkeit zur mechatronischen Entwicklung, die eine Untersuchung des Ansatzes rechtfertigt (Abbildung 3.10b). Seine Modellkonstruktion beruht auf den Überlegungen nach SCHUH (2006), wobei der Modellzweck und die -komplexität vereinfacht worden sind. SCHACK (2007) berücksichtigt in seiner Arbeit verschiedene Sichten auf die Digitale Fabrik und strebt die Allgemeingültigkeit an, um eine spätere Skalierung für einen spezifischen Anwendungsfall des Modells zu ermöglichen. Er reduziert den Aachener Ansatz auf drei wesentliche Sichten und überträgt diesen in die Digitale Fabrik (vgl. SCHACK 2007, S.72–73):

- *Aufgabenreferenzsicht*: Die Aufgaben innerhalb des Anwendungsgebiets der Digitalen Fabrik (Einschränkung Produktionsplanung) sind strukturiert zusammengestellt. So führt SCHACK (2007) beispielsweise die Tätigkeit *Arbeitsvorgang planen* als einen Schritt innerhalb der Organisationseinheit *Prozessplanung* an.
- *Funktionsreferenzsicht*: Die Methoden und Funktionsanforderungen an die digitalen Werkzeuge sind abgebildet. Dabei werden IT-Systemfunktionen vorgestellt, wie beispielsweise die *Montageprozessplanung*, die eine Unterstützung für die definierten Aufgaben darstellt.
- *Informationsreferenzsicht*: Es werden sämtliche in der Produktionsplanung vorausgesetzte und entstandene Informationen (Ein-/Ausgabe) in die Kategorien der Betriebsmittelinformationen, der produktbezogenen, der produktionsbezogenen und produktionsprozessbezogenen Informationen zugeordnet.

Während disziplinspezifische Referenzmodelle sich stark auf die Architektur der IT-Systeme beziehen, ist eine deutliche Berücksichtigung der aus den Prozessen stammenden Aufgaben und Funktionalitäten in den Ansätzen von SCHACK (2007) und SCHUH (2006) zu erkennen. Das Aachener PPS-Modell verfolgt mit den vier Referenzsichten einen breiten Einsatz zur Beschreibung und Abdeckung des Auftragsentwicklungsprozesses, während SCHACK (2007) einen an Komplexität reduzierten Ansatz verfolgt, der auf drei Referenzsichten basiert und die Produktionsplanung im Produktentstehungsprozess fokussiert. Darüber hinaus betrachtet der Ansatz die unterschiedlichen digitalen Techniken als einen wesentlichen Bestandteil im Modell.

Für der Modellentwicklung zur Beschreibung von DWL in dieser Arbeit wird das disziplinspezifische Referenzmodell als unpassend angesehen. Die mangelnde Berücksichtigung

des Prozesses im Modell lässt auf eine geringe Eignung für eine maßgeblich durch Phasen und Aktivitäten bestimmte mechatronische Entwicklung schließen. Der Ansatz der Digitalen Fabrik nach SCHACK (2007) stellt eine vereinfachte und strukturierte Modellkonstruktion im Vergleich zum weitaus komplexeren PPS-Modell nach SCHUH (2006) dar. Auch lässt sich aus der teilweise vorhandenen Überschneidung der Digitalen Fabrik mit der Produktentwicklung schließen, dass eine Anwendung der Modellüberlegungen nach SCHACK (2007) für diese Arbeit im Allgemeinen möglich ist. Unterstützend für eine Orientierung an dem Ansatz nach SCHACK (2007) ist die Abbildung von heterogenen digitalen Techniken im Modell, welche ebenfalls für die Beschreibung des Soll-Zustandes der DWL notwendig ist. Aus diesen Gründen wird sich in der Modellbildung des Soll-Zustandes der DWL an dem Referenzmodell nach SCHACK (2007) angelehnt. Es können das Konzept der Sichten übertragen werden und eine ähnliche Verknüpfung zwischen den Elementen im Modell für die DWL gefunden werden (z. B. Einbindung der digitalen Techniken). Da der Fokus dieser Arbeit im Vergleich zur Digitalen Fabrik auf der mechatronischen Entwicklung liegt, müssen digitale Techniken und IT-Funktionen in einem eigenständigen Referenzmodell synthetisiert werden. In der Arbeit wird ebenfalls eine Anpassung des Referenzmodells an die Entwicklungssituation verfolgt. Dafür werden im folgenden Abschnitt bestehende Vorgehen und Merkmale eines solches Vorgehens aus angrenzenden Gebieten analysiert.

3.4 Anpassung an die Entwicklungssituation

Für eine differenzierte Betrachtung der Entwicklung in Unternehmen des Maschinenbaus ist es notwendig, die Entwicklungssituation zu kennen (ROELOFSEN 2011, S.63). Diese dient dazu, Vorgehensweisen an die jeweilige Situation anzupassen und wird als ein kritisches Erfolgselement einer methodisch gestützten Entwicklungsarbeit angesehen (BIRKHOFER ET AL. 2005, S. 2; MEISSNER ET AL. 2005, S 1). Der Gültigkeitsbereich einer Situationsbeschreibung kann unterschiedliche Dimensionen aufweisen (Abbildung 3.11). Eine allgemeine und generelle Abbildung eines Sachverhalts liefert eine größere Anzahl an Situationen als eine spezifische, die im Gegensatz dazu eine aussagekräftige und konkrete Darstellung des Sachverhalts anspricht (PONN 2007, S. 49). Während beispielsweise die Situation einer *Entwicklung eines maschinenbaulichen Produktes* als allgemeingültig angesehen werden kann, ist die *Entwicklung einer automatisierten Verpackungsanlage* spezifisch und die *Entwicklung einer Anlage zum Verpacken von 1L-Recycling-Flaschen* als hochspezifisch anzusehen. Eine geschickte Anpassung eines allgemeingültig betrachteten Prozesses, einer Methode oder eines Modells auf eine

3.4 Anpassung an die Entwicklungssituation

konkrete Situation, wie die der Entwicklung einer 1L-Recycling-Flasche, ermöglicht es Entwicklern, mit den wesentlichen Aspekten der Situation vertraut zu werden und ihre Handlungen entsprechend zu adaptieren (LINDEMANN 2009, S. 29–32; PONN 2007, S 43).

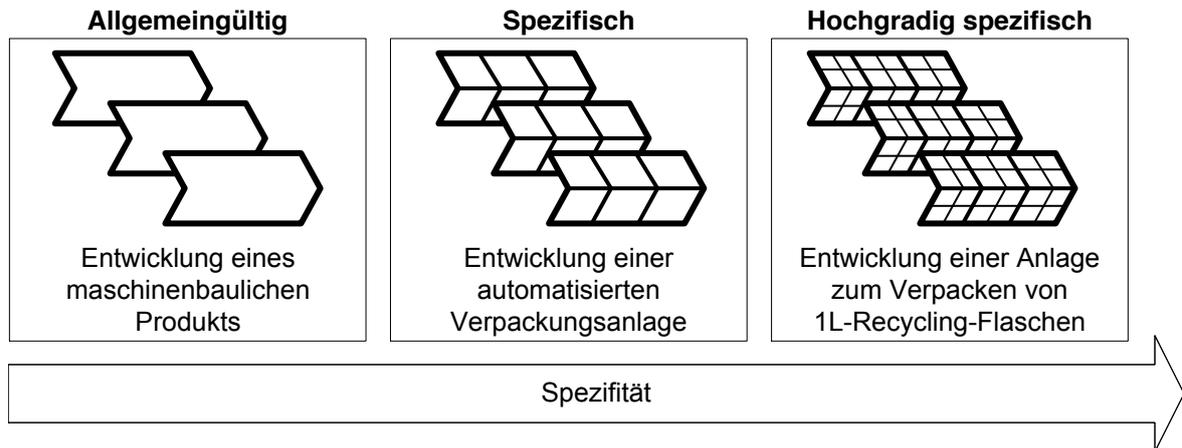


Abbildung 3.11: Spezifität in Anlehnung an PONN (2007, S. 49)

Die Anpassung von Vorgehensweisen an die Situation in der Entwicklung wird in der Literatur unterschiedlich ausgeführt, wobei ROELOFSEN (2011, S. 59–61) einen ausführlichen Vergleich aktueller Ansichten vornimmt. Herauszustellen sind die Ansätze nach DEMERS (2000), FRANKENBERGER (1997) und DYLLA (1991). FRANKENBERGER (1997, S. 83) berücksichtigt das Tagesgeschäft von Entwicklerinnen und Entwicklern, welches durch wesentliche Einflussfaktoren bestimmt ist, wie die Qualifikationen und die Erfahrungen von Einzelnen. Das Modell der Entwicklungssituation nach DEMERS (2000) plant und steuert Entwicklungsprozesse mittels eines dynamischen Ansatzes, wobei die „(...) momentane Entwicklungssituation (...)“ (DEMERS 2000, S. 3) nach unerwarteten Ereignissen untersucht und eine Korrektur der eingesetzten Aktivitäten, Mittel und Kapazitäten vorgenommen wird. DYLLA (1991) entwickelte ein Modell der Situation, welches die konstruktiven Probleme in Merkmale und Ausprägungen fasst (Tabelle 3.3): Als Ausgangszustand zählt er u. a. die Vorgaben und die Hauptanforderungen an das Entwicklungsprojekt. Für die Konkretisierung des Zielzustandes erwähnt er die Komplexität des Systems und die Branche des Einsatzes der Maschine oder Anlage (DYLLA 1991, S. 35). Während FRANKENBERGER (1997) den Faktor Mensch thematisiert, stellt DEMERS (2000) den zeitlichen Ablauf eines Entwicklungsprojektes in den Vordergrund. Im Gegensatz dazu findet DYLLA (1991) Merkmale und Ausprägungen zur Charakterisierung des konstruktiven Problems und stellt somit den Kern eines Entwicklungsprozesses heraus.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 3.3: Merkmale von konstruktiven Problemen (Auszug nach DYLLA 1991, S. 35)

Zustand	Merkmal	Ausprägung
Anfangszustand	Vorgabe	Keine (Neukonstruktion)
		Prinzip (Anpassungskonstruktion)
		Entwurf (Variantenkonstruktion)
	Hauptforderung	Funktionsforderung
		Kostenforderung
		Fertigungsforderung
Zielzustand	Komplexität	Anlage
		Maschine
		Baugruppe oder Bauteil
	Branche	Maschinenbau
		Verfahrenstechnik
		Fahrzeugtechnik

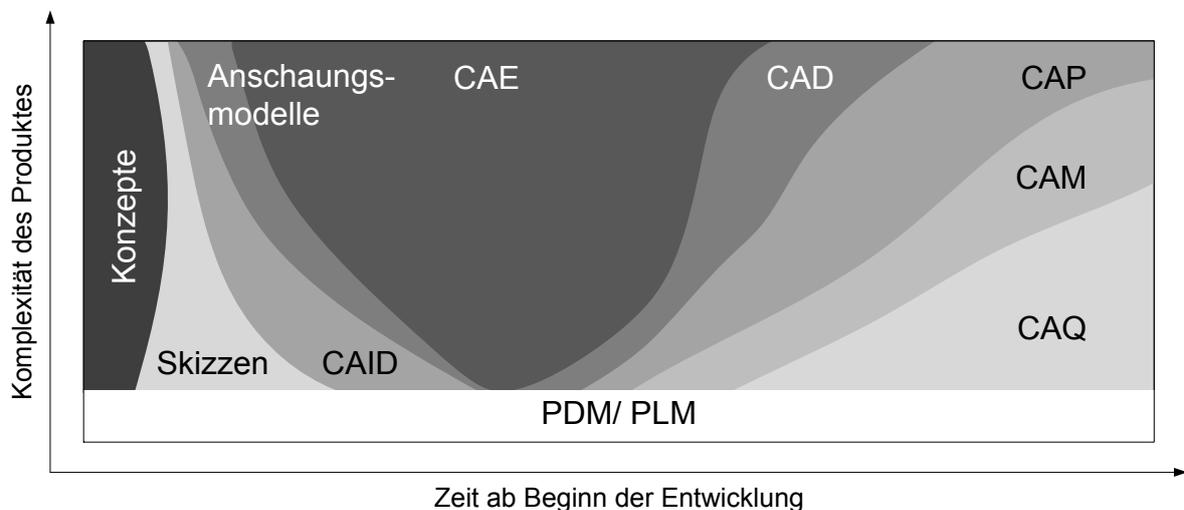
Erste Übertragungen der Anpassung von Vorgehensweisen haben in der Mechatronik mit den Arbeiten des V-Modell XT (vgl. BIT 2005) und dem Ansatz von SPIEGELBERGER (2011) stattgefunden. Bei dem V-Modell XT steht der Zusatz *XT* für *Extreme Tailoring*, was analog zur o. g. Anpassung an eine spezifische Situation in der Entwicklung zu verstehen ist. Der Ansatz *schneidet* dabei das originäre und generische V-Modell, welches auch die Grundlage für das V-Modell in der Mechatronik darstellt, in der Art *zurecht*, dass es für möglichst viele verschiedene Konfigurationen im Projekt anwendbar ist (BROY & RAUSCH 2005, S. 3). Notwendige Kriterien sind dabei der Projekttyp, die anzuwendenden Vorgehensbausteine und die zu verwendende Projektstrategie (BROY & RAUSCH 2005, S. 3).

Ein ähnlicher Ansatz in der Mechatronik wird auch von SPIEGELBERGER (2011) verfolgt, der im Anschluss an die Arbeiten von RAUCHENBERGER (2010) ein mechatronisches Reifegradmodell anwendergerecht für KMU gestaltet. Dabei definiert er die spezifische Situation, indem das allgemeingültige Reifegradmodell hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die Unternehmen adaptiert wird, eines der Kriterien ist z. B. die Organisationsform (RAUCHENBERGER 2010, S. 80). Beide Ansätze thematisieren die Mechatronik und gehen von einem allgemeingültigen Modell aus, welches für eine spezifische Konstellation des Projektes angepasst werden kann. Während das prinzipielle Vorgehen der Anpassung in gleicher Art und Weise erfolgt, ist die Ausgangslage bei (BROY & RAUSCH 2005, S. 3) ein Vorgehensmodell und bei SPIEGELBERGER (2011) ein Reifegradmodell. Auch unterscheiden sich die Ansätze im Verständnis der Entwicklungssituation. BROY & RAUSCH (2005)

3.4 Anpassung an die Entwicklungssituation

verwenden projektbezogene Merkmale zur Anpassung des Modells und SPIEGELBERGER (2011) führen hingegen organisatorische Kriterien für KMU an.

Ebenfalls in der agilen Produktentwicklung sind Ansätze entstanden, welche an die Entwicklungssituation angepasst werden können. Als repräsentativ soll die am *iwb* entwickelte Forschungsarbeit von KLEIN (2016) angeführt werden. Ausgehend vom Anwendungsfall im Maschinenbau wird in seiner Arbeit ein spezifischer Agilitätsgrad gebildet. Anhand von Kriterien, wie der Organisationsstruktur und die Teaminteraktion, können Unternehmen in das Modell eingeordnet werden. In der Folge werden agile Techniken den Anwendern empfohlen, wie beispielsweise der Einsatz von „Burndown Charts“. Der Ansatz fokussiert die Adaption von agilen Techniken an die Spezifika im Maschinenbau. Zwar wird eine Integration in die Mechatronik vorgenommen, jedoch ausschließlich auf die Makrologik des Entwicklungsprozesses bezogen. Das entstandene Vorgehensmodell beinhaltet keine Integration in einen in der Praxis bestehenden Auswahl- oder Beschaffungsprozess. Darüber hinaus, bleibt die Betrachtung der digitalen Werkzeuglandschaften unberücksichtigt – sowohl in den informationstechnischen Gegebenheiten wie auch den damit verbundenen Möglichkeiten eines IT-gestützten Einsatzes in den Unternehmen des Maschinenbaus.



Legende:

CAD	– Computer Aided Design	CAP	– Computer Aided Planning
CAE	– Computer Aided Engineering	CAQ	– Computer Aided Quality Assurance
CAID	– Computer Aided Industrial Design	PDM	– Product Data Management
CAM	– Computer Aided Manufacturing	PLM	– Product Lifecycle Management

Abbildung 3.12: Einsatz digitaler Techniken in Anlehnung an VAJNA (2009, S. 15) und OTTOSSON (2004, S. 214)

Ein erstes Indiz, dass eine Anpassung von DWL an den situationspezifischen Rahmen der Entwicklung im Allgemeinen möglich und nötig ist, kann an dem Zusammenhang zwischen dem Einsatz von digitalen Techniken und der Komplexität des Produktes gesehen

werden (Abbildung 3.12). Es ist erkennbar, dass mit einer steigenden Komplexität des Produktes sich auch anteilig der Einsatz von digitalen Techniken verschiebt (vgl. OTTOSSON 2004, S. 214). Für die Entwicklung eines einfachen Produktes sind beispielsweise Skizzen der mechanischen, elektrischen/elektronischen und informationstechnischen Komponenten ausreichend, während ein hochkomplexes Produkt nach ausgereiften Techniken der Simulation und Animation verlangt. Es zeigt sich, dass ein gezielter Einsatz von digitalen Techniken für die spezifische Entwicklungssituation, die sich u. a. durch die Komplexität des Produktes charakterisieren lässt, einen positiven Beitrag durch konkrete Aussagen leistet (EIGNER 2012b, S. 3). Zum einen kann die Einführung von bestimmten, bisher fehlenden, digitalen Techniken empfohlen und zum anderen auch ein *Wildwuchs* eines übermäßigen IT-Einsatzes verhindert werden.

Die Arbeit verfolgt die Anpassung des Soll-Zustandes für DWL an die Entwicklungssituation von KMU im Maschinenbau (vgl. F 2). Da bisher keine strukturierte Vorgehen für DWL in der Mechatronik vorhanden sind, motivieren die Analysen von VAJNA (2009, S. 15) und OTTOSSON (2004) für das Ziel der Arbeit. Für die Beschreibung der Entwicklungssituation sind die Ansätze nach DEMERS (2000) und FRANKENBERGER (1997) ungeeignet. An der Untergliederung in Merkmale und Ausprägungen nach DYLLA (1991) kann sich aufgrund des ähnlichen thematischen Fokus orientiert werden. Es müssen zudem Merkmale zusammengestellt werden, die zusätzlich die Mechatronik und die Gegebenheiten in KMU in der Entwicklungssituation erfassen. Für die Arbeit kann das prinzipielle Vorgehen zur Anpassung von Modellen an die Situation nach BROY & RAUSCH (2005) und SPIEGELBERGER (2011) übernommen werden. Ergänzend muss hierfür eine Integration in die Methodik der Arbeit stattfinden. Im Folgenden werden Verfahren zur Bewertung und Gestaltung von DWL vorgestellt und analysiert.

3.5 Ansätze zur Bewertung und Gestaltung

3.5.1 Untersuchungsbereich und Anforderungsfelder

Unter einer Bewertung wird die Ermittlung und Zuordnung von Wertgrößen verstanden, die als Maßstab für die Erreichung eines Soll-Zustandes des Bewertungsobjekts dienen. Es ist möglich die Wirksamkeit festzustellen, inwiefern also ein solches Bewertungsobjekt geeignet ist, um ein oder mehrere Ziele zu erreichen oder eine Norm im Rahmen des *Solls* zu erfüllen. Die Gestaltung erfolgt hingegen im Anschluss an eine Bewertung und basiert auf den Erkenntnissen aus der Zielwirksamkeit des Bewertungsobjektes. Im Besonderen

zählen dazu die Erarbeitung von Maßnahmen, die Kontrolle der Zielerreichung und die Einkopplung in bestehende Unternehmensvorgänge. (WILD 1982, S. 101–102)

In der Arbeit wird sich den Aspekten der Bewertung im Rahmen von FF 3 gestellt. Nach der Festlegung eines Soll-Zustandes für DWL sollen Maßgrößen erarbeitet werden, die die Zielerreichung bestimmen und somit den Ist-Zustand der Landschaft in den KMU feststellen können. Vor dem Hintergrund der Bewertung erfolgt die Gestaltung durch Handlungsempfehlungen und die Adaption des Beschaffungsprozesses von digitalen Werkzeugen (vgl. FF 4). Da die Bewertung zeitlich und thematisch der Gestaltung vorgelagert ist und eine Gestaltung aus Sicht des Autors nicht ohne die Erkenntnisse aus der Bewertung stattfinden kann, werden vorzugsweise Bewertungsverfahren untersucht. Hierfür werden ein Untersuchungsbereich und Anforderungsfelder festgelegt. Der Untersuchungsbereich ermöglicht die Eingrenzung der zu betrachtenden Verfahren zur Bewertung und Gestaltung von DWL. Die Anforderungsfelder ermöglichen die Beurteilung der Verfahren hinsichtlich einer Anwendung oder Übertragung in diese Arbeit.

Eine Bewertung erfolgt stets innerhalb eines Kontextes (vgl. WILD 1982, S. 103). Die Elemente eines solchen Kontextes sind angelehnt an PIETSCH (2003, S. 27), u. a. das *Ziel*, das *Objekt*, der *Zeitpunkt*, der *Träger* und der *Maßstab*. WILD (1982, S. 103–106) und PIETSCH (2003, S. 27–28) erklären die Elemente wie folgt: Das Ziel stellt das Soll für die Bewertungsobjekte dar und wird zumeist aus vorgelagerten Phasen übernommen. Das Objekt können im Allgemeinen Gegenstände, Ereignisse oder Zustände darstellen. Bei dem Zeitpunkt wird die Frage gestellt, wann die Bewertung erfolgen soll. Unter einem Träger werden einzelne Personen oder Personengruppen verstanden, die die Bewertung durchführen. Der Maßstab umfasst die Skalen zur Erfassung der Ausprägungen von zielrelevanten Merkmalen. Der Untersuchungsbereich kann anhand der Elemente für die Arbeit wie folgt eingegrenzt werden.

In den Rahmen der Untersuchungen sind Verfahren eingeschlossen, die das Ziel einer Bewertung von Informations- und Kommunikationssystemen unter den Gesichtspunkten der Mechatronik verfolgen. Die Arbeit konzentriert sich auf Standard-Software, die unter überschaubaren Anpassungsaufwänden (z. B. in Form von Konfigurationen) für KMU bei IT-Systemhäusern kommerziell erhältlich sind. Sonderlösungen werden nicht untersucht, da es sich dabei um spezifische anhand von Vorgaben eines Unternehmens programmierte Software handelt. Eine Bewertung kann an verschiedenen Stellen im Lebenszyklus einer Software stattfinden. Abhängig vom Zeitpunkt sind unterschiedliche Ansätze entstanden. Aus Sicht des Anwenders findet eine Untersuchung der im Unternehmen vorhandenen Werkzeuglandschaft zumeist statt, wenn bereits die Notwendigkeit zur Einführung oder zum Austausch von Software-Produkten identifiziert wurde. Der

Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen erfüllt diese Bedingung, indem zum einen die Werkzeuglandschaft im Unternehmen analysiert und zum anderen passende Ergänzungen oder Alternativen von kommerziellen Software-Produkten am Markt gesucht werden. In Bezug auf den Lebenszyklus einer Software lässt sich der Beschaffungsprozess zur Phase der Auslieferung zuordnen. Die Bewertungsträger sind Ingenieurinnen und Ingenieure, die aus den Fachabteilungen der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung hervorgehen. Der Maßstab der Bewertung verfolgt eine praxistaugliche Anwendbarkeit für KMU.

Mit den o. g. Einschränkungen des Untersuchungsbereichs können Anforderungen aufgestellt und thematisch in Anforderungsfelder eingeordnet werden. Diese können zur Beurteilung der Verfahren genutzt werden. Dazu kann eine Untergliederung in allgemeine und spezifische Anforderungsfelder vorgenommen werden. Die allgemeinen Anforderungsfelder stellen den Praxiszusammenhang der Verfahren her. Eine Erfüllung soll Akzeptanz durch die KMU des Maschinenbaus fördern, die in einer anwendungsorientierten Wissenschaft maßgeblich für den Erfolg verantwortlich ist. Für die Arbeit wurden die Empfehlungen nach PIETSCH (2003, S. 49–57) auf eine mögliche Übertragung zur Beantwortung von FF 3 und 4 geprüft, ggf. angepasst oder auch ergänzt. Im Ergebnis sind die Anforderungsfelder der *Anwendbarkeit*, der *Praktikabilität*, der *Nachvollziehbarkeit* und der *Ergebnisqualität* entstanden. Die spezifischen Anforderungsfelder ergeben sich aus den Herausforderungen der Mechatronik an die DWL (vgl. Abschnitt 1.2). Im Ergebnis sind die Anforderungsfelder der *Spezifika Maschinenbaubranche*, der *Spezifika Mechatronik* und der *Spezifika digitaler Werkzeuglandschaften* entstanden. Im Folgenden werden die Anforderungsfelder vorgestellt und die abgeleiteten Anforderungen im Detail beschrieben (Tabelle 3.4):

Anwendbarkeit:

Um das Tagesgeschäft von umsetzungsorientierten KMU des Maschinenbaus zu berücksichtigen, muss ein zweckorientierter Realitätsbezug gewahrt bleiben. Die Bereitstellung von anwendungsorientierten Lastenheften zur konkreten Gestaltung von Werkzeuglandschaften soll die Anwendung fördern. Dazu sollten die Verfahren auf verfügbare Daten in den KMU aufbauen.

Praktikabilität:

Die Praktikabilität der Verfahren sollte sichergestellt werden, indem den Anwendern geringe Vorbereitungen und geringe Aufwände abverlangt werden. Das Verhältnis von Aufwand, beispielsweise in Gestalt notwendiger Daten, gegenüber dem Nutzen, der meist in Form der Ergebnisse zutage tritt, sollte geringer oder zumindest angemessen gehalten werden. Auch die zeitnahe Verfügbarkeit der Ergebnisse fördert die Praktikabilität der Ver-

Tabelle 3.4: Anforderungen

Anforderungsfeld	Anforderung
Anwendbarkeit	Lastenhefte zur Anwendung
	Verfügbarkeit notwendiger Daten
Praktikabilität	Geringe Ein- und Vorbereitungszeiten
	Angemessenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis
Nachvollziehbarkeit	Überschaubare Anzahl an Leistungskriterien
	Quantitative Kriterienwahl
Ergebnisqualität	Ableitbarkeit von Handlungsempfehlungen
	Integration in den Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen
Spezifika Maschinenbaubranche	Entwicklungsspezifische Leistungskriterien
	Anwendung für kleine und mittlere Unternehmen
Spezifika Mechatronik	Unterstützung des mechatronischen Entwicklungsprozesses
	Einbeziehung von relevanten Anspruchsgruppen der Mechatronik
Spezifika digitale Werkzeuglandschaft	Berücksichtigung von digitalen Techniken, IT-Funktionen und Artefakten
	Berücksichtigung der Interoperabilität zwischen digitalen Werkzeugen

fahren sowie Ansätze zur Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften in den Unternehmen des Maschinenbaus.

Nachvollziehbarkeit:

Für eine Nachvollziehbarkeit der Verfahren ist Transparenz unerlässlich. Einzelne Schritte sollten klar formuliert und Ein- sowie Ausgänge bestimmt sein. Auch die überschaubare Anzahl an verwendeten Leistungskriterien kann Überblick schaffen. Die beinhalteten Kriterien sollten objektiv und quantitativ abgebildet werden.

Ergebnisqualität:

Die Qualität der Ergebnisse spiegelt sich in konkreten Handlungsempfehlungen für die KMU wider. Die Verfahren sollen in die betrieblichen Prozesse integrierbar sein. Es empfiehlt sich der Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen aufgrund des hohen *Stellhebels* auf die Bebauung von DWL.

Spezifika Maschinenbaubranche:

Das Branchenprofil des Maschinenbaus zeigt, dass ein generelles Vorgehen zur Bewertung und Gestaltung nicht ausreichend ist (vgl. Abschnitt 3.2 und 3.2). Maßgeblich für den Maschinenbau ist dabei, dass die Bedürfnisse der KMU Berücksichtigung finden. Ein Verfahren zur Bewertung von DWL sollte die Struktur der Entwicklung berücksichtigen und eine spezifische Anpassung der Kriterien im Verlauf der Bewertung zulassen.

Spezifika Mechatronik:

Die zunehmende Bedeutung der Mechatronik in den DWL sollte sich auch in den Verfahren widerspiegeln (vgl. Abschnitt 1.1 und 3.2). Wesentliche Bewertungskriterien sind der Mechatronik zuzuordnen, wodurch die Unterstützung eines mechatronischen Entwicklungsprozesses garantiert werden kann. Auch die Anwenderinnen und Anwender der Verfahren sollten aus den Unternehmensbereichen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software stammen.

Spezifika digitale Werkzeuglandschaft:

Mit dem Ziel einer Bewertung von DWL ist es notwendig, einen systemischen Blick auf die Software-Produkte vorzunehmen (vgl. Abschnitt 1.2 und 3.3). Die Ansätze sollen die Anforderungen aus den Entwicklungsprozessen durch geeignete digitale Techniken, IT-Funktionen und Artefakte unterstützen. Innerhalb der Landschaft sind die Informationsflüsse zwischen den Werkzeugen zu berücksichtigen.

Der Untersuchungsbereich ist anhand der Elemente des Ziels, des Objekts, des Zeitpunkts, des Trägers und des Maßstabs eingeschränkt. Die Anforderungsfelder stellen konkrete Anforderungen zur Verfügung, die für einen Vergleich bestehender Verfahren aus den Fachgebieten der Informatik und des Maschinenbaus verwendet werden. Die Ansätze mit dem Ursprung der Informatik sind von allgemeiner Natur und werden auf eine Überführung in den spezifischen Anwendungsfall der Arbeit geprüft. Die Untersuchung der Verfahren aus dem Maschinenbau hingegen werden genutzt, um Defizite aufzuzeigen und für die Entwicklung der Methodik zu motivieren.

3.5.2 Verfahren aus dem Fachgebiet der Informatik

Die digitalen Werkzeuglandschaften sind in erster Linie Software-Systeme und haben ihren Ursprung im Fachgebiet der Informatik. Aus diesem Grund werden Verfahren vorgestellt, die bereits zur Bewertung wie auch zur Gestaltung von Software-Systemen in vergleichbaren Geschäftsprozessen angewandt werden. Aufbauend auf den Überlegungen von PIETSCH (2003) werden Ansätze aus den Bereichen der *grundlegenden*, der *strategie- und wettbewerbsorientierten*, der *prozessorientierten*, *reifegradorientierten* und *architekturbezogenen Verfahren* untersucht:

- *Grundlegende Verfahren:* Die Bewertung von verschiedenen Software-Alternativen ist zumeist ein multikriterielles Entscheidungsproblem (JADHAV & SONAR 2011, S. 559), welches mittels Kriterien und Priorisierungen hinsichtlich der Anforderungen von Unternehmen eine Unterstützung für Entscheidungsträger darstellt. Dazu

werden die bereits in der Betriebswirtschaft bekannten Verfahren der *Nutzwertanalyse* und des *Analytical Hierarchy Process* eingesetzt. Mit dem Ursprung aus der Produktentwicklung wird ebenfalls der Ansatz des *Quality Function Deployment* für die IT-Bewertung untersucht.

- *Strategie- und wettbewerbsorientierte Verfahren*: Zukünftige wirtschaftliche oder auch rechtliche Entwicklungen und die Wirkung von Informationssystemen auf die strategische Erreichung der Unternehmensziele werden im Rahmen von strategieorientierten Verfahren eingeschätzt. Wettbewerbsorientierte Verfahren hingegen konzentrieren sich auf die Beeinflussung der Position des Unternehmens und der Software-Produkte im Vergleich zu den Wettbewerbern. Es werden das *strategische IT-Portfolio*, der *Ansatz nach Norton* und *Softwareorientierte Benchmarks* untersucht.
- *Prozessorientierte Verfahren*: Die prozessorientierten Verfahren zielen darauf ab, die Zeit im Geschäftsprozess mittels des Einsatzes von IT zu erfassen. Es werden das *Hedonic Wage Model*, das *FAOR-Modell* und das *Time-Saving-Times-Salary-Verfahren* betrachtet.
- *Reifegradorientierte Verfahren*: Reifegradmodelle haben sich etabliert, um den Fortschritt von Produkten und Prozessen zu erfassen. Es wird in *technologieorientierte* und *prozessorientierte Reifegradmodelle* unterschieden.
- *Architekturbezogene Verfahren*: Die architekturbezogenen Bewertungsverfahren gehen auf die Tatsache zurück, dass Software-Systeme mehr als nur einer funktionalen Betrachtung bedürfen (KAZMAN ET AL. 1994, S. 3). Die Informationen und Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Softwareprodukten sind bei einer Betrachtung einer Landschaft von hoher Relevanz. Das *Enterprise Architecture Management* setzt dazu auf *Software-Layer* und betrachtet die zeitliche Entwicklung von Software-Landschaften anhand von *blueprints* oder *software maps*. Die *Software Architecture Analysis Method* stellt den alternativen Vergleich auf Basis von Szenarien der Architektur in den Vordergrund.

Die rein monetären Verfahren aus den Bereichen der Gemeinkostenanalyse (z. B. Wertanalysen) oder des Kostenmanagements (z. B. Verfahren des *Total Cost of Ownership*) werden aus den Betrachtungen zur Bewertung DWL ausgeschlossen. Die zu entwickelnde Methodik fokussiert die Integration von mechatronischen Ansätzen in die DWL, deren inhaltlicher Charakter nicht durch monetäre Verfahren Rechnung getragen werden kann. Im Folgenden werden die Verfahren vorgestellt und kritisch gewürdigt:

Tabelle 3.5: Betrachtete Ansätze aus dem Fachgebiet der Informatik

Themenbereich	Verfahren
Grundlegende Verfahren	Nutzwertanalyse
	Analytical Hierarchy Process
	Quality Function Deployment
Strategie- und wettbewerbsorientierte Verfahren	Strategisches IT-Portfolio
	Ansatz nach Norton
	Software-orientierte Benchmarks
Prozessorientierte Verfahren	Hedonic Wage Model
	Functional Analysis of Office Requirements
	Times Saving Times Model
Reifegradorientierte Verfahren	technologieorientierte Reifegradmodelle
	prozessorientierte Reifegradmodelle
Architekturbezogene Verfahren	Software Architecture Analysis Method
	Enterprise Architecture Management

Nutzwertanalyse:

Die Nutzwertanalyse wird beim Vergleich von alternativen Konzepten eingesetzt (ZANGEMEISTER 2014) und lässt sich auf die Bewertung von digitalen Werkzeugen wie beispielsweise PDM-/PLM-Systemen überführen (KRAHTOV 2003). Dabei werden im Allgemeinen Bewertungskriterien festgelegt, hierarchisch strukturiert, durch den Anwender gewichtet und die Erfüllung der Kriterien mittels Punkten eingeschätzt (PONN & LINDEMANN 2011, S. 127; PAHL ET AL. 2006, S. 170-172). Die Nutzwertanalyse zeichnet sich durch eine nachvollziehbare und praktische Anwendung aus.

Analytical Hierarchy Process:

Der Analytic Hierarchy Process stellt ein systematisches Vorgehen zur Entscheidungsunterstützung dar (SAATY 1990). Ursprünglich für sozio-ökonomische und politische Analysen eingesetzt, wird es auch zunehmend zur Auswahl von Software wie beispielsweise zur Fertigungs-/Terminplanung genutzt (JADHAV & SONAR 2011). Dazu werden Kriterien definiert, Hierarchieebenen zugeordnet und ein paarweiser Vergleich angewendet, um Gewichte für die Kriterien festzulegen. Auf der Basis der nach Relevanz geordneten Kriterien wird die Erfüllung der Software-Alternativen untersucht und ausgewählt. Der Analytical Hierarchy Process ist ebenfalls nachvollziehbar und aus Sicht des Autors einfach anzuwenden.

Quality Function Deployment:

Die Quality Function Deployment (QFD) stammt aus der Produktentwicklung und entspricht einem formalisierten sowie systematischen Ansatz, um Produktmerkmale festzulegen (REINHART 1996, S. 53). Das Verfahren verbindet dazu die Anforderungen des Kunden an ein Produkt mit der ingenieurtechnischen Umsetzung unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten und Zielkonflikten. Die QFD nutzt hierfür Matrizen zur Aufbereitung von Daten, zur Abbildung und zur Dokumentation. Eine Übertragung des QFD-Ansatzes in die Informatik findet repräsentativ für PLM-Werkzeuge mit dem Ansatz von EIGNER & STELZER (2008, S. 399–401) statt. Das Verfahren wird genutzt, um die Prozesse eines Unternehmens den Schichten der PLM-Architektur (z. B. IT-Funktionalitäten) zuzuordnen. In der Folge können unternehmensspezifische Soll-Konzepte für den Einsatz von PLM-Werkzeugen abgeleitet werden. Die Vorteile des Verfahrens liegen in dem nachvollziehbaren Zusammenführen von geforderten Merkmalen und der Umsetzung. Die Abhängigkeiten in den IT-Architekturen können dargestellt und analysiert werden.

Strategisches IT-Portfolio:

Das strategische IT-Portfolio nach MCFARLAN (1981) betrachtet die Wirkung eines Einsatzes von digitalen Werkzeugen auf die Unternehmensstrategie. Es wird ein Strategiegitter vorgeschlagen, welches die Unternehmen verwenden können, um digitale Werkzeuge einzuordnen. In dem Strategiegitter werden die strategischen Auswirkungen der digitalen Werkzeuge erfasst. Der zielgerichtete Einsatz von IT wird durch die Beantwortung von Fragen ermöglicht. Die Methode ist nachvollziehbar sowie anwendbar und zeigt aufgrund der Berücksichtigung der strategischen Orientierung des Unternehmens Potenziale für einen Einsatz im Maschinenbau.

Ansatz nach Norton:

Das entwickelte Verfahren von NORTON (1985) erfolgt unter der Annahme, dass die digitalen Werkzeuge nur eingesetzt werden, um die Unternehmensziele zu erreichen. Der Ansatz verläuft in drei Phasen: Beginnend mit der Festlegung von Unternehmenszielen werden im Anschluss Unternehmensbereiche abgeleitet (sogenannte *pressure points*), die den höchsten Handlungsbedarf im Unternehmen aufweisen. Auf dieser Grundlage werden diejenigen Bereiche festgelegt (sogenannte *grey cells*), in die eine Investition in digitale Werkzeuge erfolgen soll. Das Verfahren zeichnet sich durch Praktikabilität und hohe Ergebnisqualität aus. Eine Anwendung für den Maschinenbau kann aufgrund des unternehmensbezogenen Vorgehens sinnvoll sein.

Software-orientierte Benchmarks:

Die Benchmark-Verfahren von Software werden mit den Zielen der Quantifizierung sowie Schließung von Leistungslücken und der Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen

mittels *benchmarkorientierten Optimierungen* durchgeführt (BRASAT 2012; CAMP 1994). Ein allgemeingültiges Verfahren wird von CAMP (1994) definiert, indem er das Untersuchungsobjekt mittels Referenzklassen festlegt und die Referenzobjekte auswählt. Es wird unterschieden in unternehmensinterne, konkurrenzbezogene oder branchenbezogene Benchmarks. Durch Kennzahlen zur Beschreibung der Güte des Untersuchungsobjektes und der Spezifizierung der detaillierten Bewertungsmethode können Leistungslücken ermittelt und Maßnahmen definiert werden. Das Benchmarking zeigt ein nachvollziehbares, praktikables Vorgehen auf, das auch für Software im Maschinenbau angewandt werden kann.

Hedonic Wage Model:

Das Hedonic Wage Model nach PIETSCH & KLOTZ (1989, S. 190) nimmt an, dass unproduktive Zeitanteile in den Tätigkeiten der Mitarbeiter durch IT reduziert und produktivere Anteile ausgeweitet werden können. Es wird ein zweistufiges Verfahren vorgeschlagen, wobei zuerst das Tätigkeitsprofil analysiert und im Anschluss eine Stellbewertung vorgenommen wird. Für das Tätigkeitsprofil wird eine Matrix zur Bestimmung des Wertes einer jeden Tätigkeit entlang des Geschäftsprozesses erarbeitet. Die Stellenbewertung ist möglich, indem ein Vergleich zwischen den alten und neuen Tätigkeitswerten vorgenommen und der Gewinn durch einen Einsatz von IT ableitet wird. Das Vorgehen ist flexibel sowie nachvollziehbar und der praktische Einsatz konnte durch Erfahrungsberichte nachgewiesen werden (vgl. PIETSCH 2003, S. 167).

Functional Analysis of Office Requirements:

Das Functional Analysis of Office Requirements ist ein Organisationsanalyseverfahren, welches die Gestaltung von Informationssystemen zum Ziel hat (HANSSEN 2010, S. 123). Die Methode erfolgt schrittweise, indem das Technologiepotenzial durch einen Soll-Ist-Vergleich ermittelt, die Wirkungen des Einsatzes von Informationssystemen kriterienbezogen prognostiziert (z. B. auf Grundlage des Ressourcenaufwandes), der potenzielle Nutzeneffekt für die Ziele des Unternehmens herausgearbeitet und eine Anforderungsliste als Grundlage für den IT-Systementwurf erstellt wird (HANSSEN 2010, S. 124; PIETSCH 2003, S. 123). Das Vorgehen ist ein flexibles, breit einsetzbares Verfahren mit nachvollziehbaren Schritten, aber verlangt hohe Aufwände bei der Datenerhebung von den Anwendern.

Times Saving Time Salary Model:

Das Times Savings Times Salary Model nach SASSONE (1987) basiert auf einem Ansatz, der die gesamte Informationsverarbeitungs- und Kommunikationssysteme einer Organisation einem Wert zuordnet. Als Voraussetzung für einen Einsatz des Modells gilt, dass ein Unternehmen nach Effizienz in der Ressourcenzuordnung und nach der geeigneten

Besetzung der Funktionen strebt. Die durch IT eingesparten Arbeitszeiten werden mit erfolgswirksamer zusätzlicher Arbeit gefüllt, die bisher nicht erbracht wurde (PIETSCH 2003, S. 132–134). Es handelt sich dabei um ein einfaches Verfahren der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Informationssystemen in Unternehmen mit einer hohen Abhängigkeit gegenüber der Einschätzungen der Qualifikation des Anwenders. In Bezug auf einen Einsatz zur Bewertung von DWL lässt das Verfahren die Berücksichtigung der Leistung vermissen, die durch die digitalen Werkzeuge erbracht werden kann. Es zeichnet sich durch eine eingeschränkte Transparenz aus.

Technologieorientierte Reifegradmodelle:

Die technologieorientierten Reifegradmodelle erlauben es, die Fähigkeiten einer Software bis zu deren Anwendung und Einsatz festzustellen (BULLINGER 2008, S. 145). Der Einsatz von Reifegradmodellen liegt vornehmlich in der Entwicklung oder Integration neuartiger Technologien (MANKINS 1995). Ein Beispiel für ein Reifegradmodell ist das Technology Readiness Level (SPRAGUE 2001, S. 1). Auf deren Basis haben sich vielfältige Derivate des Ansatzes herausgebildet, so auch zur Bewertung von Software-Produkten (SPRAGUE 2001, S. 1). Die technologieorientierten Reifegradmodelle basieren auf messbaren Kennzahlen, sogenannten Indikatoren, die oftmals in Form von Fragebögen vorliegen. Diese ermöglichen es je nach Erfüllung, eine Einordnung der Software in Stufen vorzunehmen (BROUSSEAU ET AL. 2009, S. 258–259; ARMAN ET AL. 2006, S. 9–17). Ein Beispiel für einen solchen Ansatz ist das Usability-Reifegradmodell nach WOYWODE ET AL. (2012), welches die Benutzerfreundlichkeit der Software aufeinander aufbauenden Stufen zuordnet. Reifegradmodelle zeichnen sich durch eine hohe Ergebnisqualität aus, da diese mit konkreten Kriterien unterlagert werden können.

Prozessorientierte Reifegradmodelle:

Aufgrund der zunehmenden Sichtbarkeit von Prozessmodellen in den digitalen Werkzeugen (WEIDENHAUPT 2001, S. 42–44) werden Bewertungsansätze untersucht, die aus dem Management von Geschäftsprozessen stammen. Solche Reifegradmodelle werden angewendet, um die Schwachstellen zu erkennen, die Ursachen dafür aufzudecken und die Qualität zu überwachen und zu steigern (HOFFMANN 2013, S. 519; KREHMER 2012, S. 35–36; WEINZIERL 2006, S. 20–26). Prototypisch soll in diesem Zusammenhang das Reifegradmodell für DWL zur Prozessunterstützung des IT-Service-Management nach RICHTER (2013) erwähnt sein, der die Reifegrade definiert und dabei nach den Phasen der Anforderungen, der Entwicklung, der Einführung/Verbesserung, des Betriebs und der Stilllegung im Lebenszyklus einer Software unterscheidet. Auch prozessorientierte Verfahren zeichnen sich durch eine hohe Ergebnisqualität aus, allerdings mangelt es dabei oftmals an der Berücksichtigung der IT-Architektur der Software-Systeme.

Enterprise Architecture Management:

Die Planung, das Management und die Verwaltung von Software-Landschaften ist Gegenstand des Enterprise Architecture Management (BUCKL ET AL. 2009, S. 1). Es haben sich auf diesem Feld zweckorientiert eine Vielzahl an Verfahren in Wissenschaft (vgl. BUCKL ET AL. 2008; BUCHER ET AL. 2006) und Industrie (vgl. ENGELS & VOSS 2008; DERN 2006) entwickelt. Die Verfahren besitzen einen allgemeinen Charakter und beziehen sich auf alle Arten von Geschäftsprozessen in Unternehmen. Es werden der Business, Application und Infrastructure Layer aufgespannt und unter verschiedenen zeitlichen Aspekten (Ist-, Plan- und Soll-Landschaften) betrachtet (ROHLOFF 2005). Als ein markantes Merkmal des Ansatzes sind Software-Landkarten zu verstehen, meist als *blueprints* (ROHLOFF 2005) oder *software maps* (BUCKL ET AL. 2009) bezeichnet. Das systematische Planen mittels der Ansätze des Enterprise Architecture Management zielt darauf ab, Werkzeuglandschaften in ihrer Gesamtheit in einem Unternehmen zu steuern und zu lenken. Sie schaffen Transparenz und fungieren als Entscheidungsgrundlage für eine ganzheitliche IT-Bebauung.

Software Architecture Analysis Method:

Bei der Software Architecture Analysis Method handelt es sich um ein fundamentales Verfahren zur methodischen Software-Analyse basierend auf der Szenariotechnik und der Integration von verschiedenen Stakeholdern in den Auswahlprozess von Softwarearchitekturen (KAZMAN ET AL. 1994). Vor dem Hintergrund dieses Ansatzes entstanden eine Vielzahl weiterer Leistungsbewertungsverfahren für Software-Systeme, welche jedoch vorwiegend während der frühen Entwicklungsphase der Software-Architektur angewandt werden, so beispielsweise die Cost Benefit Analysis Method oder das Architecture Quality Assessment (BLAU ET AL. 2007). Die Software Architecture Analysis Method schlägt ein schrittweises Vorgehen vor, welches mit der funktionalen Zerlegung der Software-Architektur beginnt. Mittels einer Zuordnung von Qualitäts- und Testkriterien zu strukturellen Software-Modulen oder -Paketen der Software-Architektur kann der Wertbeitrag zum Gesamtziel der Software ermittelt werden. Der Ansatz sowie darauf aufbauende Derivate konzentrieren sich auf ein einzelnes Software-Produkt und vernachlässigen dabei das Zusammenspiel mit weiteren Systemen.

3.5.3 Verfahren aus dem Fachgebiet des Maschinenbaus

Neben den Verfahren aus der Informatik sind spezifische Ansätze für den Maschinenbau entstanden. Es werden Verfahren vorgestellt, die eine Bewertung und Gestaltung von DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik im Maschinenbau verfolgen. Ana-

log zum Fachgebiet der Informatik werden die Anforderungen als Beurteilungskriterien herangezogen. Folgende fünf Verfahren werden untersucht:

Ansatz nach MAURMAIER & DENCOVSKI (2010):

MAURMAIER & DENCOVSKI (2010) klassifizieren verschiedene Werkzeuge in der Entwicklung von Maschinen und Anlagen, indem sie sogenannte *Engineering Challenges* aufstellen, welche Herausforderungen an die digitalen Werkzeuge im Lösungsgeschäft des Anlagenbauers darstellen. Es werden maßgeblich fünf Herausforderungen dargestellt, wie beispielsweise die projektinterne und -übergreifende *Wiederverwendung* von mechatronischen Komponenten und Modulen. MAURMAIER & DENCOVSKI (2010) nutzen die *Engineering Challenges*, um Schlüsselkonzepte abzuleiten und den Klassen null bis vier zuzuordnen: Die *Klasse null* repräsentiert ein digitales Werkzeug, welches über keines der erarbeiteten Schlüsselkonzepte verfügt. Die *Klasse eins* repräsentiert eine implizite, die *Klasse zwei* eine explizite, die *Klasse drei* eine umfangreiche sowie explizite und *Klasse vier* die generische Unterstützung des Anwenders im Lösungsgeschäft. Der Beitrag konzentriert sich auf die funktionale Sicht von digitalen Werkzeugen, wobei der Entwicklungsprozess kaum in die Betrachtungen einbezogen wird. Weiterhin wird sich auf ein allumfassendes digitales Werkzeug bezogen, mit der Folge, dass die Architektur der digitalen Werkzeuglandschaften, wie sie im Maschinenbau vorherrscht, nicht berücksichtigt wird.

Ansatz nach HUNDT ET AL. (2011):

HUNDT ET AL. (2011) führen mechatronische Konzepte zur Modellierung und zum Umgang mit mechatronischen Teil- oder Gesamtsystemen ein, identifizieren insgesamt 18 mechatronische Aktivitäten und leiten Modellierungskonzepte (engl. „mechatronic modelling concepts“) ab. Als ein Beispiel für ein mechatronisches Modellierungskonzept nennen HUNDT ET AL. (2011) die Betrachtung von mechatronischen Systemen aus verschiedenen Blickwinkeln der Disziplinen (z. B. aus Sicht des Automatisierungstechnikers). So werden jeder Disziplin unterschiedliche Informationen im Verlauf des Entwicklungsprozesses bereitgestellt. Der maßgebliche Beitrag von HUNDT ET AL. (2011) liegt in der Systematisierung von mechatronischen Aktivitäten und Modellierungskonzepten, die als Anforderungen an die digitalen Werkzeuge gestellt werden und als Bewertungskriterien dienen. Die Bewertungskriterien weisen einen hohen Bezug zur Mechatronik auf, jedoch mangelt es der Methode an Spezifika der Entwicklung und der Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Werkzeugen einer Landschaft.

Ansatz nach DRATH & BARTH (2013):

Der Ansatz von DRATH & BARTH (2013) erarbeitet ein Reifegradmodell, welches proprietäre und neutrale Datenmodelle inkludiert und als syntaktische Voraussetzung das

CAEX-Datenmodell anwendet. Mit dem Ziel der semantischen Standardisierung werden vier Reifegradstufen zur Zusammenarbeit der digitalen Werkzeuge abgeleitet, die eine schrittweise Standardisierung vorschlagen: In *Stufe eins* existieren ausschließlich private Daten und es gibt keinerlei lokale oder globale Vereinbarungen zwischen den Quell- und Zielwerkzeugen. In *Stufe zwei* können Werkzeughersteller und -nutzer unmittelbar Export- und Import-Partnerschaften eingehen. Es entstehen gemischte Datenmodelle aus standardisierten und privaten Formaten. Die *Stufe drei* wird erreicht, wenn alle benötigten Daten-Teilmodelle durch neutrale Datenmodelle aufgelöst werden, wobei private Transformationsroutinen zwischen den Werkzeugen nicht mehr notwendig sind. Die *Stufe vier* setzt auf ein gemeinsames, standardisiertes und neutrales Datenmodell, indem ein übergreifender und internationaler Standard eingeführt wird. DRATH & BARTH (2013) schaffen es, eine Modellvorstellung für eine weitreichende Problematik im Austausch von Informationen zwischen Werkzeugen zu schaffen. Als Prämisse nehmen diese einen syntaktischen Standard in Form des CAEX-Formates als Grundlage und zeigen einen schrittweisen Weg zur Standardisierung des Datenaustausches auf semantischer Ebene. Der Ansatz vermisst spezifische Handlungsempfehlungen, wie DWL von einer Reifegradstufe zur nächsten gelangen, die Verknüpfung zwischen Prozess und Werkzeug lässt die Vielfalt der Unternehmen im Maschinenbau unberücksichtigt.

Ansatz nach JÄGER ET AL. (2013):

JÄGER ET AL. (2013) setzen sich zum Ziel, eine automatische Komposition des *Workflows* von digitalen Engineering-Werkzeugen zu ermöglichen. Mittels einer zusätzlichen Abstraktionsebene und einer Zuordnungsmatrix zwischen *Workflow*-Aktivitäten und den Werkzeugfunktionen soll der Anwender digitale Werkzeuge ohne Expertenwissen an den Entwicklungsprozess anpassen. Das Verständnis von einem Workflow nach JÄGER ET AL. (2013) ähnelt den Aktivitäten im mechatronischen Entwicklungsprozess (z. B. Erfassen von Anforderungen). Innerhalb des Lösungsraums der Werkzeugfunktionen werden beispielhaft das *Erstellen und Ändern* von Artefakten und die Funktionen der *Strukturierung* und *Kollaboration* erwähnt. JÄGER ET AL. (2013) verknüpfen die Sicht des Entwicklungsprozesses und die Anforderungen an die digitalen Werkzeuge. Auf Basis der erarbeiteten Matrix kann der Workflow mit verschiedenen Werkzeugen unterlagert werden, die ebenfalls durch die Matrix einer spezifischen Anpassung unterzogen werden können. In dem Ansatz wird ein monolithisches Werkzeug skizziert, ohne die spezifische Anpassung der Werkzeuge zu betrachten und den Bezug zur Mechatronik herzustellen. Die Informationsflüsse zwischen den Werkzeugen bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

Ansatz nach LÜDER ET AL. (2013):

LÜDER ET AL. (2013) stellen sich der Herausforderung einer Bewertung der Mechatronik

in der digitalen Werkzeuglandschaft in der Art, dass sie zum einen die Relevanz und damit auch die Reihenfolge mechatronischer Vorgehensweisen herausstellen. Das Ziel des Beitrags liegt in der Systematisierung von sogenannten *mechatronischen Konzepten*, die in digitalen Werkzeugen vorhanden sein sollten. In diesem Zusammenhang unterscheiden LÜDER ET AL. (2013) zwischen mechatronischen Modellierungskonzepten und Entwurfsaktivitäten. Die Modellierungskonzepte inkludieren methodische Schritte zur Abbildung eines mechatronischen Systems und deren Module bzw. Einheiten unter Berücksichtigung ihrer Informationsstruktur und -zusammenhänge. Die Entwurfsaktivitäten repräsentieren eine „(...) Aktion innerhalb des mechatronischen Entwurfsprozesses, die einer oder mehreren Phasen des Prozesses zugeordnet ist und Einfluss auf das Design des mechatronischen Systems (...)“ (LÜDER ET AL. 2013, S. 3) ausübt. Wesentlich ist die Repräsentation von Teilen des Gesamtsystems in ihrer digitalen Form – LÜDER ET AL. (2013, S. 3) spricht dabei von einem *digitalen Schatten*, der sich ausgehend vom Entwicklungsprozess in den unterstützenden digitalen Werkzeugen widerspiegelt. Der Beitrag systematisiert wesentliche Konzepte, die in den digitalen Werkzeuglandschaften enthalten sein sollten, jedoch wird kein strukturiertes Vorgehen zur Bewertung aufgezeigt und die unternehmensspezifischen Aspekte bleiben unberücksichtigt.

3.5.4 Beurteilung der Verfahren

Auf der Basis der Untersuchungen von bestehenden Verfahren aus den Fachgebieten der Informatik und des Maschinenbaus können Handlungsbedarfe für die Methodik der Arbeit abgeleitet werden. Dazu werden die Verfahren quantitativ mittels der Anforderungsfelder beurteilt, Defizite herausgestellt und der Handlungsbedarf für die Methodik abgeleitet. Für die Darlegung der Erkenntnisse wird die Unterteilung in die Fachgebiete beibehalten. Die Skala zur Beurteilung der Ansätze geht über einen Vergleich der Vorteile und Nachteile hinaus. Es findet eine Einschätzung anhand von drei Stufen statt: keine, teilweise und vollständige Erfüllung des Anforderungsfeldes (Tabelle 3.6 und Tabelle 3.7).

Die Ansätze aus dem Fachgebiet der Informatik stellen den Anwendern ein nachvollziehbares und praktikables Instrumentarium zur Verfügung. Die Verfahren sind logisch strukturiert und enthalten einen schrittweisen Aufbau. Die Anforderungsfelder der Nachvollziehbarkeit und der Ergebnisqualität sind in den Verfahren teilweise oder vollständig erfüllt. Die Ansätze sind zu allgemein und weisen keine spezifischen Betrachtungen für die digitalen Werkzeuglandschaften zur Unterstützung der mechatronischen Entwicklung im Maschinenbau auf. Aus diesem Grund wurde das Potenzial zur Adaption der Verfahren an den spezifischen Anwendungsfall der Arbeit eingeschätzt, im Besonderen

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 3.6: Beurteilung der Verfahren aus dem Fachgebiet der Informatik

Kategorie	Bewertungsverfahren	Anforderungsfeld						
		Anwendbarkeit	Praktikabilität	Nachvollziehbarkeit	Ergebnisqualität	Spezifika Maschinenbaubranche*	Spezifika Mechatronik*	Spezifika digitaler Entwicklung*
Grundlegende Verfahren	Nutzwertanalyse	◐	●	●	◐	●	○	○
	Analytical Hierarchy Process	◐	◐	●	◐	●	○	○
	Quality Function Deployment	◐	◐	●	◐	●	◐	●
Strategie- und wettbewerbsorientierte Verfahren	Strategisches IT-Portfolio	●	●	●	◐	○	○	○
	Ansatz nach Norton	◐	◐	●	◐	◐	○	○
	Software-orientierte Benchmarks	●	◐	●	◐	◐	◐	○
Prozessorientierte Verfahren	Hedonic Wage Model	○	◐	●	○	○	◐	○
	Functional Analysis of Office Requirements	◐	◐	●	●	○	◐	◐
	Time Saving Times Salary Model	○	◐	●	○	○	◐	○
Reifegradorientierte Verfahren	Technologieorientierte Reifegradmodelle	●	◐	◐	◐	◐	●	●
	Prozessorientierte Reifegradmodelle	●	◐	◐	◐	◐	●	●
Architekturbezogene Verfahren	Enterprise Architecture Management	◐	◐	●	◐	○	◐	●
	Software Architecture Analysis Method	◐	○	●	◐	◐	○	●

* Da die Verfahren aus der Informatik stammen und bisher nicht für die Problemstellung der Arbeit adaptiert sind, wird an dieser Stelle das Potenzial für eine Übertragung in den Anwendungsfall eingeschätzt.

Erfüllungsgrad der Anforderungsfelder (Anzahl von vollständig erfüllten Anforderungen je Feld):

○ nicht erfüllt (keine von zwei) ◐ teilweise (eine von zwei) ● vollständig (zwei von zwei)

in den Anforderungsfeldern der Spezifika der Maschinenbaubranche, der Mechatronik und der digitalen Werkzeuglandschaften (vgl. Tabelle 3.6). Es ist feststellbar, dass die reifegradorientierten Verfahren geeignet sind, um die Kriterien aus der Mechatronik an digitale Werkzeuglandschaften modellhaft abzubilden. Auch stellt das Quality Function Deployment ein vielversprechendes Verfahren dar. Aufgrund der Vorzüge zur Analyse und Darstellung von Abhängigkeiten von Produktmerkmalen ist auch eine Übertragung zur Modellierung der Wechselwirkungen zwischen den digitalen Werkzeugen innerhalb einer Landschaft denkbar.

In analoger Weise zu der Beurteilung der Verfahren aus dem Fachgebiet der Informatik werden die Ansätze aus dem Maschinenbau einer quantitativen Untersuchung mittels der Anforderungsfelder unterzogen (vgl. Tabelle 3.7). Im Gegensatz zu den Verfahren aus der Informatik weisen die spezifischen Ansätze eine defizitäre Unterstützung in der Praxis auf. Die Verfahren sind nicht ausgereift, es mangelt an Struktur und einer praxistauglichen Umsetzung. Die Verfahren weisen unterschiedliche Schwerpunkte in der Bewertung auf. Während der Ansatz nach DRATH ET AL. (2011) eine systemische Betrachtung der digitalen Werkzeuge in der Landschaft verfolgt, zeigt der Ansatz nach HUNDT ET AL. (2011) einen Fokus auf die Ableitung von mechatronischen Konzepten zur Erfassung der Mechatronik. Eine gemeinsame Betrachtung von mechatronischen Entwicklungsprozessen und der DWL erfolgte bisher nicht.

Für die Arbeit kann geschlussfolgert werden, dass die Ansätze des Quality Function Deployment und der reifegradorientierten Verfahren Potenziale für eine Übertragung aufweisen. Diese können für die Beantwortung von FF 3 und 4 hilfreich sein. Aus Sicht des Autors ist eine einfache Übernahme in den Anwendungsfall als nicht sinnvoll zu erachten, sondern müssen die Ansätze angepasst und in den Ablauf der Methodik integriert werden. Die Verfahren aus dem Maschinenbau hingegen zeigen Defizite in der Anwendbarkeit, der Praktikabilität und der Nachvollziehbarkeit auf. Diese dienen zur Motivation und zur Abgrenzung für die Arbeit und werden im Folgenden nicht weiterverfolgt.

3.6 Fazit

Die problemrelevanten Themengebiete in Wissenschaft und Technik wurden auf Basis der Forschungsfragen in Abschnitt 3.1 zusammengestellt. Es wurde gegliedert in die Entwicklungsprozesse im Maschinenbau (vgl. FF 1 und 2), die DWL zur Unterstützung der Entwicklung (vgl. FF 1), die Anpassung an die Entwicklungssituation (vgl. FF 2) und die Ansätze zur Bewertung und Gestaltung (vgl. FF 3 und 4).

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 3.7: Beurteilung der Verfahren aus dem Fachgebiet des Maschinenbaus

Bewertungsverfahren	Anforderungsfeld						
	Anwendbarkeit	Praktikabilität	Nachvollziehbarkeit	Ergebnisqualität	Spezifika Maschinenbaubranche	Spezifika Mechatronik	Spezifika digitaler Entwicklung
Ansatz nach MAURMAIER & DENCovski (2010)	●	●	●	●	●	●	●
Ansatz nach HUNDT ET AL. (2011)	●	●	○	○	●	●	○
Ansatz nach DRATH & BARTH (2013)	○	○	●	●	○	○	●
Ansatz nach JÄGER ET AL. (2013)	○	○	●	○	●	○	●
Ansatz nach LÜDER ET AL. (2013)	●	○	○	●	●	●	○

Erfüllungsgrad der Anforderungsfelder (Anzahl von vollständig erfüllten Anforderungen je Feld):

- nicht erfüllt (keine von zwei)
- teilweise (eine von zwei)
- vollständig (zwei von zwei)

In Abschnitt 3.2 wurden die Besonderheiten der Branche des Maschinenbaus vorgestellt (z. B. Bedeutung der Funktionsvalidierung). Für die Methodik konnte herausgestellt werden, dass eine universelle Bewertung und Gestaltung von DWL nicht sinnvoll ist. Aufgrund der Vielfalt der KMU ist es notwendig, Kriterien und Vorgehen der Bewertung- und Gestaltungsmethodik an die Entwicklung der KMU anzupassen. Anschließend fand die Einordnung der Entwicklungsprozesse des Maschinenbaus in den Lebenszyklus von Produktionssystemen statt. Als wesentliche Phasen wurden das Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten identifiziert, wodurch der Betrachtungsbereich der Methodik festgelegt wurde. Im Anschluss wurden Vorgehensmodelle der Mechatronik untersucht. Es wurden die Vielzahl und wesentlichen Merkmale herausgestellt. Im Ergebnis zeigte sich, dass es den Vorgehensmodellen an der Berücksichtigung der informationstechnischen Umsetzung und Gegebenheiten in den KMU mangelt. Für die Methodik konnte festgestellt werden, dass eine eigenständige Systematisierung des Soll-Zustandes von DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik notwendig ist.

Die DWL zur Unterstützung der Mechatronik wurde in Abschnitt 3.3 thematisiert. Es fand eine Einordnung in die Entwicklung statt. Dabei konnten für die Methodik die digitalen Werkzeuge und die Informationsflüsse als wesentliche Bestandteile einer DWL definiert

werden. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die Methodik die Abhängigkeiten der DWL zu den Phasen und Aktivitäten des Entwicklungsprozesses und zu den Artefakten berücksichtigen muss. Im Anschluss konnten die Nutzenpotenziale und IT-Funktionen von digitalen Werkzeugen aufgezeigt werden. Es konnte herausgestellt werden, dass die DWL wertvolle Beiträge für eine effiziente und effektive Entwicklungsarbeit leisten. Für die Methodik müssen die IT-Funktionen in der Modellbildung des Soll-Zustandes erfasst werden (z. B. Suchen und Strukturieren von Produktinformationen) und eine Verknüpfung mit dem Prozess und den Artefakten hergestellt werden. Im Anschluss daran wurden die Architektur von DWL dargelegt und typische digitalen Techniken charakterisiert (z. B. MCAD). Im Ergebnis konnte für die Berücksichtigung der Techniken in der Methodik dieser Arbeit motiviert werden. Es wurden ebenfalls die Bestrebungen zur Integration und zur Interoperabilität dargelegt. Dabei wurden die Informationsflüsse anhand des Datenaustauschs typisiert (z. B. systemneutral) und wesentliche Produktmodelle für die Mechatronik (z. B. AutomationML) dargelegt. Es konnte abgeleitet werden, dass die Informationsflüsse in der Methodik zu berücksichtigen sind. Auch ist ein pauschales Vorgehen für die KMU als nicht sinnvoll erachtet worden. Die Methodik sollte vielmehr den aktuellen Ist-Zustand erfassen und anschließend Handlungsempfehlungen ableiten. Abschließend wurden Referenzmodelle aus artverwandten Bereichen vorgestellt und hinsichtlich einer Übertragung in die Arbeit analysiert. Folglich wurde festgestellt, dass die Methodik bei der Modellbildung an der Digitalen Fabrik nach SCHACK (2007) angelehnt werden kann. Es kann das Konzept der Sichten übertragen werden (z. B. Informationsreferenzsicht), wobei eine Ausgestaltung für DWL eigenständig zu erarbeiten ist.

In Abschnitt 3.4 wurden Ansätze zur Beschreibung einer Entwicklungssituation und zur Anpassung von Vorgehensweisen auf deren Basis erläutert. Da es bisher kein Vorgehen zur Anpassung von DWL bekannt ist, wurde sich an artverwandten Bereichen orientiert. Für die Methodik konnte der Ansatz nach DYLLA (1991) zur Entwicklung der Merkmale und Ausprägungen einer Entwicklungssituation identifiziert werden. Das prinzipielle Vorgehen nach SPIEGELBERGER (2011) und BROY & RAUSCH (2005) zur Anpassung von Modellen kann für die Arbeit transferiert werden. Hierfür ist die Integration in den Ablauf der Methodik notwendig.

Die Verfahren zur Bewertung und Gestaltung von DWL wurden in Abschnitt 3.5 analysiert. Dazu wurde der Untersuchungsbereich anhand des Kontextes einer Bewertung eingegrenzt (z. B. Zeitpunkt). Mit dieser Einschränkung sind Anforderungen aufgestellt und in Anforderungsfelder eingeordnet worden. Die Anforderungsfelder wurden auf Grundlage des Ziels der Arbeit (Abschnitt 1.4) und der herausgearbeiteten Defizite des gegenwärtigen Forschungsstandes von Wissenschaft und Technik (Abschnitt 3.2 bis 3.4) zusam-

3 Stand der Wissenschaft und Technik

mengestellt und erläutert. Es fand eine Aufgliederung in allgemeine (z. B. Anwendbarkeit) und spezifische Anforderungsfelder (z. B. Spezifika der Maschinenbaubranche) statt. Die Anforderungen und Anforderungsfelder wurden genutzt, um die Verfahren zur Bewertung und Gestaltung quantitativ für einen Einsatz in der Methodik zu beurteilen. Dazu wurden insgesamt 13 Verfahren aus dem Fachgebiet der Informatik und fünf Verfahren aus dem Fachgebiet des Maschinenbaus untersucht. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass eine Orientierung an den Ansätzen der QFD und der reifegradorientierten Verfahren aus der Informatik für die Erarbeitung der Methodik vorgenommen werden kann. Die Ansätze aus dem Maschinenbau hingegen dienten der Abgrenzung in der Arbeit.

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

4.1 Übersicht

In der Arbeit wird eine Methodik zur Bewertung und Gestaltung von DWL im Maschinenbau erarbeitet. Es werden die Inhalte der Veröffentlichungen DRESCHER & REINHART (2013) aufgegriffen. Die Forschungsfragen (FF 1 bis FF 4) werden durch die Phasen und die Schritte der Methodik beantwortet (Abbildung 4.1). Die Phase 1 stellt den Aufbau eines Referenzmodells von DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik (vgl. FF 1). Die Phase 2 zeigt ein Vorgehen zur Anpassung des Referenzmodells an die Situation in der Entwicklung auf (vgl. FF 2). In der Phase 3 wird der Soll-Ist-Vergleich mittels einer Bewertung der digitalen Werkzeuglandschaft vorgenommen (vgl. FF 3). Die Gestaltung des Beschaffungsprozesses erfolgt in Phase 4 und ermöglicht die wirkungsvolle Integration der Handlungsempfehlungen (vgl. FF 4). Die Phasen der Methodik können im Allgemeinen dem Bewertungsprozess nach WILD (1982, S. 104) zugeordnet werden und greifen im Speziellen folgende Erkenntnisse aus vorangegangenen Kapiteln der Arbeit auf:

Phase 1: Aufbau des Referenzmodells

Für den Aufbau des Referenzmodells sind maßgeblich die Erkenntnisse aus der mechatronischen Entwicklung aufgegriffen (vgl. Abschnitt 3.2). Für eine Beschreibung der informationstechnischen Rahmenbedingungen findet eine Orientierung an den Ansätzen zur Modellierung von Referenzmodellen statt (vgl. Abschnitt 3.3). Im Besonderen wird der Ansatz der Digitalen Fabrik nach SCHACK (2007) genutzt, um die Referenzsichten aufzubauen. Die Referenzanforderungen im Modell sind anhand des Vorgehens zur Beantwortung von FF 1 zusammengestellt (vgl. Abschnitt 1.6). Das Referenzmodell wird in Abschnitt 4.2 erläutert.

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau



Legende:

Phase in der Methodik
 Schritt in einer Phase

* – Bewertungsprozess nach WILD (1982, S. 104)
 DWL – Digitale Werkzeuglandschaft

Abbildung 4.1: Übersicht der Methodik

Phase 2: Anpassung an die Situation

Für die Erfassung der Situation in der Entwicklung wird sich an den Besonderheiten der Branchen des Maschinenbaus orientiert (vgl. Abschnitt 3.2). Es entstehen Merkmale und Ausprägungen zur Beschreibung einer Situation in der Entwicklung. Die Erkenntnisse aus dem Vorgehen zur Beantwortung von FF 2 (vgl. Abschnitt 1.6) werden genutzt, um den Einfluss auf das Referenzmodell zu bestimmen. In der Konsequenz kann das Referenzmodell für die Bewertung und Gestaltung in Phase 3 und 4 auf problemrelevante Gebiete eingeschränkt werden. Das Vorgehen zur Anpassung an die Entwicklungssituation wird in Abschnitt 4.3 dargelegt.

Phase 3: Bewertung der Ist-Landschaft

Für die Bewertung von DWL können die Verfahren des Quality Function Deployment und des Reifegradmanagements aufgegriffen werden (vgl. Abschnitte 3.5). Im Ergebnis ist die Kartographie von DWL entstanden. Diese beinhaltet die Einordnung in mechatronische Fähigkeitsstufen und die Quadranten der Interoperabilität. Das Verfahren zur Bewertung der Ist-Landschaft wird in Abschnitt 4.4 beschrieben.

Phase 4: Gestaltung der Beschaffung

Nach der Bewertung können in der Phase 4 die Handlungsempfehlungen praxistauglich in einem Lastenheft zusammengestellt werden. Der Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen wird genutzt, um eine praxistaugliche Integration des Lastenhefts in die

Prozesse der KMU zu ermöglichen. Abgerundet wird die Methodik durch eine rechnergestützte Realisierung, wodurch die Anwendung im Maschinenbau gestärkt werden soll. Die Gestaltung des Beschaffungsprozesses wird in Abschnitt 4.5 ausgeführt.

4.2 Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

4.2.1 Aufbau

Die Aufgabe eines Referenzmodells besteht in der Abbildung eines geplanten oder eines real existierenden Originalsystems (VDI 1996a, S. 9), wobei Zweck und Anwendung von wesentlicher Bedeutung bei der Modellbildung sind. Da dem Autor bisher keine Referenzmodelle zur Abbildung von DWL in der Entwicklung von mechatronischen Maschinen und Anlagen bekannt sind, ergeben der Vergleich von ähnlichen Ansätzen aus verwandten Bereichen, dass eine Orientierung an der Modellvorstellung der Digitalen Fabrik nach SCHACK (2007) bei der Modellbildung sinnvoll ist (vgl. Abschnitt 3.3).

Das Referenzmodell in dieser Arbeit ist analog zu SCHACK (2007) als ein Teil der Methodik zu verstehen. Es greift dazu den inhaltlichen Kern der Veröffentlichung DRESCHER & REINHART (2014) auf, steht im Einklang mit den gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.5) und beachtet in Anlehnung an die allgemeine Modellbildung nach BÖRNER ET AL. (2012) zusätzlich folgende Vorbedingungen: Ausgehend von dem Begriffsverständnis der Mechatronik aus Abschnitt 2.2 werden die Grenze, die Struktur und der Inhalt des Modells festgelegt. Das Modell stellt ein Regelwerk mit einem präskriptiv-normativen Charakter dar. Es wird eine Referenz im Sinne eines Soll-Zustandes zur Unterstützung der Mechatronik beschrieben. Weiterhin ist das Modell domänenspezifisch, indem es sich auf die Branche des Maschinenbaus bezieht, wobei eine Übertragung in weitere Branchen nicht vorgesehen ist. Auch wird ein multi-perspektiver Aufbau verfolgt, der sich an dem Ansatz von SCHACK (2007) orientiert und eine umfängliche Beschreibung auf DWL zulässt.

Für die Modellbildung des Referenzmodells wird ein dreistufiges Verfahren genutzt (Abbildung 4.2). Die Festlegung der Modellgrenze schränkt den Gültigkeitsbereich ein (Schritt 1.a). Dazu werden mechatronische Handlungsprinzipien zusammengestellt und die Bedeutung der Prinzipien für DWL im Rahmen der Referenzsichten des Prozesses, der Funktion und der Information erklärt (Schritt 1.b). Die Prozessreferenzsicht repräsentiert Phasen und Aktivitäten, die durch digitale Werkzeuge unterstützt werden sollen. Die Funktionsreferenzsicht stellt digitale Funktionen und Techniken bereit, die Ingenieuren

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

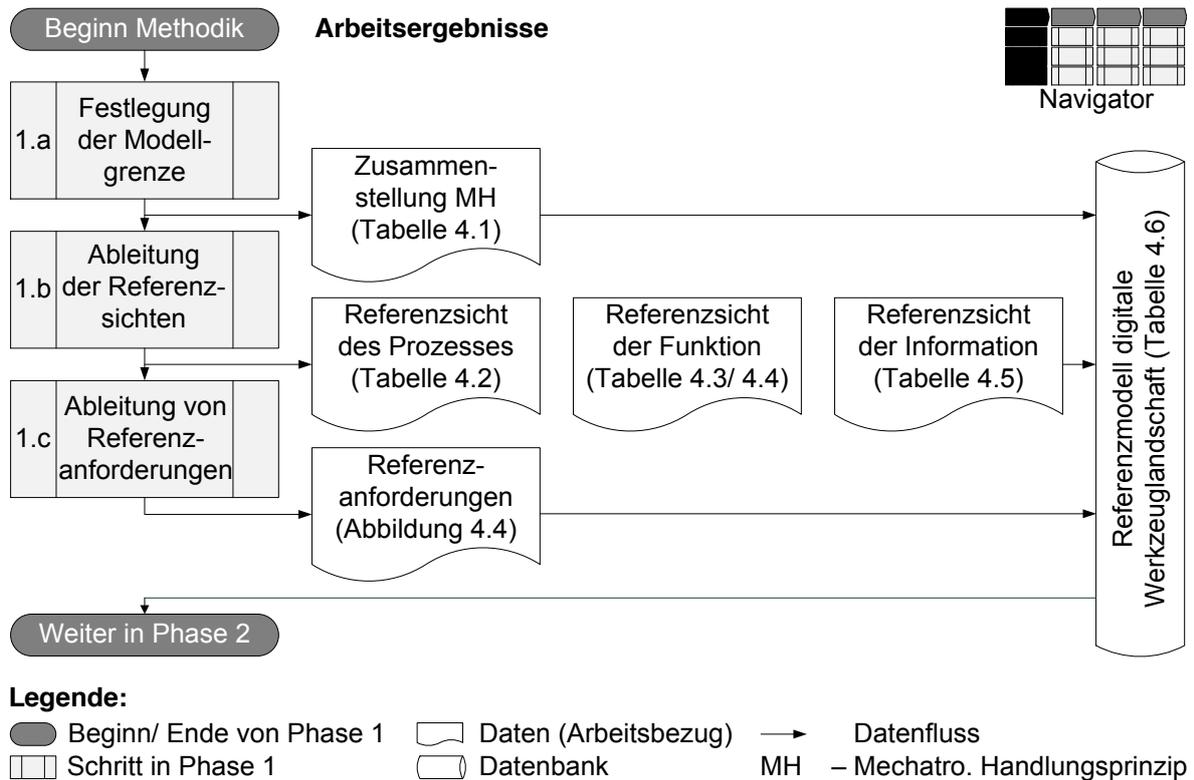


Abbildung 4.2: Aufbau des Referenzmodells (Phase 1)

in der täglichen Praxisarbeit zur Verfügung stehen sollten. Die Informationsreferenzsicht fasst Informationen und Artefakte zusammen, die mittels des Einsatzes der digitalen Werkzeuge entlang der Entwicklung entstehen und verarbeitet werden. Die Referenzanforderungen sind auf Grundlage der Referenzsichten entstanden, stellen konkrete Katalog an Soll-Kriterien der DWL dar (Schritt 1.c).

Die Besonderheiten des Referenzmodells zeigen sich in den Sichten des Modells (Abbildung 4.3). Die Kopplung der mechatronischen Handlungsprinzipien (siehe Tabelle 4.1) in die *digitale Welt* erfolgt mittels eines mehrdimensionales Koordinatensystems, welches für die Verortung der Soll-Kriterien (Referenzanforderungen) an die DWL dient. Die Einführung von Referenzsichten ermöglicht es, dass die DWL aus dem Blickwinkel des Entwicklungsprozesses, der Funktionen und der Informationen betrachtet werden können. Die Prozessreferenzsicht beinhaltet sieben Prozessgebiete, wie beispielsweise das Anforderungsmanagement (siehe Tabelle 4.2). Im Anforderungsmanagement sind Kriterien enthalten, welche für die Zusammenstellung der Kundenanforderungen an die zu entwickelnden Maschinen erforderlich sind. In der Funktionsreferenzsicht sind sechs Funktionsgebiete enthalten (siehe Tabelle 4.3). Repräsentativ sei das Funktionsgebiet der Automatisierung zu erwähnen, welches Kriterien zur Reduktion von manuellen Aufwänden im Entwicklungsprozess beinhaltet. Die Informationsreferenzsicht ist unterteilt

in fünf Informationen (siehe Tabelle 4.4). So sind beispielsweise in der Kategorie der disziplinspezifischen Information jene Kriterien enthalten, die für die Erstellung der hochdetaillierten Modelle der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung notwendig sind. In den folgenden Abschnitten des Kapitels wird das Referenzmodell umfangreich dargelegt.

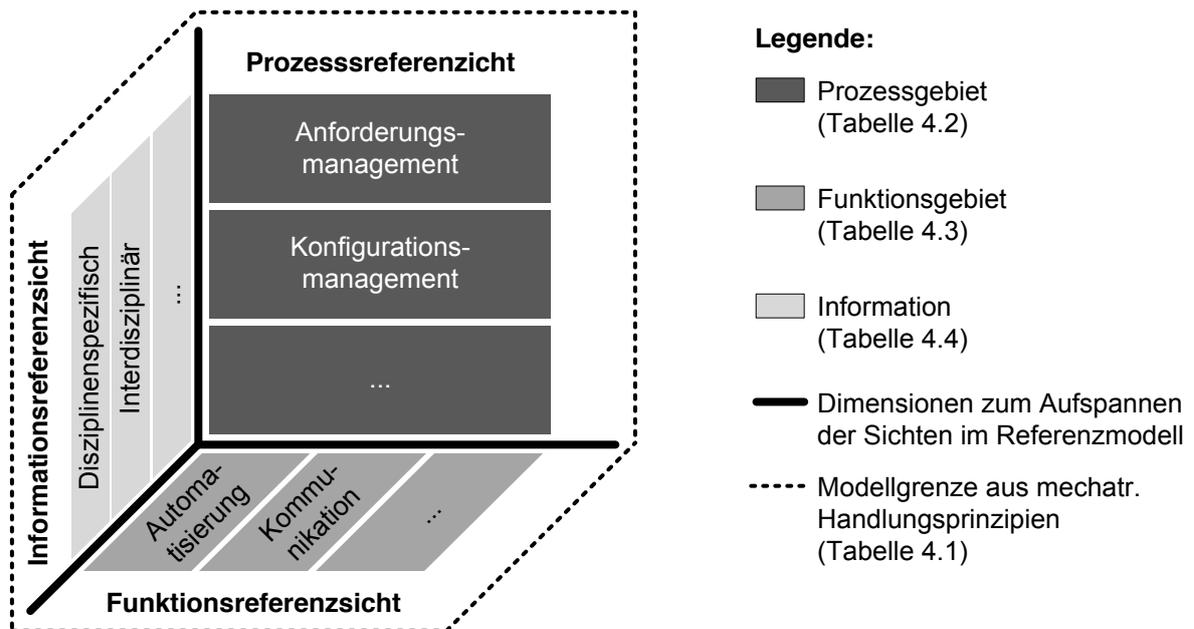


Abbildung 4.3: Sichten des Referenzmodells

4.2.2 Modellgrenze aus mechatronischen Handlungsprinzipien

Prinzipien des Handelns und Denkens haben bereits ihre Gültigkeit zur mikroskopischen Beschreibung von Entwicklungsprozessen bewiesen. Auch eine Übertragung zur Beschreibung von digitalen Werkzeugen unter dem Begriff der *mechatronischen Handlungsprinzipien (MH)* wurde in Abschnitt 2.2 diskutiert, auf deren Überlegungen eine Modellgrenze für das Referenzmodell geschaffen wurde. Diese baut auf dem Stand der Wissenschaft und Technik aus den Bereichen der empirischen Konstruktionsforschung (z. B. BIRKHOFFER & LINDEMANN 1999), der Psychologie (z. B. WITTE & DAVIS 2013) und der Praxis (z. B. BIRKHOFFER ET AL. 2001) auf. Eine Betrachtung von Prinzipien aus dem Blickwinkel einer mechatronischen Entwicklung ist zum heutigen Zeitpunkt noch nicht explizit erfolgt. Aus diesem Grund sind Ansätze in der Literatur auf ihre Anwendbarkeit und Praktikabilität zur Beschreibung von mechatronischen Vorgehen untersucht worden. Dazu wurde die Anwendbarkeit im Rahmen von Workshops mit Unternehmen aus dem Bereich des Maschinenbaus geprüft (vgl. Abschnitt 1.6). Es sind wesentliche Ansätze

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

für den Maschinenbau übertragen und zusammengestellt worden. Die MH bilden in der Gesamtheit die Grenze des Referenzmodells und sind in den folgenden thematischen Kategorien erläutert (Tabelle 4.1):

Interdisziplinäre Kollaboration:

Ausgehend von der in Kapitel 2 getroffenen Definition der Mechatronik kann die Veränderung von mechanischen zu mechatronischen Produkten durch vielfältige Prinzipien unterstützt werden. Die Unterstützung der Kommunikation und Kooperation über die Grenzen der Domänen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software hinaus stellt die Produktqualität sicher (MH 1–3). In MH 1 wird die Zerlegung und Verteilung des Entwicklungsproblems in Teilprobleme vorgeschlagen (vgl. HABERFELLNER & BECKER 2012, HABERFELLNER & DAENZER 2002 und DÖRNER 1998). In MH 2 wird festgelegt, dass die disziplinspezifischen Entwicklungsstränge nach einer Verteilung zu einem Gesamtoptimum zusammengeführt werden müssen, z. B. mit Hilfe von Synchronisationspunkten entlang des Prozesses (vgl. HAMMERS 2012; BENDER ET AL. 2006, S. 15; GEISBERGER & SCHMIDT 2004, S. 58–69). Das MH 3 verdeutlicht die Notwendigkeit, Erfahrungen aus den vorangegangenen Entwicklungsprojekten (z. B. Konstruktionsergebnisse) für Folgeprojekte zur Verfügung zu stellen (vgl. HACKEL 2010, S. 118–121).

Zielgerichtetes Vorgehen:

Um einem Trial-and-error-Vorgehen (LINDEMANN 2009, S. 56), d. h. einem schlichten Ausprobieren ohne einem genauen Plan entgegenzuwirken, wird im Modell die Ausrichtung des Handelns auf eine konkrete Zielstellung gefördert (MH 4–6). In MH 4 wird verlangt, dass eine minutiöse Planung und Absicherung durch Simulation und mechatronische Testverfahren vorgenommen werden soll, um reale Prototypen zu vermeiden (vgl. EIGNER 2012b, S. 12; BENDER ET AL. 2006). In MH 5 wird empfohlen, dass in Anlehnung an HABERFELLNER & DAENZER (2002) nicht nur ein, sondern mehrere Lösungswege in der Entwicklung zu berücksichtigen sind. Bei der mechatronischen Entwicklung sind die Alternativen im Besonderen zu beachten, die sich durch die Disziplinen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software ergeben. Das MH 6 steht für ein reflektiertes Handeln, welches ein zu entwickelndes mechatronisches Produktionssystem spezifiziert, die Zielabweichungen während der Entwicklung hinterfragt und gegebenenfalls Korrekturen einbringt. Es sollen der Blick fürs Ganze geschult werden, um Änderungen von Schnittstellen zwischen mechanischen, elektrischen und Software-technischen Fragestellungen im Entwicklungsziel zu berücksichtigen (vgl. LINDEMANN 2009, S. 56; BADKE-SCHAUB & FRANKENBERGER 2004; WULF 2001; DÖRNER 1998).

4.2 Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

Tabelle 4.1: Mechatronische Handlungsprinzipien

Kategorie	MH*	Handlungsprinzip
Interdisziplinäre Kollaboration	1	Interdisziplinäre Abstimmungspunkte zwischen den Entwicklern der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software (vgl. GEISBERGER & SCHMIDT 2004; HAMMERS 2012)
	2	Zerlegung des Entwicklungsproblems und Verteilung der Teilaufgaben an Entwickler der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software nach DÖRNER (1998)
	3	Wiederverwendung von interdisziplinärem Entwicklungswissen nach HACKEL (2010)
Zielgerichtetes Vorgehen	4	Eigenschaftsabsicherung mittels mechatronischer Testverfahren (Komponenten-, Modul-, Integrationstest) nach BENDER ET AL. (2006)
	5	Berücksichtigung von alternativen Lösungen aus den Bereichen der Mechanik, Elektrik/ Elektronik und Software nach WULF (2001)
	6	Reflektiertes und diskursives Vorgehen nach WULF (2001)
Systemdenken	7	Hierarchische Strukturierung des Produktionssystems nach HABERFELLNER & BECKER (2012)
	8	Variable Sichten auf das Produktionssystem für Entwickler der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software nach WULF (2001)
	9	Mehrfachverwendung durch Modularisierung und Standardisierung des Produktionssystems nach OTT (2009a)
Einsatz von digitalen Modellen	10	Anwendung der mechatronischen Simulation entlang des Entwicklungsprozesses (vgl. WÜNSCH 2007)
	11	Einsatz eines zentralen, interdisziplinären Gesamtmodell des Produktionssystems (vgl. modellbasiertes System Engineering nach EIGNER 2014)
	12	Ableitung von Entwicklungsunterlagen und Steuerungscode (vgl. LINDWORSKY 2011)

MH – Mechatronisches Handlungsprinzip

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Systemdenken:

Die Ansätze aus dem Systemdenken ermöglichen eine gesamtheitliche Betrachtungsweise der Domänen (EIGNER 2012b, S. 42–44; LINDEMANN 2009, S. 55), um der Gefahr eines zu engen disziplinenorientierten Problemverständnisses vorzubeugen (MH 7–9). Die Anwendung von MH 7 soll Ordnung in hochkomplexe Maschinen und Anlagen bringen, indem Zusammenhänge zwischen den Systemen und der Umwelt erkannt sowie Systemelemente und deren Beziehungen beschrieben werden (HABERFELLNER & DAENZER 2002). In MH 8 werden variable Sichten auf das Produktionssystem herausgestellt, um ein passgenaues Informationsbild für Entwickler der Mechanik-, Elektrik/Elektronik- und Software bereitzustellen (WULF 2001). Die Gliederung von mechatronischen Maschinen und Anlagen durch standardisierte Module in MH 9 ermöglicht die erneute Verwendung in den Folgeprojekten, wodurch Mehrfachverwendung und Austauschbarkeit sichergestellt werden (vgl. OTT 2009b, S. 52–54; BING 2001, S. 72).

Einsatz von digitalen Modellen:

Die mechatronische Entwicklung kann ebenfalls im Modell berücksichtigt werden (MH 10–12), indem zunehmend virtuelle Produktmodelle z. B. zur frühzeitigen Absicherung und Handhabung von Fehlern eingesetzt werden (vgl. EIGNER 2012b, S. 11; VAJNA 2009, S. 12–14). Die Ansätze von WÜNSCH (2007) zur Anwendung der Methoden der virtuellen Inbetriebnahme entlang des gesamten Entwicklungsprozesses werden in MH 10 zusammengefasst. Dadurch soll im Besonderen der Einsatz von physikalischen Prototypen in den frühen Phasen der Entwicklung vermieden werden. In MH 11 wird den Erläuterungen von EIGNER (2014) zur Einrichtung eines möglichst ablauffähigen Produktmodells gefolgt. Dadurch sollen Informationen zentralisiert und der im Maschinenbau vorherrschende dokumentenbasierte Ansatz abgelöst werden. Modelle können wiederverwendet, zum Test, der Simulation und der Verifikation genutzt und zur Reduktion von physikalischen Prototypen beitragen. Aufbauend wird in MH 12 vorgeschlagen, aus dem zentralen Entwicklungsmodell lauffähige Steuerungscode oder auch Konstruktionsunterlagen/-zeichnungen abzuleiten (vgl. LINDWORSKY 2011).

4.2.3 Referenzsicht des Prozesses

Die Prozessreferenzsicht baut auf der Modellgrenze der Mechatronik auf und stellt ein Soll-Bild digitaler Werkzeuge aus Sicht der Belange des Entwicklungsprozesses dar. Dabei werden im Kern die Veröffentlichungen VDMA (2015) und DRESCHER ET AL. (2014a) dargelegt, wobei für weitere Details auf die Beiträge verwiesen sei. Die Prozessreferenzsicht beschreibt die digitalen Werkzeuge anhand von *sieben Prozessgebieten* und

28 Aktivitäten. Prozessgebiete stellen thematisch orientierte Gebiete mit einem starken inhaltlichem Zusammenhang dar, während Aktivitäten einen operativen Handlungscharakter aufweisen. Es wird eine Untergliederung in mechatronische Prozessgebiete und unterstützende Prozessgebiete vorgenommen. Mechatronische Prozessgebiete sind das wesentliche Anwendungsfeld mechatronischer Handlungsprinzipien. Bei unterstützenden Prozessgebieten handelt es sich um Felder, die für einen funktionierenden Prozess relevant sind, jedoch nicht ausschließlich in mechatronischen Entwicklungen vorkommen. Diese stellen das Grundgerüst dar, um eine Entwicklung stattfinden zu lassen. Eine Übersicht über Prozessgebiete und Aktivitäten wird in Tabelle 4.2 dargelegt und ergänzt durch die folgenden Erläuterungen:

Anforderungsmanagement (AM):

Das Prozessgebiet *Anforderungsmanagement* unterstützt die Definition und Sammlung von Anforderungen mit Kunden, Vertrieb und den Entwicklungsabteilungen. Es gibt Aussagen über die von dem zu entwickelnden Produktionssystem zu erfüllenden Eigenschaften und Leistungen. Kern des Anforderungsmanagement ist die Spezifikation, die Strukturierung, das Prüfen und Absichern von Anforderungen und die Erstellung des Angebots. Es enthält die Aktivitäten *Anforderung spezifizieren*, *Anforderung strukturieren* und *Anforderung prüfen*.

Systementwurf (SE):

Das Prozessgebiet umfasst Tätigkeiten zum Entwurf und zur Spezifikation des zu entwickelnden Systems. Auf der Grundlage der Anforderungsspezifikationen werden Funktionalitäten und Komponenten definiert und Lösungsalternativen festgehalten. Es enthält die Aktivitäten *System spezifizieren*, *System strukturieren*, *Systementwurf prüfen*, *Schnittstelle spezifizieren* und *Schnittstelle prüfen*.

Systemrealisierung (SR):

Das Prozessgebiet ist zuständig für die Umsetzung der spezifizierten Komponenten. Mechanische, elektrische und elektronische Bauteile werden in der Realisierung des Gesamtsystems berücksichtigt. Es erfolgt ebenfalls die Implementierung der Steuerungs-Software. Es werden die Aktivitäten *System entwerfen*, *Mechanik entwerfen*, *Elektrik/Elektronik entwerfen* und *Software entwerfen* berücksichtigt.

Qualitätsmanagement (QM):

Das Prozessgebiet umfasst die Gesamtheit von Maßnahmen zur Überprüfung der Funktionalität, Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit realisierter Komponenten eines Produkts oder Herstellungsprozesses bezüglich der spezifizierten Anforderungen. Es umfasst die Aktivitäten *Test/Prüfung planen*, *Test/Prüfung vorbereiten*, *Test/Prüfung durchfüh-*

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Prozessgebiet	Aktivität	Prozessgebiet	Aktivität
Anforderungsmanagement (AM)	Anforderungen spezifizieren	Systemrealisierung (SR)	Software entwerfen
	Anforderungen strukturieren		Elektrik/Elektronik entwerfen
	Anforderungen prüfen		Mechanik entwerfen
	Angebot erstellen		System realisieren
Konfigurationsmanagement (KM)	Baukasten verwalten	Projektverfolgung (PV)	Projektfortschritt verfolgen
	Produkte/Aufträge verwalten		Änderungen verwalten
	Varianten/Versionen verwalten		Prozesse verbessern
Systementwurf (SE)	System/Maschine spezifizieren	Projektplanung (PP)	Ressourcen planen
	System strukturieren		Budget planen
	Systementwurf prüfen		Ressourcen planen
	Schnittstellen spezifizieren		Projekt definieren und absichern
	Schnittstellen prüfen		
Qualitätsmanagement (QM)	Testphasen unterstützen		
	Test/Prüfung planen und durchführen		
	Test/Prüfung dokumentieren		
	Abnahme durchführen		
	Test/Prüfung analysieren		

(a) Mechatronische Prozessgebiete

(b) Unterstützende Prozessgebiete

Tabelle 4.2: Prozessreferenzsicht in Anlehnung an VDMA (2015) und DRESCHER ET AL. (2014a)

ren, Test/Prüfung dokumentieren, Test/Prüfung analysieren, Testphase unterstützen, Produktreife sicherstellen, Abnahme vorbereiten/durchführen und Nutzung vorbereiten.

Projektplanung (PP):

Das Prozessgebiet beinhaltet Führungsaufgaben, -organisation, -technik und -mittel zur Definition, Planung und Steuerung von Entwicklungsprojekten. Es umfasst die Aktivitäten *Budget planen, Ressourcen planen, Ablauf planen, Projekte definieren* und *Projektplan absichern*.

Projektverfolgung (PV):

Das Prozessgebiet beschäftigt sich mit der systematischen Fortschrittskontrolle von Entwicklungsprojekten (Termine, Kosten, Ressourcen). Es enthält die Aktivitäten *Projektfortschritt verfolgen, Prozesse verbessern* und *Änderungen verwalten*.

Konfigurationsmanagement (KM):

Das Prozessgebiet verwaltet die Struktur (z. B. Bauteilstruktur) des Produktionssystems, wie beispielsweise mechatronische Baukästen, Produkte und Aufträge sowie deren Varianten und Versionen. Es umfasst die Aktivitäten *Baukasten verwalten, Produkte/Aufträge verwalten* und *Varianten/Versionen verwalten*.

4.2.4 Referenzsicht der Funktion

Die Funktionsreferenzsicht ergänzt den Anwender der Software-Systeme im Modell und repräsentiert somit einen aus der täglichen Arbeit stammenden Blickwinkel der Ingenieurinnen und der Ingenieure in der Entwicklung. Dazu sind insgesamt sechs Funktionsgebiete, 16 Funktionen und 14 digitale Techniken vorgesehen. Die Funktionsgebiete eines digitalen Werkzeuges sind inhaltliche Wirkungsfelder und enthalten zwei bis vier Funktionen, die wiederum als konkrete Merkmale der Software zu verstehen sind und die Schnittstellen zu den Bedarfen sowie den Wünschen des Anwenders bilden. Auf Basis der Funktionen werden die Referenzanforderungen abgeleitet. Neben den Funktionen werden ebenfalls die digitalen Techniken im Modell vorgesehen. Diese geben eine Empfehlung, auf welche Art und Weise eine rechnergestützte Umsetzung bestmöglichst erfolgen sollte und sind analog zu den Funktionen mit den Referenzanforderungen verknüpft. Im Folgenden werden die Funktionsgruppen und die enthaltenen Funktionen erläutert:

Automatisierung (AT):

Die Funktionsgruppe *Automatisierung* stellt Funktionen zur Verfügung, die die manuellen Aufwände durch automatisierte und rechnergestützte Methoden verringert. Dabei ermöglicht die Funktion *Ableiten* die teilautomatische Generierung von Entwicklungsartefakten

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Tabelle 4.3: Funktionsreferenzsicht

Funktionsgebiet	Funktion
Automatisierung (AT)	Ableiten
	Vorbereiten
	Konvertieren
Kommunikation (KK)	Informieren
	Publizieren
Rollenvergabe (RV)	Benutzer verwalten
	Zugriffe/Rollen zuordnen
Verifikation (VK)	Parametrieren
	Simulieren
	Auswerten
Verwaltung (VW)	Entwerfen
	Spezifizieren
	Analysieren/Prüfen
Wiederverwendung (WV)	Suchen
	Strukturieren
	Dokumentieren

aus Vorgängerprojekten oder Prozessschritten wie z. B. Steuerungscode oder Konstruktionsunterlagen (LINDWORSKY 2011, S. 117–118; OTTERBACH & SCHÜTTE 2004, S. 5–12). Die Funktion *Konvertieren* hingegen unterstützt die möglichst verlustfreie Übertragung von Daten von einem in ein anderes Datenformat zur Nutzung in gemeinsamen Arbeitsbereichen (vgl. KERN 2005, S. 65). Die Funktionen können den Anwender im Prozessgebiet der Systemrealisierung eine wesentliche Unterstützung bieten.

Kommunikation (KK):

Die Funktionsgruppe *Kommunikation* stellt die Austauschfunktionen für Ingenieure entlang der Entwicklung bereit. Die Funktion *Informieren* ermöglicht das Versenden von Protokollen/Nachrichten an einen spezifischen festgelegten Empfänger. Die Funktion *Publizieren* ermöglicht das Verbreiten, das Speichern und das Bereitstellen von Informationen über fachspezifische Besonderheiten für einen erweiterten Nutzerkreis. Die Funktionen finden in allen Prozessgebieten Anwendung.

Rollenvergabe (RV):

Die Funktionsgruppe beinhaltet die Verwaltung von Benutzern und die Zuteilung von Rechten auf die Artefakte. Die Funktion *Benutzer verwalten* ermöglicht die Erstellung und Verwaltung von IT-Benutzern im unternehmensinternen Netzwerk. Die Funktion

Zugriffe/Rollen zuordnen beinhaltet die Zuteilung und Rechteverwaltung von Verantwortlichkeiten auf den Datenbestand der DWL (vgl. JABLONSKI 2013, S. 220), um eine verteilte Entwicklung zu ermöglichen. Die Funktionen finden ihr Kerneinsatzgebiet in den Prozessgebieten des Anforderungsmanagement, des Systementwurfs und der Projektverfolgung.

Verifikation (VK):

Die Funktionsgruppe *Verifikation* beinhaltet Anforderungen zur disziplinübergreifenden Absicherung der Maschineneigenschaften durch beispielsweise Tests oder Simulationen (vgl. EIGNER 2012b, S. 18–20). Dabei stellt die Funktion *Parametrieren* die Einstellung und Konfiguration der Modellparameter vor der Simulation bereit (vgl. TILCH 2009, S. 18). Die Funktion *Simulieren* repräsentiert den rechnergestützten Ablauf eines zweckorientierten und realitätsnahen Ablaufs, beispielsweise zur Absicherung von Kollisionen der Anlage. Die Funktion *Anpassen/Feinabstimmen* erfolgt während oder nach der Simulation und stellt eine Auswertungs- und Interpretationshilfe der Simulationsergebnisse dar. Die Funktionen finden Einsatz in dem Prozessgebiet der Qualitätssicherung.

Verwaltung (VW):

Die Funktionsgruppe *Verwaltung* beinhaltet Anforderungen an die Erstellung und Verwaltung von Entwicklungsartefakten und -dokumenten. Dabei ermöglicht die Funktion *Entwerfen* die Erarbeitung von Informationen über die Maschine oder die Anlage (z. B. geometrische Modelle oder Stücklisten). Die Funktion *Spezifizieren* stellt die formale Bestimmung der Anforderungen und der Leistungsmerkmale der Maschine oder der Anlage heraus, unter den Aspekten der Vollständigkeit, der Widerspruchsfreiheit und Robustheit (vgl. ZELLER 2009, S. 247-348). Die Funktion *Analysieren* ermöglicht die systematische Untersuchung, zumeist mit Hilfe von statistischen Verfahren, mit dem Ziel, der Erforschung von Ursachen und der Interpretation des Datenbestands (BEANEY 2015). Die Funktionen werden hauptsächlich in den Prozessgebieten des Anforderungsmanagements und der Projektplanung eingesetzt.

Wiederverwendung (WV):

Die Funktionsgruppe *Wiederverwendung* nutzt projektübergreifende Bibliotheken zur Speicherung, zu erneuten Abrufen und zur Bearbeitung von Informationen der Maschine oder der Anlage (LÜDER ET AL. 2013, S. 4; LINDWORSKY 2011, S. 45; HACKEL 2010, S. 118–121; VDI 2004, S. 62–63). Dazu zählt die Funktion *Suchen*, welche die Festlegung von Suchkriterien (einzelne und mehrere Suchworte sowie Synonyme), die Einstellung des Suchvorgehens, den Vergleich mit einem bestehenden Datenbestand und deren Ergebnisanzeige unterstützt (ARENDE ET AL. 2013, S. 120). Ebenfalls ermöglicht die Funktion *Strukturieren* die Aufarbeitung und die Ablage von Informationen mittels Bildung von

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Datenobjekten und -kategorien (inkl. Eigenschaft der Objekte und Beziehung zwischen den Objekten) in Form von Tabellen (BADERTSCHER & SCHEURING 2006, S.40–41). Die Funktion *Dokumentieren* ermöglicht die Verwaltung von Versionen, die Speicherung und die Freigabe von Dokumenten wie auch Datensätzen (vgl. HECKERT 2013, S. 201; ANDERL 2007, S. 16).

Des Weiteren beinhaltet die Funktionsreferenzsicht die *digitalen Techniken* aus der Produktentwicklung, die als Hilfsmittel zu verstehen sind, um die Funktionen durch rechnergestützte Techniken umzusetzen (z. B. MCAD). Diese sind eng mit den Funktionsgebieten und Funktionen verbunden und stellen bereits definierte Lösungswege dar. Dabei sind zwar im Allgemeinen verschiedene Alternativen möglich, jedoch wird im Sinne einer Referenz die geeignete digitale Technik im Referenzmodell verzeichnet. Zur Unterstützung der Mechatronik hat sich herausgestellt, dass die typischen digitalen Techniken in der Entwicklung nicht ausreichend sind. Ergänzend wurden folgende fünf Techniken im Modell berücksichtigt:

- Die Technik der Funktionsmodellierung (TFM) unterstützt die funktionsorientierte Gestaltung der Maschinen oder Anlagen nach den Prinzipien des Systemdenkens.
- Die Technik des Projektmanagements (TPM) unterstützt die Anwender bei der Verwaltung und Organisation von Entwicklungsdokumenten.
- Die Technik des Wissensmanagements (TWM) stellt die zentrale Ablage von projektbezogenen Informationen und Erfahrungen der Entwicklerinnen und Entwickler für Nachfolgeprojekte zur Verfügung.
- Die Technik zur Recherche (TZR) ermöglicht die IT-gestützte Suche von Informationen in Internetforen, Datenbanken oder Bibliotheken.
- Die Technik zur Kommunikation (TZK) unterstützt den Informationsaustausch zwischen Entwicklerinnen und Entwicklern im Unternehmen (z. B. E-Mail).
- Bei einer Technik der Publikationsplattformen (TPP) sind Diskussionsforen, Blogs oder Soziale Netzwerke zum Austausch zwischen Technikern zu verstehen.

Im Referenzmodell unterstützen die TAM und das PLM das Funktionsgebiet der Verwaltung. Das Funktionsgebiet der Wiederverwendung und der Rollenvergabe ist übergreifend und unterliegt einer generellen Unterstützung durch die Techniken. Das Funktionsgebiet der Automatisierung enthält maßgeblich die disziplinspezifischen Werkzeuge MCAD, ECAD, CASE und CACE. Die Werkzeuge des CAQ und der VIBN unterstützen das Funktionsgebiet der Verifikation. Die TZK und TPP stellen Hilfsmittel für das Funktionsgebiet der Kommunikation zur Verfügung.

4.2.5 Referenzsicht der Information

Die Begrifflichkeit der Information hat einen engen semantischen Bezug zum Verständnis von Daten und Wissen. PROBST ET AL. (2012, S. 16–18) diskutieren die Thematik ausführlich und folgern, dass zwar eine Trennung vorgenommen werden kann, jedoch die Übergänge zwischen den Begrifflichkeiten stetig sind. In ihren Ausführungen sind Daten unstrukturierte Zeichenfolgen, die meist isoliert vorliegen können. Im Gegensatz dazu stellen Informationen einen interpretierbaren Zusammenhang dar, meist im Rahmen der Anwendung. Das Wissen weist einen hohen individuellen Handlungscharakter auf und kann als Erfahrungen des Entwicklers verbucht werden (VAJNA 2009, S. 430). Die Arbeit schließt sich dem Verständnis von PROBST ET AL. (2012, S. 16–18) an und nutzt die Begrifflichkeit der *Informationsreferenzsicht*, um herauszustellen, dass die Aktivitäten des Entwicklungsprozesses im Allgemeinen erst durch die Interpretation des Entwicklers zu einer erfolgreichen Umsetzung führen können. Dabei stehen den Entwicklern im Speziellen digitale Hilfsmittel zur Verfügung, die zur Lösung der in den Aktivitäten enthaltenen Aufgaben beitragen. Der Umgang mit solchen Hilfsmitteln erfordert von den Entwicklern und Entwicklerinnen eine hohe Eigenleistung mit Freiraum für Individualität und Interpretation.

Die Informationen sind anhand ihrer Art typisiert und um wesentliche Artefakte ergänzt. Die Artefakte ermöglichen eine konkrete, handhab- und anwendbare Ergänzung der Informationen um eine inhaltsbezogene Komponente. Sie stellen damit in der Informatik und in der Produktentwicklung oftmals verwendete Teil- oder Gesamtabbildungen des Produktes dar, welche als Zwischen- oder Endergebnisse in der Entwicklung entstehen (GRANDE 2013, S. 143). Oftmals werden auch Meilensteine in der Entwicklung gesetzt, die den Fortschritt zur Gesamtentwicklung messen, dazu zählen z. B. Modelle, Dokumente oder Quellcodes. Die Begrifflichkeit der Artefakte vermag es sowohl den im Maschinenbau vorherrschenden dokumentenorientierten Entwicklungsansatz als auch die zunehmenden Bestrebungen eines zentralen Entwicklungsmodells einzuschließen.

Zur Systematisierung von Informationen und Artefakten, die durch digitale Werkzeuge entlang des Entwicklungsprozesses entstehen und verarbeitet werden, stehen vielfältige Modellierungskonzepte zur Verfügung. Im Rahmen der Konstruktion des Referenzmodells wurden Structured Analysis Design Technique (SADT) als ein adäquates Mittel identifiziert und genutzt (vgl. ROSS 1977), um im Maschinenbau eingesetzte Artefakte und deren Verknüpfung zu den Aktivitäten und den digitalen Techniken aufzunehmen. Die Ergebnisse sind im Rahmen der maßgeblichen Beteiligung des Autors entstandenen Veröffentlichung DRESCHER ET AL. (2013a) dargelegt und werden in Verbindung mit

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

den Ausführungen des VDMA-Fachverbandes Software (VDMA 2006) in die Systematik der Informationsreferenzsicht eingegliedert. Inhaltlich aufgearbeitet ergeben sich für die Informationssicht folgende Kategorien (Tabelle 4.4):

Tabelle 4.4: Informationsreferenzsicht in Anlehnung an DRESCHER ET AL. (2013a) und VDMA (2006)

Information	Artefakt
Disziplinspezifische Information (DS)	Maschinenlayout
	Sensor/Aktor-Listen
	Schaltpläne
	Konstruktionszeichnungen
Inbetriebnahmebezogene Information (IB)	Software-Spezifikation (Programmcode)
	Inbetriebnahmeplan
	Baustellenübersicht
Interdisziplinäre Information (ID)	Fertigungsdokumentation
	Anforderungsspezifikation
	Systembild
Organisationsbezogene Information (OG)	Funktions- und Strukturplan
	Schnittstellenübersicht
	Phasenreview und -abnahmen
Simulations- und testbezogene Information (ST)	Kunden- und Projektgenehmigung
	Zeitplan
	Testprotokolle und -auswertung
	Fehlerlisten
	Simulationsmodelle
	Checklisten Komponenten-, System-, Integrationstests

Disziplinspezifische Informationen (DS):

Die disziplinspezifischen Informationen sind von hoher Detailtiefe mit begrenztem Einfluss und einer geringen Kopplungen zu Informationen außerhalb ihrer Betrachtungsdomäne. Es zählen dazu vorrangig hochdetaillierte Modelle der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung. Als wesentliche Artefakte sind im Referenzmodell das Maschinenlayout, Sensor-/Aktor-Listen, Schaltpläne, Konstruktionszeichnungen und Programmcodes enthalten. Die Artefakte sind in dem Prozessgebiet des disziplinspezifischen Entwurfs verankert.

Inbetriebnahmebezogene Informationen (IB):

Die Informationen sind notwendig zur Inbetriebnahme der Maschine oder Anlage bis zum

Serienlauf und der Integration der Anlage in die bestehende Produktionslinie beim Kunden. Dazu zählen im Wesentlichen die Artefakte des Inbetriebnahmeplans, der Baustellenübersicht und der Fertigungsdokumentation in den Prozessgebieten der Systemrealisierung und der Qualitätssicherung.

Interdisziplinäre Informationen (ID):

Interdisziplinäre Informationen sind von zentraler Bedeutung, haben ganzheitlichen Abbildungscharakter und besitzen eine hohe Abhängigkeit zu weiteren fachabteilungsspezifischen Informationen. Diese bestimmen oftmals die Zusammenarbeit über die Fachgrenzen hinaus und bedürfen gesonderter Abstimmungen. Wesentlich sind die Artefakte der Anforderungsspezifikation, des Systembilds, des Funktions- und Strukturplans und der Schnittstellenübersicht in den Prozessgebieten des Anforderungsmanagements und des Systementwurfs.

Organisationsbezogene Informationen (OG):

Die Informationen zur Organisation werden genutzt, um Meilensteine zu prüfen, Verantwortungen festzulegen und den Stand der Entwicklung nachzuverfolgen. Dazu sind der Phasenreview und -abnahme, die Kunden- und Projektgenehmigung und der Zeitplan wesentliche Artefakte in den Prozessgebieten der Projektplanung und Projektverfolgung.

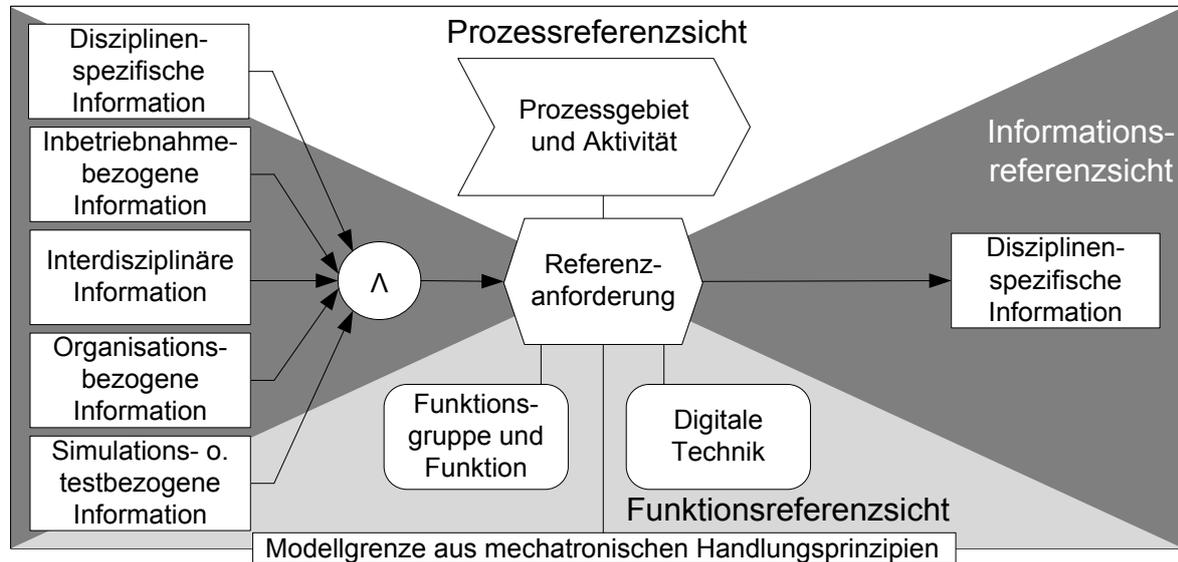
Simulations- und testbezogene Informationen (ST):

Die Informationen repräsentieren die Vorbereitung, das Durchführen und die Auswertung von mechatronischen Tests- und Simulationsverfahren und tragen zum Erfolg einer möglichst fehlerfreien und abgesicherten Maschine oder Anlage bei. Diese unterliegen häufigen Änderungen, bedingt durch den iterativen Charakter, koppeln diese die frühe mit der späten Entwicklungsphase und sichern die Qualität des Produktes vor der Auslieferung zum Kunden. Zu den simulations- und testbezogenen Maschineninformationen zählen die Artefakte Testprotokolle und -auswertungen, Fehlerlisten, Simulationsmodelle und Checklisten von Komponenten-, System- und Integrationstests im Prozessgebiet der Qualitätssicherung.

Die Informationsreferenzsicht ergänzt das Referenzmodell durch die o. g. Strukturierung in Informationen und Artefakte, die als Ein- und Ausgänge der Referenzanforderungen dienen (Abbildung 4.4). Als Eingang für eine Referenzanforderung können vielfältige, z. T. überlagerte Informationen zusammengefasst werden. Der Ausgang einer Referenzanforderung stellt ebenfalls eine Information dar. Es ist erkennbar, dass jede Referenzanforderung mit den Elementen der Referenzsichten, den Prozessgebieten und Aktivitäten, den Funktionsgruppen und Funktionen und digitalen Techniken einen gekoppelten Verbund bilden. Dadurch entsteht ein Abbild von DWL, welches die expliziten Zusammenhän-

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

ge umfänglich charakterisiert und implizite Abhängigkeiten zwischen den Sichten im Referenzmodell der Arbeit zulässt.



Legende:

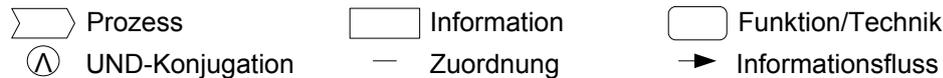


Abbildung 4.4: Verortung der Referenzanforderungen im Referenzmodell

4.2.6 Referenzanforderungen

Die Referenzanforderungen bauen auf den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt ME-PROMA auf, die in über 30 teilstrukturierten Workshops mit Vertretern von Unternehmen des Maschinenbaus gewonnen wurden (vgl. VDMA 2015 und DRESCHER ET AL. (2014a)). Dazu wurden diese Vorarbeiten auf eine Erfüllung der Systemgrenze durch die MH geprüft und ggf. als Referenzanforderungen in das Modell der Arbeit übertragen. Die Referenzanforderungen repräsentieren somit einen kriterienbasierten Soll-Zustand der Mechatronik und sind zentral in die Struktur des Referenzmodells eingebettet (Abbildung 4.4). Die Referenzsichten des Prozesses, der Funktion und der Information stellen hingegen einen IT-bezogenen Blickwinkel auf die Referenzanforderungen dar und ermöglichen die inhaltliche Diskussion des Modells (Abbildung 4.5).

Ein Auszug des Referenzmodells wird ersichtlich aus Tabelle 4.5, welche repräsentativ drei Referenzanforderungen (RA001-RA003) der Aktivität *Anforderung spezifizieren* im Prozessgebiet des *Anforderungsmanagements* darstellt. So fordert beispielsweise die

4.2 Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

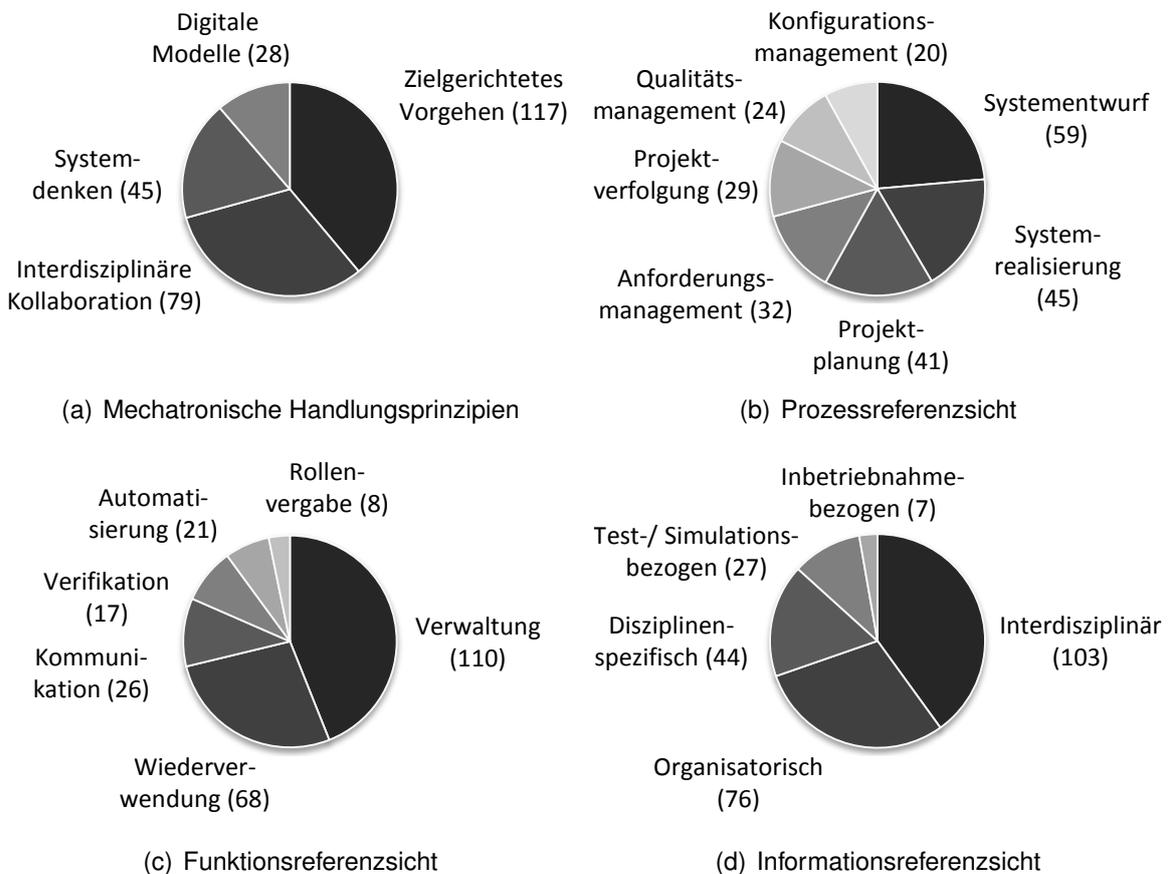


Abbildung 4.5: Zuordnung der Referenzanforderungen zur Grenze und zu den Referenzsichten (Anzahl der Zuordnungen)

Referenzanforderung *RA001* die *DWL* auf, die *Erstellung und Verwaltung einer Anforderungsspezifikation unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten* zu unterstützen. Der Anforderung liegt das mechatronische Handlungsprinzip *MH 7* zugrunde, welches den Software-Systemen in der Entwicklung die Unterstützung einer hierarchischen Strukturierung, so auch unter Darstellung der Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Modulen, der Maschinen und/oder Anlagen abverlangt. Die Software-Systeme müssen die Funktionen des Funktionsgebiets *Verwaltung* erfüllen, maßgeblich die des Spezifizierens. Dabei wird im Modell der Einsatz der digitalen Technik des TAM vorgeschlagen, um die disziplinspezifische Information der Abhängigkeiten zwischen den Komponenten und Modulen des Produktionssystems in das Artefakt der Anforderungsspezifikation einfließen zu lassen.

4 Methodik zur situationspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Tabelle 4.5: Referenzmodell (Auszug aus Anhang A.2)

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information				
			Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
Anforderungsmanagement (32)																	
Anforderung spezifizieren																	
RA001	Erstellung und Verwaltung einer Anforderungsspezifikation unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten.	7	TAM	x									A				
RA002	Sammeln der Anforderungen mit eindeutigen und durchgängigen Begrifflichkeiten im Entwicklungsheft.	7	TAM	x									EA				
RA003	Projektübergreifende Bereitstellung von Sicherheitsvorschriften der Maschine oder Anlage.	3	CAC		x								E	E	A		
Anforderung strukturieren																	
Anforderung prüfen																	
Angebot erstellen																	
Konfigurationsmanagement (20) und Qualitätsmanagement (24)																	
Systementwurf (59) und Systemrealisierung (45)																	
Projektverfolgung (29) und Projektverfolgung (41)																	
(insg. 250 Referenzanforderungen)																	
Summe:																	
			110	68	21	8	17	26	44	103	7	27	76				

Legende:
TAM – Technik des Anforderungsmanagement; CAC – Computer Aided Conceptioning; x – Zuordnung; E – Eingangsinformation; A – Ausgangsinformation;
VW – Verwaltung; WV – Wiederverwendung; AT – Automatisierungstechnik; RV – Rollenvergabe; VF – Verifikation; KK – Kommunikation
DS – Disziplinspezifisch; ID – Interdisziplinäre; IB – Inbetriebnahmebezogene; ST – Simulations-/ Testbezogene; OG – Organisatorische

4.3 Anpassung an die Entwicklungssituation

4.3.1 Übersicht

Aufgrund der maßgeblichen Prägung der DWL durch den Entwicklungsprozess ist davon auszugehen, dass die Überlegungen zur Anpassung von Vorgehensweisen (vgl. Abschnitt 3.4) auch auf die DWL übertragbar sind. Gemäß dem Credo *IT folgt dem Prozess* wirken sich die Effekte einer Prozessanpassung in einem ähnlich bedeutsamen Umfang auf die eingesetzte DWL aus. Das allgemeingültige und generisch gehaltene Referenzmodell beschreibt DWL für die Gesamtbranche des Maschinenbaus. Mit dem Ziel einer situationspezifischen Bewertung wird eine Möglichkeit dargestellt, wie eine Anpassung des Referenzmodells (Soll) an den Rahmen der organisatorischen Strukturen, der typischen ablaufenden Projekte und der Konstellationen in den Entwicklungsteams einer spezifischen Entwicklungssituation eines KMU vollzogen werden kann.

Für die Anpassung des Referenzmodells wird in der Phase 2 ein dreistufiges Verfahren gewählt (Abbildung 4.6). Es werden Merkmale und dazugehörige Ausprägungen der Entwicklungssituation im Maschinenbau zusammengestellt, die eine strukturelle Typisierung in Organisation (z. B. Unternehmensgröße), Projekt (z. B. Art der Variantenbildung) und Team (z. B. Anzahl der Mechanik-Entwickler) ermöglichen (Schritt 2.a). Aufbauend darauf wird der Einfluss der Ausprägungen auf das Referenzmodell abgebildet (Schritt 2.b). Dazu werden die Auswirkungen auf die Prozessreferenzsicht mittels einer Einflussmatrix erfasst. Die Verknüpfungen zwischen den Sichten im Modell erlauben es, die Einflüsse auf die Referenzsichten der Funktion und der Information ebenfalls zu diskutieren und wesentliche Erkenntnisse festzuhalten. In der Anwendung der Methodik wird es somit möglich, diejenigen Referenzanforderungen in die Bewertung einfließen zu lassen, die als relevant für die Entwicklungssituation des KMU gelten (Schritt 2.c).

4.3.2 Charakterisierung der Entwicklungssituation

Die Beschreibung einer Entwicklungssituation, wie in der Veröffentlichung DRESCHER ET AL. (2012) skizziert, erfolgt durch eine Einteilung in die Bereiche Organisation, Projekt und Team, die durch wesentliche zugeordnete Merkmale beschrieben werden (Tabelle 4.6). Der Bereich der Organisation bildet dabei den Rahmen für diejenigen Merkmale, die zur Beschreibung der Struktur der Entwicklungsabteilungen sowie der strategischen Ausrichtung dienen. Dadurch können langfristige Einflüsse auf die Entwicklung erfasst werden (LINDEMANN 2009, S. 30). Es werden die Unternehmensgröße, die Anzahl der

4 Methodik zur situationspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

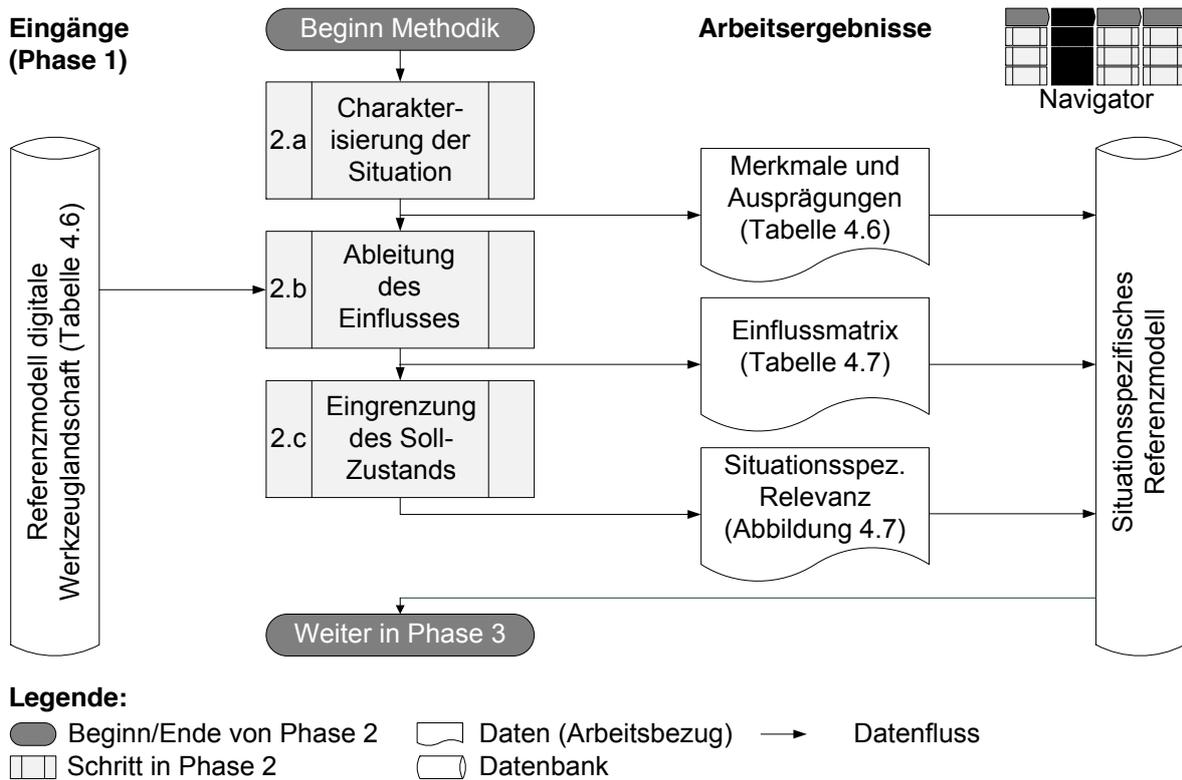


Abbildung 4.6: Anpassung an die Situation (Phase 2)

Entwicklungsstandorte und die Kernkompetenzen erfasst. Im Bereich des Projektes werden Merkmale aufgegriffen, die typische Projekte, deren Änderungen und Komplexität erfassen. Es werden die Entwicklungsaufgabe, die Einflüsse durch Änderungen des Projektziels und die Art der Bildung von Varianten betrachtet. Im Bereich des Teams stehen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Mittelpunkt, die Träger von Wissen und Können im Unternehmen sind (MILBERG & SCHUH 2013, S. 14). Es werden die fachlichen Fähigkeiten und das Erfahrungswissen in der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung erfasst.

Unternehmensgröße:

Die *Unternehmensgröße* beeinflusst den Entwicklungsprozess im Unternehmen (RAUCHENBERGER 2010, S. 116; EHRENSPIEL 2009, S. 159; LINNHOF 1996, S. 72), wodurch auch ein Einfluss auf die digitale Werkzeuglandschaft zu erwarten ist. Aus diesem Grund wird das Merkmal Unternehmensgröße eingeführt und durch eine für den Maschinenbau passende Größe unterteilt in: <50/50–99/100–249/250–999/>999 Mitarbeiter.

Entwicklungsstandorte:

Mit zunehmender Internationalisierung der KMU (ABELE & REINHART 2011, S. 10) verlagern und verteilen sich die Standorte der Entwicklung (SIMON 2006, S. 21). Zusammen-

4.3 Anpassung an die Entwicklungssituation

Merkmal	Ausprägung	Merkmal	Ausprägung	Merkmal	Ausprägung [An.]
Unternehmensgröße [Anzahl]		Entwicklungsaufgabe		Mechanik-Entwickler	
	<50		Neu		<6
	50–99 o. 100–249		Anpassung		6–10
	250–999 o. >999		Variante		>10
Entwicklungsstandorte [Anzahl]		Änderungseinflüsse		Elektrik/Elektronik-Entwickler	
	1		hoch		<6
	2–3		mittel		6–10
	>3		gering		>10
Kernkompetenz		Art der Variantenbildung		Software-Entwickler	
	Mechanik		Baureihe		<6
	Elektrik/Elektronik		Baukasten		6–10
	Software		Plattformbauweise		>10
(a) Organisation		(b) Projekt		(c) Team	

Tabelle 4.6: Merkmale und Ausprägungen der Entwicklungssituation

gefasst unter dem Begriff der „verteilten Entwicklung“ (SIMON 2006, S. 24), werden Herausforderungen an die digitalen Werkzeuge gestellt, im Besonderen an Kommunikation, das *Sharing* und die gemeinsame Nutzung sowie Weitergabe von Informationsmodellen. Das Merkmal *Entwicklungsstandorte* berücksichtigt den Einfluss auf die Werkzeuglandschaft in der Entwicklung eines Unternehmens (vgl. LINNHOF 1996, S. 72), wobei eine Einteilung erfolgt in die Ausprägungen: 1/1–3/>3 *Entwicklungsstandorte*.

Kernkompetenz:

Die Konzentration von Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen (REINHART ET AL. 1999, S. 1–11; SCHUH ET AL. 2010, S. 3) führt zu einer Ausbildung von unterschiedlichen Prozessen und Werkzeugen (LINDEMANN 2009, S. 30). Durch das Merkmal *Kernkompetenz* sind im Sinne der Mechatronik die disziplinspezifischen Entwicklungsstränge repräsentiert. Unter Mechanik wird im Schwerpunkt die Konstruktion (z. B. Maschinenelemente), unter Elektrik/Elektronik die Planung von elektrischen Komponenten (z. B. Leistungselektronik in Schaltschränken) und unter Software die Programmierung der Steuerungstechnik (z. B. Regelung und Automatisierung der Antriebe) verstanden (ISERMANN 2008, S. 4). Es erfolgt eine Gliederung in die Ausprägungen *Mechanik/Elektrik bzw. Elektronik/Software*.

Entwicklungsaufgabe:

Die Art der zu entwickelnden Aufgabe beeinflusst die Arbeit des Entwicklers. Bei einer

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Neuentwicklung sind die Anzahl und Kopplung der Komponenten sowie Module einer zu entwickelnden Maschine weniger bekannt als bei einer Anpassung oder Weiterentwicklung (MURMANN 2013, S. 60). Aus diesem Grund treten bei einer Neuentwicklung unerwartete Ereignisse auf, die zu einer Anpassung des Vorgehens führen (ROELOFSEN 2011, S. 67). Bei einer Neukonstruktion ist ein hoher Bedarf an Informationen und Abstimmungen notwendig, wobei eine Anpassung oder Weiterentwicklung auf planbares und bekanntes Wissen zurückgreifen kann (EHRENSPIEL 2009, S. 260). Das Merkmal der *Art der Entwicklungsaufgabe* ist eingeteilt in die Ausprägungen (vgl. EHRENSPIEL 2009, S.258–262): *Neuentwicklung /Anpassungsentwicklung/Variantenentwicklung (Weiterentwicklung)*.

Änderungseinflüsse:

Durch die zunehmende Überlappung von Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung ist ein hohes Maß an Abstimmungen und Koordination notwendig (LINDEMANN 2009, S. 15; SCHUH ET AL. 2010, S. 5). An die KMU wird die Erwartung gestellt, agil und adaptiv auf Veränderungen in den Entwicklungsprozessen und -werkzeugen zu reagieren (VDMA 2013b, S. 1; MILBERG & SCHUH 2013, S. 9). Zur Erfassung der Aufwände wird das Merkmal *Änderungseinflüsse* eingeführt, welches mit den Ausprägungen festgelegt ist in: *hoch/mittel/gering*.

Art der Variantenbildung:

Die Variantenbildung der Maschine gibt Auskunft über die Komplexität des Produktes und deren Maßnahmen, die zur Verringerung ergriffen werden. Der Maschinenbau setzt auf Modularisierung der unterschiedlichen Module. Eine Baureihe beschreibt dabei eine Variante durch Größenstufung bei analoger Funktion. Das Kombinieren von Bausteinen mit verschiedenartiger Funktion/Gestalt entspricht einem Baukastensystem. Die Variantenbildung auf Basis einer Plattform erfolgt durch variabler Module, die auf eine vereinheitlichte Trägerstruktur basieren. (EHRENSPIEL 2009; LINDEMANN 2006) Zusammenfassend, wird die Variantenbildung unterschieden in die Ausprägungen: *Baureihe/Baukastensystem/Plattformbauweise*.

In einem Team ist die Zusammensetzung der Erfahrungen der Entwickler entscheidend für den Erfolg von Projekten. Um die Erfahrungen der Mitarbeiter im Projekt abbilden zu können, wird eine Unterscheidung gemäß der Mechatronik zwischen den Disziplinen der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software vorgenommen. Die Anzahl der Entwickler der Disziplinen wird unterteilt in $\langle 6/6-10 \rangle 10$ Entwickler. Es werden folgende drei Merkmale abgeleitet:

- *Anzahl der Mechanik-Entwickler ($\langle 6/6-10 \rangle 10$)*

- Anzahl der Elektronik- bzw. Elektrik-Entwickler (<6/6–10/>10)
- Anzahl der Software-Entwickler (<6/6–10/>10)

4.3.3 Einflüsse auf das Referenzmodell

Die Anpassung des Referenzmodells erfolgt mittels einer Einflussmatrix, welche den positiven Einfluss der Merkmalsausprägungen der Entwicklungssituation auf die Prozessgebiete des Referenzmodells abbildet. Das Referenzmodell wird somit konfiguriert und adaptiert an die im KMU vorherrschende Entwicklungssituation. Durch die verknüpfte Struktur zwischen den Modellsichten, können die Auswirkungen auf die Referenzsichten der Funktion und der Information gleichermaßen abgeleitet werden. Zur Gewinnung der dafür notwendigen Datengrundlage wurden Expertengespräche durchgeführt (vgl. Abschnitt 1.6). Die Ergebnisse sind in die Einflussmatrix eingeflossen und werden zur Anpassung des Referenzmodells genutzt (Tabelle 4.7 und Anhang A.3).

Tabelle 4.7: Einflussmatrix am Beispiel des Merkmals Unternehmensgröße (Auszug aus Anhang A.3)

Merkmal	Ausprägung	Prozessgebiet							Aktivsumme
		AM	KM	SE	QM	SR	PP	PV	
Unternehmensgröße [Anzahl Beschäftigte]									
	<50	1	1	0	0	0	0	0	2
	50–99	1	1	0	1	0	0	0	3
	100–249	2	2	1	1	0	1	1	8
	250–999	3	2	1	2	0	1	1	10
	>999	3	2	1	2	0	1	1	10
...									
	Passivsumme	10	8	3	6	0	3	3	

Legende:

Einfluss einer Ausprägung auf ein Prozessgebiet (positiv)

- 0 – kein
- 1 – gering
- 2 – mittel
- 3 – hoch

Prozessgebiet

- AM – Anforderungsmanagement
- SR – Systemrealisierung
- KM – Konfigurationsmanagement
- PP – Projektplanung
- SE – Systementwurf
- PV – Projektverfolgung
- QM – Qualitätsmanagement

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Als ein Beispiel des Zusammenhangs der Situation in der Entwicklung und dem Referenzmodell ist der Einfluss für das Merkmal der Unternehmensgröße in einer Einflussmatrix dargestellt (Tabelle 4.7). Die Einflussmatrix ist unidirektional, d. h. gerichtet mit einer definierten Leserichtung von Spalte zu Zeile. Die zentrale Fragestellung ist dabei: *Wie beeinflusst die Ausprägung des Merkmals (z. B. Unternehmensgröße: <50 Mitarbeiter) das jeweilige Prozessgebiet (z. B. Anforderungsmanagement)?* Die Art des Einflusses ist mittels einer Skala abgebildet, mit den möglichen Werten: 0 (kein), 1 (gering), 2 (mittel), 3 (hoch). Im Falle eines kleinen Unternehmens mit 1–99 Mitarbeiter wird das Prozessgebiet des Anforderungsmanagements als kaum relevant eingeschätzt. Weiterhin ist ersichtlich, dass mit der Größe des Unternehmens die Relevanz der Prozessgebiete AM und des QM steigen. Bei den Prozessgebieten des SE, der PP und PV sind nur geringe Änderungen des Einflusses feststellbar.

4.3.4 Wesentliche Erkenntnisse

Wie das Merkmal *Unternehmensgröße* beispielhaft zeigt, beeinflusst die Entwicklungssituation die Referenzsicht des Prozesses, wodurch in der gesamtheitlichen Betrachtung der DWL auch die Auswirkungen auf die Referenzsichten der Funktion und der Information feststellbar sind. Mit Grundlage der Einflussmatrix (Anhang A.3) sind die wesentlichen Erkenntnisse für das Referenzmodell im Folgenden dargelegt:

Das Prozessgebiet des AM wird bei einem Großunternehmen als relevanter erachtet als bei einem KMU. Auch steigt der Wunsch nach einem substanziellen Anforderungsmanagement bei hohen Änderungseinflüssen und bei typischen Neuentwicklungsprojekten. Die DWL im AM müssen die Funktionen der Verwaltung (z. B. Spezifizieren) und der Wiederverwendung (z. B. Strukturieren) in einem hohen Maße zur Verfügung zu stellen. Dazu können TAM eingesetzt werden. Die interdisziplinären Informationen über eine zu entwickelnde Maschine sollten in einer Anforderungsspezifikation definiert werden.

Das Prozessgebiet des KM wird als wesentlich für Unternehmen des Maschinenbaus erachtet, wenn eine Baukasten-/Plattform-Bauweise vorhanden ist. Auch wird ein Konfigurationsmanagement bei hohen Änderungseinflüssen als wichtig erachtet. Die DWL müssen die Funktionen der Verwaltung (z. B. Strukturierung von Baukästen), der Wiederverwendung (z. B. Versionierung des Baukastens) und der Benutzerverwaltung (z. B. Zuordnung von Verantwortlichkeiten) unterstützen. Es können dazu die Techniken des TFM und des CAC eingesetzt werden.

Das Prozessgebiet des SE wird als relevant erachtet, wenn die Kernkompetenz in der Software-Entwicklung liegt. Auch der Einsatz von Baukästen ist ein Indiz für einen verstärkten Einsatz des Systementwurfs im Unternehmen. Der Systementwurf stellt hohe Anforderungen an die Funktionen der Verwaltung (z. B. Spezifizieren der Maschine), der Wiederverwendung (z. B. Strukturieren der Maschine) und der Benutzervergabe (z. B. Verwaltung der Benutzer). Im Systementwurf können verstärkt die Techniken CAC, PLM und TFM eingesetzt werden. Die Artefakte sind interdisziplinär, wie beispielsweise Systembilder, Funktions- und Strukturpläne der Maschine.

Das Prozessgebiet des QM ist relevant, wenn Neuentwicklungen vorliegen. Ebenfalls wird mit Zunahme der Unternehmensgröße die Qualitätssicherung durch Tests als wesentlich erachtet. In diesem Fall wird Anforderungen an die Wiederverwendung (z. B. das Dokumentieren von Testergebnissen), an die Automatisierung (z. B. das Ableiten von Testprotokollen) und an die Verifikation (z. B. Simulation von Kollisionen) einen hohen Stellenwert zugewiesen. Unterstützend können dabei die Techniken CAT, CAQ und VIBN eingesetzt werden. Die Ergebnisse sind Testprotokolle und Simulationsstudien.

Das Prozessgebiet SR wird als wichtig erachtet, wenn eine Neuentwicklung vorliegt. In der Folge müssen die DWL die Funktionen der Verwaltung (z. B. Spezifizieren der Software-Strukturen) und der Wiederverwendung (z. B. Strukturieren in einer zentralen Datenbank) bereitstellen. Dazu können hauptsächlich die Techniken MCAD, ECAD, CASE, CACE und CAC genutzt werden. Die Artefakte zählen vorwiegend zu den disziplinspezifischen Informationen (z. B. elektrischer Schaltplan).

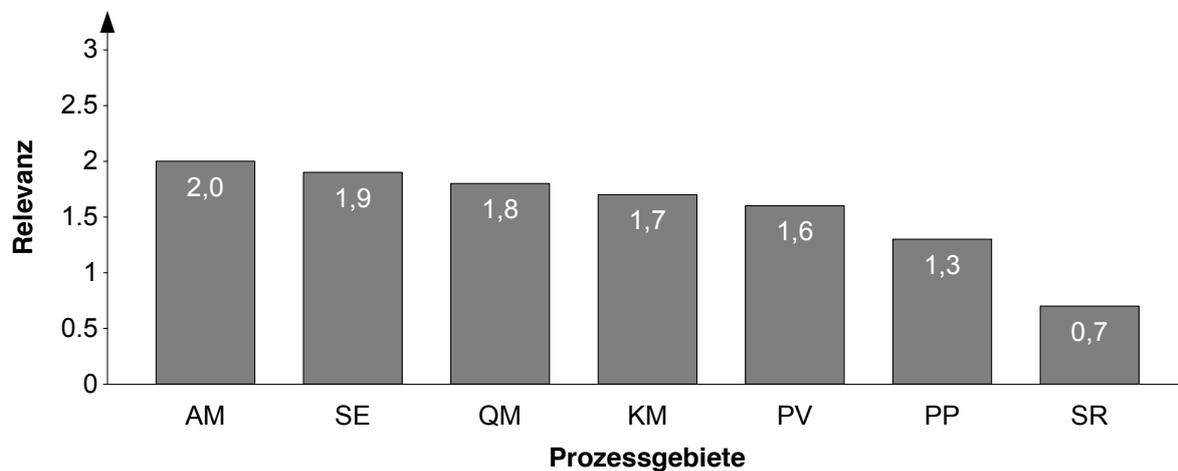
Die Prozessgebiete des PP und PV sind relevant, wenn KMU mehr als drei Entwicklungsstandorte haben und die Anzahl der Entwicklerinnen und Entwickler in den Disziplinen zunehmen. Die DWL müssen somit Funktionen der Verwaltung (z. B. Spezifizieren der Meilensteine), Kommunikation (z. B. Informieren über regelmäßige Abstimmungen) und Rollenvergabe (z. B. Zuordnung von Rollen zu den Aufgaben) zur Verfügung stellen. Hierfür wird empfohlen, die Technik des TPM einzusetzen. Die Artefakte gehören zumeist zu den organisationsbezogenen Informationen (z. B. Zeitplan).

4.3.5 Eingrenzung des Bewertungsobjektes

Die Typisierung der Entwicklung anhand der Merkmale und Ausprägungen der Entwicklungssituation ermöglicht es, das Referenzmodell *zuzuschneiden* und damit das Bewertungsobjekt einzugrenzen. Dem Anwender der Methodik soll ein weitgehend einfaches Vorgehen zur Verfügung gestellt werden, welches eine unnötig hohe Anzahl an

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Kriterien zur Bewertung der DWL vermeidet. Bei der Typisierung ist die Entwicklung eines Unternehmens in der Art kategorisiert, dass ein jedes der neun Merkmale durch eine eindeutige Ausprägung festgelegt ist. Insgesamt sind dadurch über 32.000 theoretische Kombinationen einer Entwicklungssituation möglich, wodurch eine hinreichende Differenzierung für die Branche des Maschinenbaus anzunehmen ist. Für jede der theoretischen Situationen in der Entwicklung kann die Relevanz der Prozessgebiete des Referenzmodells bestimmt werden. Dazu wird die weitgehende Unabhängigkeit der Merkmale genutzt, um die Einflüsse der einzelnen Ausprägungen für ein jedes Prozessgebiet zu bestimmen. Im Ergebnis ergibt sich die Relevanz aus dem Mittelwert der Einflüsse in jedem Prozessgebiet. Die Relevanz repräsentiert somit den kombinierten Einfluss der spezifischen Entwicklungssituation des KMU auf das Referenzmodell.



Legende:

Relevanz (Skala)

0 – keine

1 – gering

2 – mittel

3 – hoch

Prozessgebiet

AM – Anforderungsmanagement

KM – Konfigurationsmanagement

PP – Projektmanagement

PV – Projektverfolgung

SE – Systemrealisierung

SR – Systemrealisierung

QM – Qualitätsmanagement

Abbildung 4.7: Relevanz der Prozessgebiete (Beispiel)

Als ein Beispiel sei ein KMU von etwa 150 Mitarbeitern angenommen (Abbildung 4.7). Das Unternehmen verfügt über vier Entwicklungsstandorte. Die Kernkompetenz liegt in der Software-Entwicklung. Die Aufgaben in den Projekten sind vorwiegend Neuentwicklungen. Die Zusammenarbeit mit den Kunden des KMU ist von hohen Änderungseinflüssen geprägt. Bei der Variantenbildung werden Baureihen verwendet. Es sind sechs Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus der Mechanik-Entwicklung, sieben aus der Elektrik-/Elektronik-Entwicklung und elf aus der Software-Entwicklung an einem typischen Entwicklungsprojekt beteiligt. Aus der genannten Entwicklungssituation lassen sich die Relevanz für ein jedes Prozessgebiet bestimmen und als Entscheidungsgrundlage absteigend grafisch

darstellen (Abbildung 4.7). Im Vergleich beeinflusst die Entwicklungssituation das AM am stärksten, mit einer Relevanz von 2,0 (mittel).

Auf Basis der Relevanz kann entschieden werden, welche der Prozessgebiete in der Bewertung betrachtet werden sollen (Phase 3). Es ist zu empfehlen, diejenigen auszuwählen, die eine mittlere bis hohe Relevanz aufweisen. Auch sollten Prozessgebiete mit einer höheren Relevanz im Vergleich zu den anderen priorisiert werden. Für die Bewertung sollten so wenige wie nötig, jedoch mindestens ein Prozessgebiet ausgewählt werden. Ähnlich dem Ansatz nach NORTON (1985) können die Bereiche mit einem hohen Handlungsbedarf in der Bewertung fokussiert werden. Dadurch kann die Anzahl der Referenzanforderungen für die spätere Bewertung auf ein notwendiges Maß eingeschränkt werden. Für das Beispiel ist es sinnvoll, das AM auszuwählen (Abbildung 4.7). Die Referenzanforderungen für die Bewertung der DWL können von 250 (gesamtes Referenzmodell) auf 32 (Prozessgebiet AM) eingeschränkt werden. Den KMU kann ein spezifisches Referenzmodell zur Verfügung gestellt werden.

4.4 Bewertung der digitalen Werkzeuglandschaften

4.4.1 Übersicht

Die Bewertung ist die Ermittlung des Ist-Zustands der DWL, wie aktuell im Unternehmen eingesetzt. Es wird das Ziel verfolgt, die vorhandenen Software-Lösungen unter den Gesichtspunkten der Mechatronik zu beurteilen. Die Bewertungsträger repräsentieren Ingenieurinnen und Ingenieure in den Arbeitsfeldern der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- oder Software-Entwicklung. Der Maßstab orientiert sich an den Kriterien der Anwendbarkeit und Praktikabilität. Die Bewertung nutzt hierzu bestehende Konzepte aus der Informatik, die für den spezifischen Einsatz übertragen und adaptiert werden.

Die Phase zur Bewertung der Ist-Landschaft basiert auf den Ergebnissen der beiden Phasen 1 und 2 (Abbildung 4.8). Die Referenzanforderungen der als relevant ermittelten Prozessgebiete des Referenzmodells werden als Bewertungskriterien der Ist-Landschaft in eine Kartographie überführt (Schritt 3.a). Die Kartographie stellt eine Systematik angelehnt an das Verfahren der QFD den Anwendern zur Verfügung. Dazu wird auf den Ausführungen der Veröffentlichung DRESCHER ET AL. (2013b) aufgebaut und die QFD für die Arbeit angepasst und überführt. Aufbauend auf der Kartographie kann die mechatronische Fähigkeitsstufe der Landschaft bestimmt werden (Schritt 3.b). Die DWL kann in Quadranten der Interoperabilität eingeordnet werden (Schritt 3.c).

4 Methodik zur situationspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

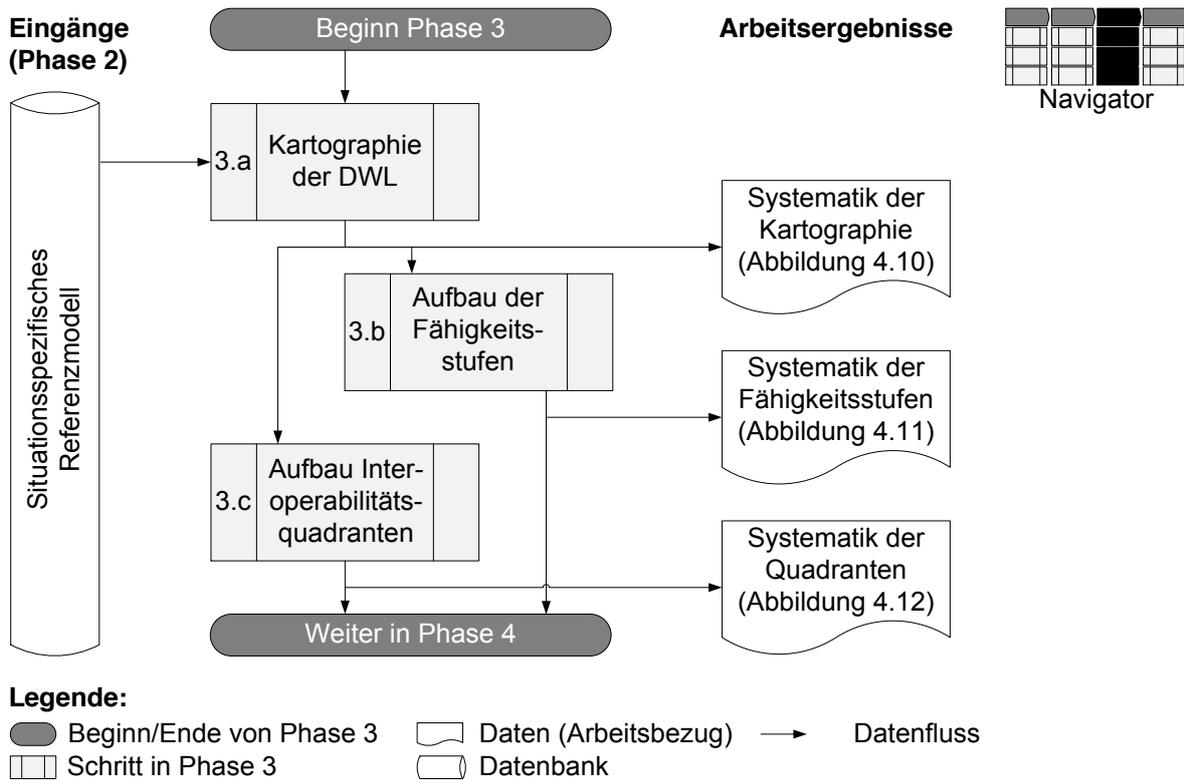


Abbildung 4.8: Bewertung der Ist-Landschaft (Phase 3)

4.4.2 Kartographie der digitalen Werkzeuglandschaften

Die QFD-Philosophie verfolgt einen formalisierten, systematischen Ansatz, um die Produktmerkmale und auch die Auswahl der Produktionsmittel, -prozesse und Kontrollverfahren festzulegen (REINHART 1996, S. 53). Die zentrale Frage-Antwort-Paarung ist dabei die *Was-Wie*-Umsetzung, wobei das *Was* die Kundenanforderung und das *Wie* die Antwort oder auch die Realisierung darstellt (Abbildung 4.9a). Das Ziel bilden die Kundenanforderungen nach der Frage: „Was braucht der Kunde?“ Für die Umsetzung wird die Frage gestellt nach dem „Wie bekommt man es, stellt man es her und zur Verfügung, setzt man es ein, geht man damit um, soll das erreicht werden?“ (REINHART 1996, S. 53-57). Der QFD-Ansatz ermöglicht es somit, die „(...) Stimme des Kunden mit der Stimme des Ingenieurs (...)“ (REINHART 1996, S. 61) strukturiert und systematisch zu verbinden. Die Gruppierungen mittels hierarchischer Baumstrukturen bieten dabei Potenziale zur Anwendung außerhalb des technischen Produktmanagements, wie beispielsweise zur Beschreibung von DWL, die in einer ähnlichen Art und Weise in Hierarchien gegliedert werden können.

So kann die Kartographie an den QFD-Ansatz unter Berücksichtigung verschiedener *Stakeholder* angelehnt und in der Form adaptiert werden, indem anstatt zwei, drei wesent-

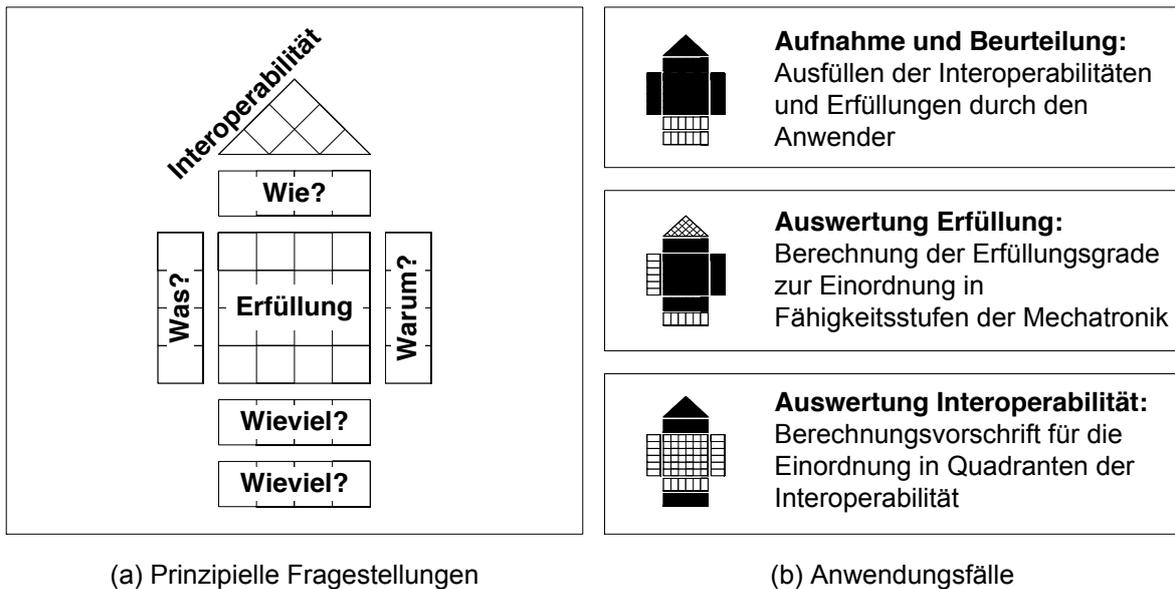


Abbildung 4.9: Kartographie einer DWL orientiert am Ansatz der QFD nach REINHART (1996, S. 57–58)

liche Stimmen vereint werden: die *Stimme der Mechatronik*, die *Stimme des Ingenieurs* und die *Stimme der Software-Hersteller* (Abbildung 4.9a). Den Weg der *Stimme der Mechatronik* stellt keine konkrete Rolle im eigentlichen Sinne dar, sondern repräsentiert den allgemeinen Wandel von mechanischen zu mechatronischen Maschinen und Anlagen. Es wird die Frage nach dem *Was* in der Art beantwortet, indem die Referenzanforderungen von relevanten Prozessgebieten gelistet werden (Arbeitsergebnisse der Phase 2). Die *Stimme des Ingenieurs* stellt das Pendant zu den im QFD-Ansatz beschriebenen Kunden dar. Sie wird berücksichtigt, indem die Frage des *Warums* mit einer Priorisierung der Referenzanforderungen nach Muss, Soll, Kann ermöglicht werden. Die *Stimme des Software-Herstellers* findet sich in der informationstechnischen Umsetzung der Referenzanforderungen in der Fragestellung nach dem *Wie* wider. Die Architektur der DWL wird in die informationstechnischen Bestandteile der digitalen Werkzeuge vereinzelt. Die Interoperabilitätsmatrix erfasst die Kommunikation zwischen den digitalen Werkzeugen. Die Frage nach dem *Wieviel* stellt die Auswertung der Beurteilungen der Anwender dar.

In der Kartographie wird die DWL des KMU aufgenommen und durch die Anwender beurteilt (Abbildung 4.9b). Dazu werden die Fragestellungen nach dem *Was*, *Wie* und *Warum* beantwortet. Die Beurteilung erfolgt in der Erfüllungs- und der Interoperabilitätsmatrix. Die Auswertung der Erfüllungsmatrix stellt die Grundlage dar, um eine Einordnung in die Fähigkeitsstufen der Mechatronik vorzunehmen. Die Auswertung der Interoperabilitätsmatrix hingegen ermöglicht die Einordnung in die Quadranten der Interoperabilität. Es werden Berechnungsvorschriften vorgestellt, die auf den Beurteilungen in den Matrizen

a *Übernahme der Referenzanforderungen:*

Die Referenzanforderungen aus dem spezifischen Referenzmodell (Abschnitt 4.3) werden in die Kartographie als Bewertungskriterien eingetragen. Dazu zählen diejenigen Referenzanforderungen, die dem ausgewählten Prozessgebiets (z. B. des AM) zugeordnet sind. Die Gruppierung erfolgt anhand der Aktivitäten des Prozessgebiets (z. B. Anforderungen spezifizieren). Eine Referenzanforderung kann beispielsweise RA001 „Erstellung und Verwaltung einer Anforderungsspezifikation unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten“ sein.

b *Bestimmung des Typs:*

Der Anwender der Kartographie nimmt eine Untergliederung der Referenzanforderungen in Muss, Soll und Kann vor. Der Typ Muss repräsentieren grundlegende, der Typ Soll bewusst wahrgenommene und der Typ Kann zusätzliche Referenzanforderungen an die DWL aus Sicht der Anwender. Die Referenzanforderung RA001 ist im Beispiel als eine Muss-Anforderung eingestuft.

c *Aufgliederung der DWL:*

Die Architektur der Landschaft wird in die strukturellen Bestandteile aufgliedert und in die Kartographie eingetragen. Das Aufteilen in die Bestandteile ist dabei oftmals durch Software-technische oder herstellerbezogene Gegebenheiten bestimmt. Für das Beispiel wird in die digitalen Werkzeuge DW 1, DW 2, DW 3 und DW 4 unterschieden (Abbildung 4.10). Zur weiteren Ausführung des Vorgehens zur Aufgliederung von DWL ist auf die Veröffentlichung DRESCHER ET AL. (2013b) verwiesen.

d *Beurteilung der Erfüllungen (Matrix):*

Die Umsetzung der Mechatronik wird mittels der Erfüllung der Referenzanforderungen durch die digitalen Werkzeuge erfasst. Eine Mehrfachzuordnung hat sich in der Anwendung als sinnvoll herausgestellt, da diese auf eine inhaltliche Übereinstimmung, eine Verknüpfung oder einen hohen Bedarf an Kooperation zwischen den Werkzeugen hinweist. Die Skala gibt Auskunft, ob eine Referenzanforderung durch ein Werkzeug erfüllt („1“) oder nicht erfüllt („0“) ist. Ebenfalls ist eine Einstufung als nicht notwendig („-“) möglich. Im Beispiel ist die Referenzanforderung RA001 durch DW 1 erfüllt.

e *Beurteilung der Interoperabilitäten (Matrix):*

Die Zusammenarbeit innerhalb in der DWL wird mittels der Interoperabilitätsmatrix berücksichtigt. Maßgeblich ist die Qualität der Schnittstelle, die in einer verknüpften Architektur die bestimmende Größe darstellt. Für eine Einteilung werden die grundlegenden Gedanken von DYLA (2002) aufgegriffen, da diese als einfach und praktikabel für den Einsatz im Maschinenbau anzusehen sind. Es wird eine Gliederung in eine Datenübertragung „mit

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

manuellen Aufwänden“, „mit systemspezifischen Konvertierungen“, „mit systemneutralen Formaten“ und „mit einem systemneutralen Produktmodellen“ vorgenommen (vgl. Abschnitt 3.3). Im Beispiel herrschen manuelle Ein- und Ausgaben zwischen den digitalen Werkzeugen DW 1 und DW 4 vor.

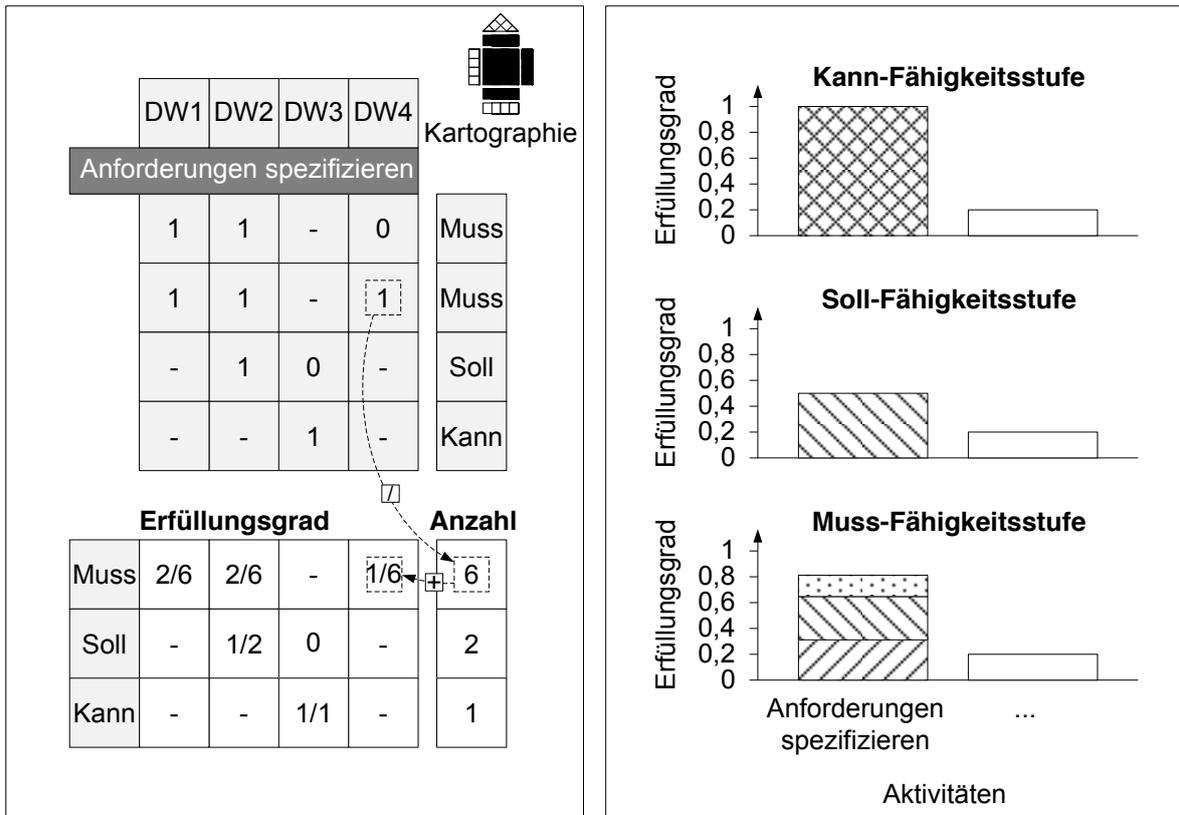
4.4.3 Fähigkeitsstufen der Mechatronik

Die Fähigkeitsstufen greifen die Grundgedanken von KANO ET AL. (1984) auf, welche die Anforderungen an Produkte nach Kundenzufriedenheit und Qualitätseigenschaften charakterisieren (vgl. SEDER & ALHAZZA, M. H. F. 2014; HINTERHUBER & MATZLER 2013; REINHART 1996, S. 45–49). Es wird der Zusammenhang zwischen den Merkmalen eines Produktes und der Zufriedenheit der Kunden abgebildet. Der Ansatz von KANO ET AL. (1984) unterscheidet in die fünf Ebenen der Qualität: grundlegende, leistungsbezogene, begeisternde, unerhebliche und zurückweisende Merkmale. Für die Fähigkeitsstufen in dieser Arbeit wird eine anwenderorientierte und einfache Lösung empfohlen. Orientiert an KANO ET AL. (1984) wird zwischen den Fähigkeitsstufen Muss, Kann und Soll unterschieden. Aufgetragen in diskrete und aufbauende Stufen können folgende Fähigkeitsstufen der Mechatronik definiert werden (Abbildung 4.11):

- *Muss-Fähigkeitsstufe:*
Die Fähigkeitsstufe enthält grundlegende und selbstverständliche Basis-Anforderungen an die DWL. Es kann zwar eine Wettbewerbsdifferenzierung der DWL in dieser Stufe ausgeschlossen werden, jedoch führt eine Nichterfüllung zu Unzufriedenheit beim Anwender.
- *Soll-Fähigkeitsstufe:*
Die Fähigkeitsstufe beinhaltet Anforderungen, die bewusst durch den Anwender wahrgenommen werden. Es wird die Leistung der DWL dargestellt, die sowohl zu Zufriedenheit als auch Unzufriedenheit bei den Ingenieurinnen und Ingenieuren führen kann.
- *Kann-Fähigkeitsstufe:*
In der Fähigkeitsstufe sind Kann-Anforderungen verortet, mit denen der Anwender nicht rechnet. Die Erfüllung der Stufe kann eine Begeisterung gegenüber anderen Landschaften hervorrufen und einen überproportionalen Nutzengewinn erzeugen.

Um die Fähigkeitsstufe für die DWL zu bestimmen, ist die Erfüllungsmatrix aus der Kartographie auszuwerten. Anhand der Aktivität *Anforderungen spezifizieren* im Prozessgebiet AM ist gezeigt (Abbildung 4.11a), wie die Erfüllungsgrade für eine jede Fähigkeitsstu-

4.4 Bewertung der digitalen Werkzeuglandschaften



(a) Berechnung der Erfüllungsgrade in den Fähigkeitsstufen

(b) Fähigkeitsstufen der Mechatronik

Legende:

Aktivität (Referenzmodell)	Division	DW – Digitales Werkzeug	DW 3
Festlegung aus der Methodik	Addition	DW 1	DW 4
Berechnung des Anwenders	Beispiel	DW 2	Weitere DW

Abbildung 4.11: Fähigkeitsstufen (Beispiel)

fe zu berechnen sind. So sind beispielsweise zwei Referenzanforderungen der Muss-Fähigkeitsstufe zugeordnet, die insgesamt sechs Felder in der Matrix einnehmen (Anzahl). Die Erfüllungsgrade eines jeden digitalen Werkzeuges sind aus den Mittelwerten bezogen auf die Anzahl der zutreffenden Felder der Stufe berechnet. Im Beispiel liegen diese für DW 1 und DW 2 bei 2/6 und für DW 4 bei 1/6. Die Erfüllungsgrade sind in die grafische Darstellung der Fähigkeitsstufen zu übernehmen (Abbildung 4.11b). In einer jeden Stufe wird der Beitrag der digitalen Werkzeuge sichtbar. So erfüllen die digitalen Werkzeuge DW 1, DW 2 und DW 4 insgesamt 5/6 der maximalen Ausprägung der Muss-Fähigkeitsstufe für die Aktivität *Anforderungen spezifizieren*. Weitere Aktivitäten des Prozessgebiets AM sind in analoger Art und Weise zu berechnen.

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Ausgehend von den Erfüllungsgraden ist es möglich, Zielzustände zu definieren und eine schrittweise Verbesserung einzuleiten. Das Beispiel führt vor Augen (Abbildung 4.11b), dass die Muss-Fähigkeitsstufe nicht vollständig durch die Werkzeuge erfüllt ist. Als Zielsystem kann daher definiert werden, dass jegliche Referenzanforderungen der Muss-Fähigkeitsstufe zunächst zu erfüllen sind, um die aufbauende Soll-Fähigkeitsstufe zu erreichen. Das Zielbild beschreibt somit einen Soll-Zustand, der aus Referenzanforderungen zur Erreichung der aufbauenden, nächst höheren Fähigkeitsstufe besteht. Zur Überführung von einem Ist zu einem Soll ist es notwendig, Handlungsempfehlungen abzuleiten, die sich aus dem o. g. Defizit der Erfüllung der Referenzanforderungen ergeben und spezifisch in einem Lastenheft zusammengefasst werden (Abschnitt 4.5).

4.4.4 Quadranten der Interoperabilität

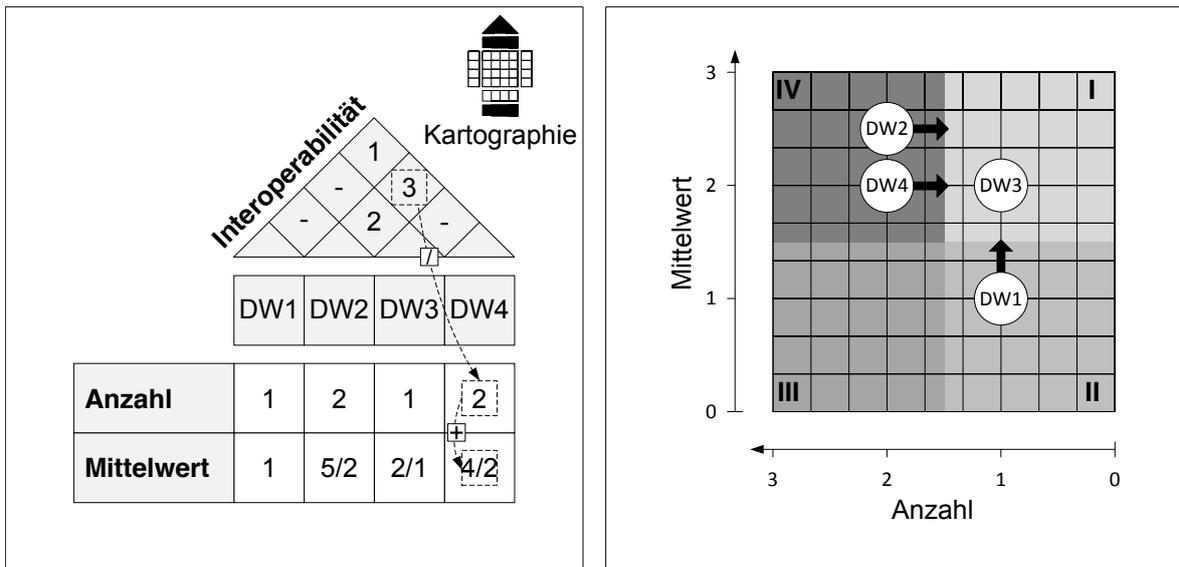
Während die Fähigkeitsstufen eine Möglichkeit darstellen, um die DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik zu untersuchen, nimmt die Zusammenarbeit der Werkzeuge in der Landschaft einen systemischen Blick vor. Es wird eine Systematik vorgestellt, die mittels einer Quadranten-Logik die Einordnung der digitalen Werkzeuge einer Landschaft vornimmt. Zur Erklärung der Zusammenarbeit wird die Begriffsbestimmung aufgegriffen (vgl. Abschnitt 2.3) und eine Orientierung an der Landschaftsgestaltung vorgenommen. Im Ergebnis sind die Quadranten der Interoperabilität wie folgt definiert (Abbildung 4.12).

Inselartige Systeme:

Die Systeme sind bestimmt durch einen mangelhaften Datenaustausch und bedürfen einer manuellen Übertragung von Artefakten (z. B. Anforderungsspezifikation) durch die Entwicklerinnen und Entwickler aus einem Werkzeug in ein weiteres innerhalb der Landschaft. Die Gründe der Medienbrüche sind oftmals in dem Einsatz von Eigenentwicklungen ohne standardisierte Übertragungsformate oder in dem Bezug von Werkzeugen unterschiedlicher Software-Hersteller zu suchen.

Interoperable Systeme:

Es herrschen bidirektionale und systemneutrale Schnittstellen zwischen den digitalen Werkzeugen vor. Die Formate beruhen auf industriellen Normen und Standards (vgl. Abschnitt 3.3, Tabelle 3.2). Dadurch können die manuellen Übertragungen oder enormen Konvertierungsaufwände vermieden werden. Interoperable Systeme zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität und einen zumeist problemlosen Austausch oder eine Ankopplung von weiteren Systemen aus.



(a) Berechnungsvorschrift ausgehend von der Kartographie der DWL

(b) Einordnung der digitalen Werkzeuge in die Quadranten der Interoperabilität

Legende:

- | | | | |
|-------------------------------|------------|-------------------|------------------|
| □ Festlegung aus der Methodik | / Division | I integriert | III inselartig |
| □ Berechnung des Anwenders | + Addition | II teilintegriert | IV Interoperabel |
| DW – Digitales Werkzeug | □ Beispiel | → Zielrichtung | ○ DW 1-4 |

Abbildung 4.12: Quadranten der Interoperabilität (Beispiel)

Teilintegrierte Systeme:

Ähnlich wie die inselartigen Systeme herrschen mangelhafte Schnittstellen vor, die jedoch im Vergleich von einer reduzierten Anzahl sind. Oftmals verfügen die Werkzeuge in diesem Quadranten über einen hohen Funktionsumfang, sind meist von einem Hersteller und stellen Informationen in einer zentralen Datenbank bereit.

Integrierte Systeme:

Die DWL ist gekennzeichnet durch ein zentrales und bereichsübergreifendes Kernwerkzeug. Dieses Werkzeug ist typischerweise durch das Zusammenlegen von mehreren Funktionen aus Vorgängersystemen entstanden. Dadurch können zusätzliche Funktionen zur Verfügung gestellt werden, die zuvor nicht vorhanden waren.

Die Einordnung in die Quadranten basiert auf der Auswertung der Interoperabilitätsmatrix (Abbildung 4.12a). Dazu werden die Anzahl und der Mittelwert eines jeden Werkzeuges in der Matrix berechnet. Die Anzahl gibt Auskunft über die Integration des Werkzeuges in die DWL. Der Mittelwert repräsentiert die Qualität der Schnittstellen zu weiteren Werkzeugen in der Landschaft. Die grafische Darstellung wird anhand des Mittelwertes (Ordinate) und der Anzahl (Abszisse) der Schnittstellen aufgespannt und ermöglicht die

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

grafische Separation in die Quadranten der Interoperabilität (Abbildung 4.12b). So verfügt beispielsweise das Werkzeug DW 4 über zwei Schnittstellen von mittlerer Qualität, d. h. es werden systemneutrale Formate zum Datenaustausch eingesetzt. Das Werkzeug des Anwenderunternehmens kann in den Quadranten IV (interoperable Systeme) eingeordnet werden. Dieser Quadrant zeichnet sich im Allgemeinen durch eine hohe Anzahl an und eine hohe Qualität der Schnittstellen aus.

Ausgehend von der Einordnung der Werkzeuge in die Quadranten kann die Zielrichtung festgelegt werden (Abbildung 4.12b). Der Quadrant I (integrierte Systeme) ist als globaler Zielquadrant zu verstehen. Für digitale Werkzeuge in dem Quadranten besteht kein Handlungsbedarf (DW 3). Für die Werkzeuge im Quadranten II und IV (teilintegrierte und interoperable Systeme) liegen hingegen die Zielrichtung in der Erreichung von integrierten Systemen (DW 1, DW 2 und DW 4), um die Brüche des Informationsflusses durch Schnittstellen geschickt zu vermeiden und erweiterte Funktionsbereiche der Software zu erschließen. Erhöhter Handlungsbedarf besteht für die Werkzeuge des Quadranten III (inselartige Systeme). Die Schnittstellen sind in der Anzahl zu reduzieren, um in den Quadrant der teilintegrierten Systeme zu gelangen. Die Qualität der Schnittstellen ist zu erhöhen, um den Quadranten der interoperablen Systeme zu erreichen. In Abhängigkeit der Zielrichtung können Handlungsempfehlungen zur Erreichung in einem Lastenheft zusammengestellt werden.

4.5 Gestaltung des Beschaffungsprozesses

4.5.1 Übersicht und Einordnung

Für die Gestaltung der DWL in Phase 4 werden diejenigen Referenzanforderungen aus Phase 2 als Handlungsempfehlungen in das Lastenheft übertragen, die für das Erreichen der Zielstufe und des Zielquadranten in Phase 3 identifiziert worden sind (Abbildung 4.13). Das Lastenheft stellt dabei ein strukturiertes und ein praxistaugliches Hilfsmittel für die KMU dar, um die Belange der Mechatronik in den Beschaffungsprozess zu integrieren (Schritt 4.a). Aufbauend auf dem Lastenheft wird ein zusätzliches methodengestütztes Vorgehen entwickelt, welches die Auswahl von Software-Alternativen am Markt vereinfacht (Schritt 4.b). Im Ergebnis werden Kostenkriterien und eine auf der Methode des Linear Performance Pricing (LPP) nach NEWMAN & KREHBIEL (2007) angepasste Systematik empfohlen. Abschließend wird die Überführung in die Praxis durch die Realisierung der Methodik in einem Rechnerwerkzeug unterstützt (Schritt 4.c).

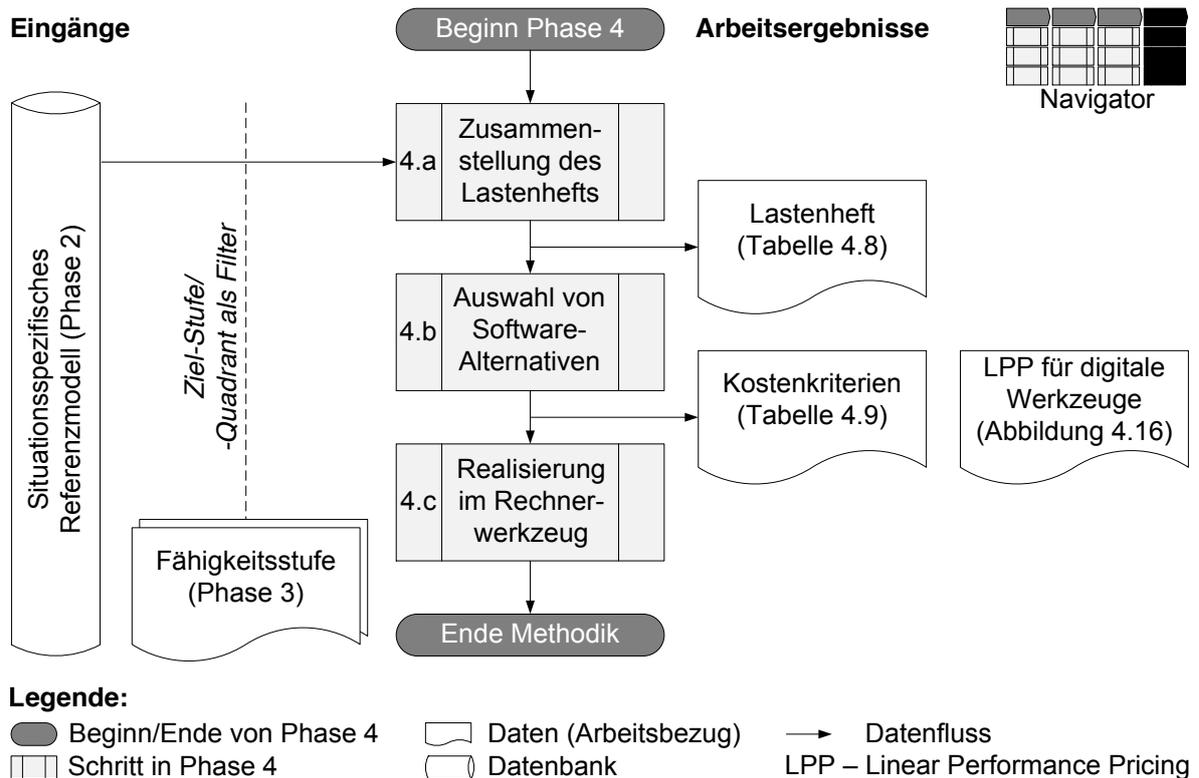
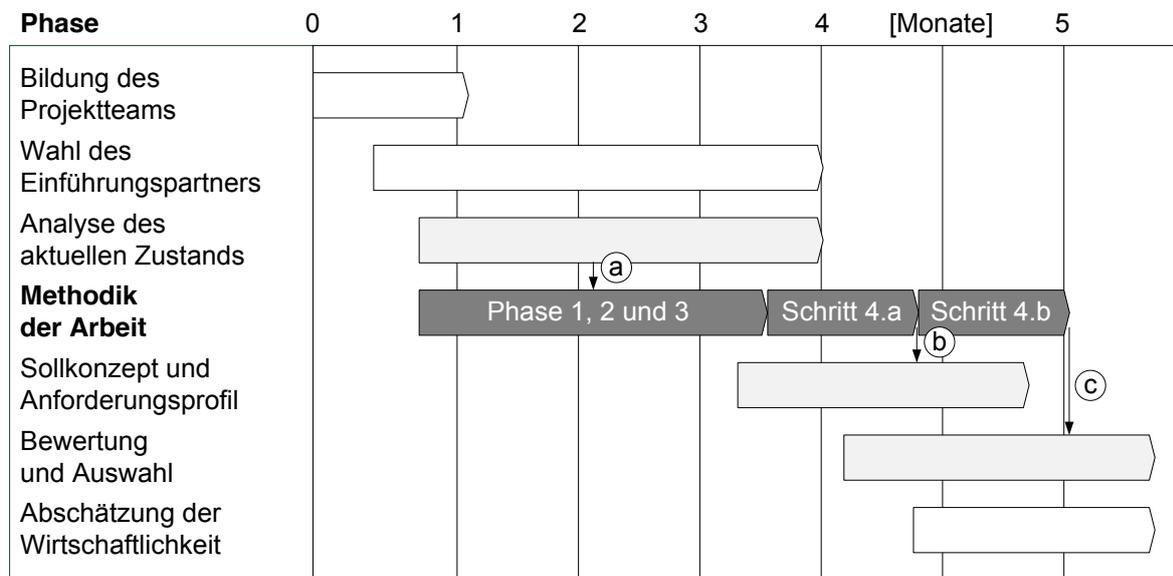


Abbildung 4.13: Gestaltung des Beschaffungsprozesses (Phase 4)

Der Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen ermöglicht es, die Handlungsempfehlungen praxistauglich in die KMU zu integrieren (Abbildung 4.14). Es werden Experten und Entscheidungsträger in den Prozess involviert, Anforderungen und Wünsche an die zukünftigen Systeme festgehalten und gestalterisch in die IT-Bebauung innerhalb der Entwicklung eingegriffen. Im Kern wird ein schrittweises Vorgehen empfohlen, welches mit der Gründung eines Projektteams beginnt, den Ist-Stand der IT-Systeme analysiert und die Ergebnisse in die Auswahl von geeigneten Alternativen am Markt münden (VAJNA 2009). Die Methodik ergänzt den Beschaffungsprozess an definierten Integrationspunkten. So fließen die Ergebnisse aus der Analyse des aktuellen Zustandes in die Methodik im Rahmen von Phase 2 und 3 ein. Die Informationen tragen zur Charakterisierung der Entwicklungssituation bei (Informationsfluss a). Zentrales Ergebnis der Methodik in dieser Arbeit ist ein Lastenheft, welches in das Anforderungsprofil an die zukünftigen IT-Systeme einfließt (Informationsfluss b). Das Vorgehen zur Auswahl von Software-Alternativen unterstützt den Beschaffungsprozess, indem es die Vielzahl an Software-Alternativen reduziert, die für eine Migration oder Einführung im KMU in Frage kommen. Die Vorauswahl fließt in die Bewertung und Auswahl ein und trägt zur Verkürzung der Phase bei (Informationsfluss c).

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau



Legende:

- Informationsfluss a, b, c
- Phasen des Beschaffungsprozesses
- Relevante Phasen für die Integration
- Methodik der Arbeit

Abbildung 4.14: Integration in den Beschaffungsprozess in Anlehnung an VAJNA (2009, S. 444)

4.5.2 Lastenheft zur Software-Pflege und -Beschaffung

Die Auswahl von Software-Alternativen am Markt basiert auf den abgeleiteten Handlungsempfehlungen des Lastenheftes (Tabelle 4.8). Dazu wird eine Unterteilung in Handlungsempfehlungen aus Sicht der Mechatronik, aus Sicht der Interoperabilität und aus Sicht der Rahmenkriterien vorgeschlagen. Die Handlungsempfehlungen aus Sicht der Mechatronik sind zunächst die Kriterien in der Muss-Fähigkeitsstufe zu erfüllen. Im Beispiel ist das Bewertungs- und Gestaltungsobjekt durch das Prozessgebiet des AM festgelegt. So muss das zukünftige IT-System das Kriterium A13 erfüllen, welches eine Definition der Leistungsmerkmale der Maschine oder Anlage (z. B. Zeitverhalten) einfordert. Die Handlungsempfehlungen aus Sicht der Interoperabilität ergeben sich aus dem Zielquadranten zur Erreichung von integrierten Systemen. Diese sind im Beispiel in die Schnittstellen der digitalen Werkzeuge DW 1, DW 2, DW 3 und DW 4. Das zukünftige IT-System muss die Begrifflichkeiten des AM zum Werkzeug DW 4 automatisch synchronisieren. Zusätzlich werden Rahmenkriterien an die am Markt vorhandenen Software-Alternativen gestellt. Im Beispiel muss das digitale Werkzeug von Systemlieferanten bezogen werden, die bereits Vertragspartner des KMU sind oder zu denen intensive Geschäftsbeziehungen aus Vorgängerprojekten bestehen.

Tabelle 4.8: Lastenheft (Auszug eines Beispiels)

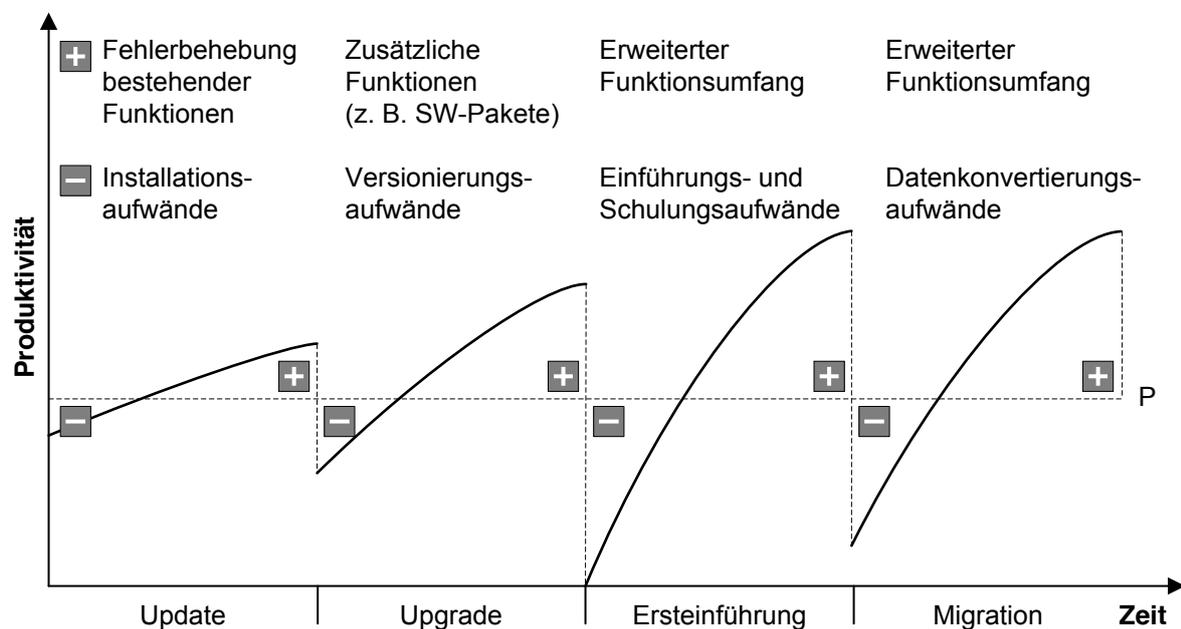
no.	Typ	Kriterien an das zukünftige IT-System
Prozessgebiet Anforderungsmanagement (Ziel: Erfüllung der Muss-Fähigkeitsstufe)		
Anforderungen spezifizieren (9 Kriterien)		
A11	Muss	Erstellung und Verwaltung einer Anforderungsspezifikation unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten.
A12	Muss	Projektübergreifende Bereitstellung von Sicherheitsvorschriften der Maschine oder Anlage.
A13	Muss	Definition der Leistungsmerkmale der Maschine (z. B. Zeitverhalten oder Lebensdauer).
Anforderungen strukturieren (3 Kriterien)		
Anforderungen prüfen (3 Kriterien)		
Interoperabilität (Ziel: Integrierte Systeme)		
Rahmenkriterien		

Bei der Beschaffung stehen die Anwender vor der Entscheidung zwischen Individual- und Standard-Software. Bei Individual-Software handelt sich um eine *maßgeschneiderte* Software, die kundenindividuelle Probleme löst (DIEHL 2013, S. 12). Im Gegensatz zu der Einzigartigkeit von Individual-Software, setzen Unternehmen bei der Einführung von Standard-Software auf sogenannte *Commercial Off The Shelf Software*, d. h. auf kommerziell erhältliche digitale Werkzeuge, die gekauft, geleast oder lizenziert werden können (MASAK 2006, S. 241–242). Da es sich dabei um eine Make-or-Buy-Entscheidung handelt, ob Individual- oder Standard-Software in die bestehende DWL aufgenommen werden soll, sei auf die in der Literatur vielfältige Diskussion der Vor- und Nachteile verwiesen: KRUMAR (2015, S. 211–214), BÖHM & FUCHS (2002, S. 538). Aufgrund von Bemühungen zur Standardisierung von Entwicklungsprozessen, der verbundenen Kostenvorteile in der Beschaffung und der geringen Mitarbeiteraufwände fokussiert die Arbeit Standard-Software als Mittel zur Verbesserung von Ist-Landschaften.

Für die Überführung der Handlungsempfehlungen des Lastenheftes wird eine stufenweise Umsetzung bei KMU empfohlen (Abbildung 4.15). Im Gegensatz zu einem sogenannten Big-Bang-Ansatz, der eine Vielzahl an digitalen Werkzeugen auf einmal ablöst oder einführt, liegen die Vorteile eines schrittweisen Vorgehens in einer höheren Akzeptanz bei Unternehmen aufgrund von einer geringeren Mitarbeiterbelastung, einer hohen Flexibilität und eines geringen Risikos (BERNROIDER & KOCH 2003, S. 1–10). Weiterhin können die Lerneffekte bei der Einführung des Werkzeuges graduell im Unternehmen

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

verankert werden. Ein stufenweises Vorgehen empfiehlt in erster Linie die Maßnahme des Updates oder des Upgrades der Werkzeuge. Die Verbesserungen werden zwar oftmals als marginal beschrieben, können jedoch ausreichend sein, um die im Lastenheft vorgeschriebenen Handlungsempfehlungen umzusetzen. Wenn Updates oder Upgrades nicht angemessen sind, empfiehlt sich die Migration oder die Neueinführung eines Werkzeuges. Die Migration setzt dabei zumeist auf die Erneuerung von bestehenden Funktionen mit einem geringen Zugewinn an Funktionalität, während die Neueinführung das explizite Ziel eines zusätzlichen Funktionsgewinns dargestellt. Im Folgenden werden die Maßnahmen dargelegt (Abbildung 4.15):



Legende:

+ Produktivitätsgewinn
 - Aufwände
 P – Produktivitätsmedian

Abbildung 4.15: Produktivitätsverlauf der Maßnahmen in Anlehnung an VAJNA (2009)

Update bzw. Aktualisierung:

Ein Update setzt auf die bestehenden digitalen Werkzeuge auf, indem die Software-Lösung durch eine höhere Version ersetzt wird. Es wird als ein Teil der Software-Pflege angesehen (VAJNA 2009, S. 235), wobei der Wechsel zumeist kostenlos durch den Hersteller angeboten wird. Diese betrifft oftmals die Fehlerbehebungen von bestehenden Funktionalitäten der Anwendungs-Software.

Upgrade bzw. Aufrüstung:

Bei einem Upgrade (Aufrüstung) wird die Software technisch weiterentwickelt, ohne eine Veränderung der wesentlichen Grundlagen und Funktionalitäten (KNOPP 2014).

Ersteinführung:

Gibt es innerhalb des Unternehmens bisher keine digitalen Anwendungen, die die geforderten Anforderungen des Lastenhefts erfüllen, ist eine Einführung eines digitalen Werkzeuges notwendig (VAJNA 2009, S. 443). Erweiterte Funktionen werden verstärkt in der signifikanten Steigerung der Modellqualitäten (3D-Modelle) von leistungsfähigen Simulations- sowie Animationsfunktionen und in der Unterstützung bei der Datenintegration wie auch der Parallelisierung der Prozesse gesehen (VAJNA 2009, S. 445). Die Aufwände einer Einführung liegen im Customizing der Standard-Software, d. h. der Anpassung an die im Unternehmen vorherrschenden Gegebenheiten (VAJNA 2009, S. 444–445). Für eine Einführung sind organisatorische Aufwände wie die Schulung von Mitarbeitern wesentliche Produktivitätsinhibitoren, um die Nutzung des digitalen Werkzeuges als tägliches Hilfsmittel zu fördern (VAJNA 2009, S. 444–445). Für weitere Ausführungen zur Ersteinführung von digitalen Werkzeugen sei auf BRACHT ET AL. (2011, S. 219–248), VAJNA (2009, S. 443–468), ENCARNACAO ET AL. (2013), SCHUH (2006) und ALPAR ET AL. (2000) verwiesen.

Migration:

Die Migration ist gleichzusetzen mit einem Austausch eines Alt- durch ein Neusystem, zumeist mit einem erweiterten Funktionsumfang. Die Arbeits- und Vorgehensweisen müssen angepasst werden. Erschwerend sind alte Datenbestände auf die Nachfolgesysteme zu übertragen und die Entwickler und -innen zu qualifizieren (VAJNA 2009, S. 460–463). Weiterführende Ausführungen zum Vorgehen bei der Migration von digitalen Werkzeugen wird in der Literatur von VAJNA (2009, S. 457ff.) diskutiert.

4.5.3 Auswahlunterstützung bei der Einführung oder der Migration

Aufbauend auf dem Lastenheft wird der Beschaffungsprozess angepasst, um eine praxistaugliche Integration zu ermöglichen. Der Ansatz basiert auf der im Automobilbau entstandenen Methode des LPP, die auf den vorliegenden Anwendungsfall übertragen und erweitert wird. Dazu werden die wesentlichen Kostenpositionen bei der Einführung oder Migration eines digitalen Werkzeuges diskutiert und in der Methodik berücksichtigt. Infolgedessen kann eine Auswahl von am Markt vorhandenen Alternativen an IT-Systemen unterstützt werden. Die folgenden Ausführungen sind bereits im Vorfeld in der Veröffentlichung DRESCHER ET AL. (2014b) dargelegt. Für weitere Detaillierung und Abgrenzung zu bestehenden Methoden der Kostenanalyse ist auf den Beitrag verwiesen.

Das LPP stammt ursprünglich aus dem Unternehmensbereich des Einkaufs und soll die immer komplexer werdende Lieferantenbewertung unterstützen (NEWMAN & KREHBIEL

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

2007, S. 152). Erstmals wurde der Ansatz von einem großen internationalen Automobilhersteller aufgegriffen mit dem Ziel, die Kosten der zugekauften Produkte zu reduzieren (NEWMAN & KREHBIEL 2007, S. 154). Das LPP basiert auf einer mathematischen Regressionsanalyse und stellt die Kosten eines Produkts seiner Leistung bzw. seiner Qualität gegenüber, indem es die individuellen Kostentreiber jedes zu analysierenden Produkts hervorhebt und quantifiziert (NEWMAN & KREHBIEL 2007, S. 154). Die Anzahl und Definition der Kostentreiber ist abhängig vom jeweils betrachteten Produkt. Diese können mit Hilfe von Experteninterviews mit Zulieferern und Einkäufern herausgearbeitet werden (vgl. NEWMAN & KREHBIEL 2007, S. 157–158).

Eine Übertragung zur Beschaffung von digitalen Werkzeugen im Rahmen einer Einführung oder einer Migration kann durch die zusätzliche Systematisierung von Kostenkriterien und die anschließende Zusammenführung mit den Kriterien des Lastenhefts erfolgen. Die wesentlichen Kostenkriterien werden in einer erforderlichen Systematik gegliedert und für eine Einführung eines digitalen Werkzeuges die Gesamtkosten bestimmt. Im Weiteren werden die Gesamtkosten um die wesentlichen Anforderungen aus dem Lastenheft ergänzt, wodurch eine zweidimensionale Wertung und eine Einordnung von der am Markt verfügbaren Standardlösungen erfolgt. Das Lastenheft gibt dabei Aussagen über die Unterstützung der für das Unternehmen relevanten Anforderungen der Mechatronik, wie bspw. aus dem Prozessgebiet des Systementwurfs. Es kann somit festgestellt werden, inwieweit die betrachteten Alternativen zu einer Verbesserung des Ist-Zustandes der Landschaft beitragen.

Innerhalb der Kostensystematik werden vertikale und horizontale Kriterien zur Zusammensetzung und Bestimmung der Gesamtkosten berücksichtigt (in Anlehnung an HELBING 2009, S. 2). Vertikale Kriterien stellen in diesem Zusammenhang Kosten dar, die bestimmten Anwendungen zuzurechnen sind und sich unabhängig von weiteren Anwendungen im Unternehmen verrechnen lassen. Horizontale Kosten sind dagegen anwendungs- bzw. unternehmensübergreifende Kosten, die auf die gemeinsamen Träger umzulegen sind. Bezogen auf diese Problemstellung werden DWL, die aus verschiedenen digitalen Werkzeugen bestehen können, in der horizontalen Betrachtung berücksichtigt. Dabei werden horizontale Aspekte auf die einzelne Software-Alternativen bezogen (z. B. ergänzende Hardware- und Software-Kosten) und somit in das vertikale Betrachtungsspektrum umgelegt. In vertikaler Anordnung werden zusätzlich die einzelnen Kriterien gelistet, welche zur Erfassung der Kosten eines digitalen Werkzeugs notwendig sind. Zur Ausarbeitung der Kostensystematik sind bekannte Auflistungen von IT-Kostenkriterien anzupassen. Dazu sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Kriterien haben eine direkte Zugehörigkeit zu den digitalen Werkzeugen des Entwicklungsprozesses im Maschinenbau.
- Die Kriterien beziehen sich auf die Phase der Einführung und Änderung einer DWL.
- Der Gesichtspunkt der Integration in die DWL steht im Vordergrund und ist, wenn möglich, auf die einzelnen Kriterien zu übertragen.

Zusätzlich zu den erläuterten Eingrenzungen sind definierte Bezugspunkte für die Kriterien zu wählen, um eine einheitliche monetäre Quantifizierung zu ermöglichen. Dazu erweist es sich als sinnvoll, jedes Kriterium auf den definierten Zeitraum von einem Jahr zu beziehen. Der zeitliche Bezug ist im Besonderen bei Mietkosten, Gehältern und vertraglich gebundenen, wiederkehrenden Zahlungen von Bedeutung. Des Weiteren sind die Kosten auf einen Arbeitsplatz zu normieren (VAJNA 2009, S. 470–471), um eine gemeinsame Vergleichsgrundlage zu schaffen, die unabhängig von der Größe des Unternehmens anwendbar ist. Da besonders Kriterien, die einen weit in der Zukunft liegenden Bezugspunkt besitzen, schwer nachprüfbar sind und meist eine zusätzliche Analyse wie die Szenarioanalyse benötigen, soll sich die Auswahl auf kurzfristig relevante Kriterien beziehen. Damit werden die Kosten berücksichtigt, die in der Literatur als einmalige Kosten bezeichnet werden und direkt in Zusammenhang mit einer Einführung oder einer Änderung in der DWL auftreten (VAJNA 2009, S. 470–471). Die relevanten Kriterien zur Auswahl von Software-Alternativen am Markt sind in Tabelle 4.9 zusammengestellt.

Für die Auswahl von geeigneten Software-Alternativen bilden die Kriterien des Lastenheftes die Abszisse und die Kriterien der Kosten die Ordinate des LPP (Abbildung 4.16). Es ist die prozentuale Erfüllung der Kriterien des Lastenheftes für eine jede Software-Alternative am Markt eingetragen. Ebenfalls sind die Kosten einer Einführung oder Migration prognostiziert und im LPP ergänzt. Im Beispiel sind 21 Software-Produkte am Markt für das KMU identifiziert, welche die Kriterien des Lastenheftes von 35 bis 90 Prozent erfüllen und Gesamtkosten von 10.000 bis 100.000 Euro aufweisen.

Im Diagramm sind analog zu dem Empfehlungen von NEWMAN & KREHBIEL (2007) die Trendlinien der *Market Line* und der *Best Practice Line* ermittelt. Dabei handelt es sich um Regressionsgeraden, die im Falle der Market Line anhand der Gesamtmenge von Software-Alternativen und im Falle der Best Practice Line anhand der 10 Prozent Besten berechnet sind. Im Beispiel liegen Market Line und Best Practice Line nahezu parallel nebeneinander. Der positive Anstieg bestätigt, dass mit einem zunehmenden Funktionsumfang der Software-Alternativen ebenfalls mit einem Anstieg der Kosten zu rechnen ist. Die Aussagekraft des LPP ist durch das jeweils zugehörige Bestimmtheitsmaß

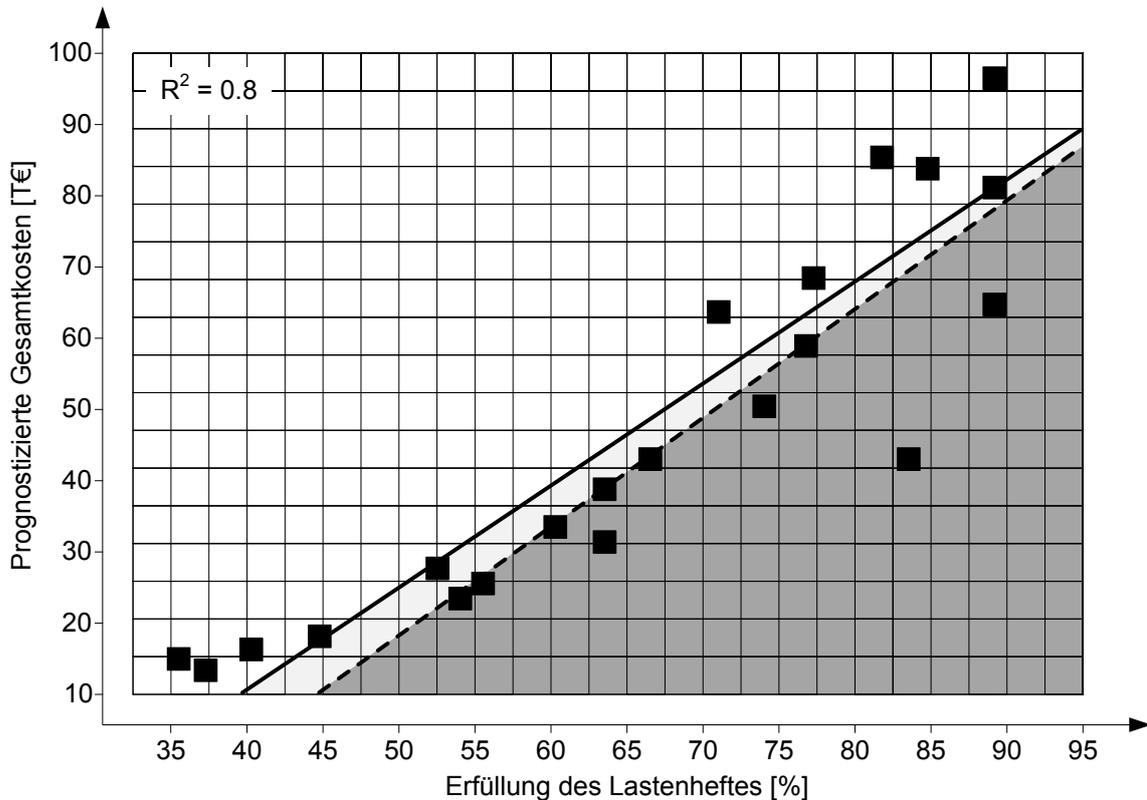
4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Tabelle 4.9: Kriterien der Kosten einer Einführung oder einer Migration

Kriterium	Aspekt	Besonderheit
Beschaffungs- und Lizenzkosten	Die Kostenermittlung ist bezogen auf eine Netzwerklizenz für einen Nutzer pro Jahr.	Die Rabatte auf Lizenzkosten sind abhängig von der Anzahl der Hersteller innerhalb der Werkzeuglandschaft.
Wartungs- und Supportkosten	Die Kostenermittlung ist bezogen auf ein Software-Paket inkl. Support für einen Nutzer pro Lizenz und pro Jahr.	Analog zu dem Kriterium der Beschaffungs- und Lizenzkosten
Schulungskosten	Es sind externe Schulungen, Grund- und Aufbauschulungen und anwendungsspezifische Schulungen erfasst.	Es besteht ein erhöhter Schulungsbedarf bei Wechsel des Herstellers.
Installationskosten	Es sind zu installierende Netzwerklizenz erfasst in der Ermittlung der Kosten erfasst.	Der Umfang und die Dauer der Installation sind stark abhängig von Umfeld der digitalen Werkzeuglandschaft.
Indirekte Kosten durch Ausfallzeiten	Ermittelt werden die Gehälter der Mitarbeiter, die während Installation nicht ihrer Arbeit nachgehen können.	Analog zum Kriterium der Installationskosten
Kosten für Datenkonvertierungen	Es sind Datenvolumen, Stundenzahl, Ausgangs- und Zielsystem und Grundgebühr erfasst.	Die Kosten sind abhängig vom Vorgängersystem und relevant bei einer Migration.
Ergänzende Hardware und Software	Die Kosten sind auf zusätzliche Hardware- oder Software-Kosten der Software-Alternative bezogen.	Das Kriterium ist abhängig von der Hardware-/Software-Anforderungen der Werkzeuglandschaft.

R^2 im Diagramm anzugeben. Es basiert auf dem Vergleich der Abweichungen zwischen den tatsächlichen und zu erwartenden Werten. Für die berechnete Kenngröße gilt mit R^2 als Bestimmtheitsmaß, wobei ein Wert nahe 1 angestrebt wird, da dieser eine hohe Exaktheit der Trendlinie bedeutet (GROSS 2010, S. 196). Zwar ist erst ab einer höheren Anzahl von Vergleichsalternativen eine sinnvolle Aussage zu treffen, doch ist die zugrunde liegende Idee auch auf wenige Alternativen anwendbar. Im Vordergrund steht dabei die Beurteilung des Verhältnisses von Kostenbewertung und Leistung und die Frage, ob ein höherer Preis, der für eine höheren Erfüllungsgrad des Lastenhefts gezahlt werden muss, gerechtfertigt ist. Im Beispiel kann mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.8 von einer hohen Exaktheit der Market Line und der Best Practice Line ausgegangen werden (Abbildung 4.16).

Die Trendlinien separiert das Diagramm in Bereiche: kein, bedingter und empfohlener Auswahlbereich. Der Bereich oberhalb der Market Line (keine Auswahl) beinhaltet Software-Produkte mit hohen Kosten und geringen Nutzen für das KMU. Um oberhalb der Regressionsgeraden befindliche Produkte anzugleichen, kann entweder die Leistung gesteigert oder der Preis gesenkt werden (NEWMAN & KREHBIEL 2007, S. 163). Die



Legende:

- Software (Hersteller)
- Best Practice Line
- Empfohlener Auswahlbereich
- R² Bestimmtheitsmaß
- Market Line
- Bedingter Auswahlbereich

Abbildung 4.16: Auswahl von alternativen digitalen Werkzeugen am Markt (fiktives Beispiel)

Preisverhandlungen können auf Basis der Ergebnisse des LPP durch den Einkauf des KMU mit den jeweiligen Software-Herstellern eingeleitet werden. Für eine Einführung oder Migration im Unternehmen sind die Software-Alternativen auszuschließen.

Die Software-Produkte im bedingten Auswahlbereich (zwischen Market Line und Best Practice Line) spiegeln den Durchschnitt der Angebote am Markt wider. Es kann von einem angemessenen Preis-Leistungs-Verhältnis ausgegangen werden. Eine weiterführende Betrachtung sollte allerdings nur dann stattfinden, wenn strategische Gründe im KMU dafür sprechen. Diese können beispielsweise besondere Herstellerbeziehungen oder gemeinsame Projektarbeiten sein. Der empfohlene Auswahlbereich (unterhalb der Best Practice Line) hingegen beinhaltet diejenigen Software-Produkte, die für weiterführende Analysen im Beschaffungsprozess aus Sicht der Mechatronik zu empfehlen sind. Dazu ist es sinnvoll, die Software-Produkte in einem Pilotprojekt durch die zukünftigen Anwender im KMU zu prüfen. Praktische Test ermöglichen es, eine der Software-Alternativen für eine Einführung im Projektgeschäft vorzubereiten.

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Das LPP ermöglicht den Anwendern, die Software-Angebote der Hersteller zu vergleichen. Es trägt zur Transparenz bei, indem es die Kosten an die jeweilige Leistung knüpft (vgl. NEWMAN & KREHBIEL 2007, S. 154). Die Market Line und Best Practice Line unterteilen das Diagramm in Bereiche, was eine Vorauswahl für die KMU ermöglicht und jene Software-Produkte identifiziert, die für praktische Tests in Pilotprojekten zu empfehlen sind. Des Weiteren bietet der Ansatz einen nützlichen Referenzwert zur Bestimmung der Soll-Kosten und unterstützt so Entscheidungen im Einkauf. So kann das LPP beispielsweise bei Preisverhandlungen mit Software-Herstellern eingesetzt werden.

4.5.4 Realisierung in einem Rechnerwerkzeug

Das Rechnerwerkzeug stellt die Realisierung der Methodik dar. Es repräsentiert die Phasen und Schritte des Vorgehens und unterstützt die Anwender durch eine IT-bezogene Ausgestaltung. Das Werkzeug kommt im Rahmen des Beschaffungsprozesses von Software zum Einsatz. Die Einführung oder Migration erfolgt in Form eines Projektes, welches von einem Team bearbeitet wird. Das Kernteam ist aus einem Projektleiter und den zukünftigen Anwendern zusammengesetzt, d. h. Ingenieurinnen und Ingenieuren aus den Fachbereichen der Mechanik-, Elektrik-/Elektronik- und Software-Entwicklung. Das Kernteam begleitet das Projekt von Beginn bis zum Ende und stellt sicher, dass alle Anforderungen rechtzeitig im Projekt berücksichtigt werden können (VAJNA 2009, S. 446). Beteiligte Gruppen sind ebenfalls technische und betriebswirtschaftliche IT-Bereiche, das Controlling, der Einkauf und externe Partner (VAJNA 2009, S. 446). Das Rechnerwerkzeug setzt die Forderungen des Kernteams um und garantiert die Verarbeitung der Ergebnisse durch weitere Beteiligte.

Die Anforderungen an die Methodik sind auf das Rechnerwerkzeug bezogen und im Konkreten wie folgt umzusetzen. Die Anwendbarkeit ist durch eine einfache und eine nutzerfreundliche grafische Interaktion gefördert werden. Die Praxistauglichkeit ist durch geringe Ein- und Vorbereitungszeiten zum Umgang mit dem Rechnerwerkzeug gestärkt. Die Aufwände für die Anwender sind gering gehalten, indem eine einfache Menüführung eingesetzt wird. Die Praxistauglichkeit ist ebenfalls durch automatische Berechnungen unterstützt. Die Nachvollziehbarkeit des Rechnerwerkzeuges ist durch Erklärungen zu den Phasen und Schritten der Methodik unterstützt. Ebenfalls tragen eine Hilfe und zusätzliche Informationen über die Methodik zur Transparenz bei. Die Ergebnisqualität des Rechnerwerkzeuges ist durch die Bereitstellung von geeigneten Schnittstellen der Software gestärkt. Dadurch wird die Weiterverwendung der Ergebnisse der Methodik in anderen Software-Produkten ermöglicht (vgl. Spezifika der DWL). Die Spezifika der

Branche des Maschinenbaus erfolgt durch die Umsetzung des Rechnerwerkzeugs in einer für die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den KMU bekannten Software. Die Spezifika der Mechatronik ist durch die Integration der Software in den Beschaffungsprozess ermöglicht. Die Erfahrungen der Anwender aus den Fachbereichen sind in den Erklärungen und Informationen zu den Phasen berücksichtigt.

Das Rechnerwerkzeug ist in der Datenverarbeitungs- und Kalkulationsprogramm MicrosoftExcel für das Betriebssystem Windows umgesetzt und wird in Ausschnitten in Kapitel 5 visualisiert. Die Software bildet unter den Büroanwendungen einen Industriestandard, der auch in den KMU für vielfältige Aufgaben eingesetzt wird. Es bietet die Möglichkeit, interaktive Ein- und Ausgaben zu realisieren und Daten in Form von Tabellen zu verarbeiten. Die Verwaltung von Datensätzen kann durch Berechnungsfunktionen unterstützt werden. Dies lässt die grafische Präsentation von Ergebnissen für die Anwender zu. Das Rechnerwerkzeug ist in Arbeitsblätter unterteilt, die den Bereichen der Präsentation, der Verarbeitung oder der Daten zugeordnet sind:

Präsentation:

Die Anwender werden schrittweise in den Phasen und Schritten der Methodik begleitet. Dazu ist für jeden Schritt ein Arbeitsblatt angelegt. Der erfolgreiche Abschluss eines Schrittes muss durch die Anwender quittiert werden, um den nächsten Schritt der Methodik zu bearbeiten. In einem jeden Arbeitsblatt ist ein Navigator, der den aktuellen Schritt in der Methodik verortet. Für die Eingabe sind Masken in Visual Basic for Application (VBA) angelegt, die auf die Tabellen in den Arbeitsblättern zugreifen. So ist beispielsweise die Abfrage zur Charakterisierung des KMU aus Schritt 2.a der Methodik durch Registerkarten und Optionsfelder realisiert (vgl. Abschnitt 5.2). Die Registerkarten repräsentieren dabei die Bereiche der Organisation, des Teams und des Projektes. Eine jede Registerkarte visualisiert die Merkmale der Entwicklung (z. B. Unternehmensgröße). Die Optionsfelder ermöglichen die Auswahl der zutreffenden Ausprägung für die Anwender (z. B. <50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter). Eine Mehrfachauswahl wird durch das Werkzeug unterbunden. Die Ausgabe ist ebenfalls durch VBA unterstützt. Dazu sind Masken angelegt, welche die Ergebnisse der Schritte visualisieren. Im Beispiel sind die Einordnungen der Software-Alternativen aus Schritt 4.c der Methodik durch das LPP grafisch dargestellt (vgl. Abschnitt 5.4). Dazu werden Diagramme (engl. Charts) in VBA genutzt, wobei die Werte aus den Tabellen zur Berechnungen der Kosten und der Erfüllung des Lastenheftes stammen. Die Erklärungen in den Eingabe- und Ausgabemasken werden mittels TextBoxen realisiert. Ein Fenster zur Hilfe gibt Auskunft über die Methodik.

Verarbeitung und Daten:

Für die Verarbeitung der Daten sind Berechnungen notwendig. Diese wurden mittels

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

Formeln und Makros umgesetzt. Die Formeln wurden genutzt, um die Einflüsse der Entwicklungssituation auf das Referenzmodell zu berechnen (Schritt 2.b) und relevante Prozessgebiete abzuleiten (Schritt 2.c). Auch die Berechnung der Fähigkeitsstufen (Schritt 3.b) und die Einordnung in die Quadranten der Interoperabilität (Schritt 3.c) konnten mittels Formeln unterstützt werden. Die Makros hingegen wurden für Berechnung des LPP eingesetzt (Schritt 4.c). Dadurch konnten die Regressionsgeraden der Market Line und Best Practice Line berechnet werden (Schritt 4.b) und dem Diagramm zur Verfügung gestellt werden. Die Berechnungen sind möglichst nachvollziehbar für die Anwender dargestellt und an relevanten Stellen dokumentiert. Die Datenbasis beinhaltet das Referenzmodells (Phase 1) und die Anpassungsmatrix an die Entwicklungssituation (Phase 2). Das Referenzmodell ist in die Arbeitsblätter der Referenzsicht des Prozesses, der Funktion und der Information aufgegliedert. Die Sichten sind mit den Referenzanforderungen verknüpft. Die Abbildung in Excel erfolgt mittels Tabellen und die Zuordnung mittels eindeutigen Nummerierungen. Die Anpassungsmatrix ist ebenfalls in einer Tabelle abgebildet und dem Referenzmodell zugeordnet. Auch sind Ein- und Ausgabedaten je nach Anwender gespeichert und können für weitere Berechnungen (z. B. Teilergebnisse) zur Verfügung gestellt werden.

4.6 Fazit

In Abschnitt 4.1 wurden die Phasen und die Schritte der Methodik vorgestellt. Es konnten FF 1 bis 4 je einer Phase zugeordnet werden. Für die Arbeit konnte somit die Zielstellung und die entwickelte Methodik verknüpft werden. Auch wurden die Modelle und Verfahren aus dem Stand der Wissenschaft und Technik in der Methodik verortet. Somit wurde eine nachvollziehbare Verbindung zu bestehenden Ansätzen geschaffen.

Die Phase 1 entwickelte ein Referenzmodell für DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik (Abschnitt 4.2). Das Referenzmodell stellte den wissenschaftlichen Kern der Arbeit dar. Mittels des Referenzmodells wurde die FF 1 beantwortet und ein Soll-Zustand aus Sicht der Mechatronik entwickelt. Es wurde der Aufbau des Modells beschrieben und eine Unterteilung in Modellgrenze und Referenzsichten vorgenommen. Für die Arbeit konnte festgehalten werden, dass die Modellgrenze die Komponente der Mechatronik im Modell sicherstellt. Die Referenzsichten stellten hingegen eine umfängliche Betrachtung der DWL dar. Die Modellgrenze wurde aus insgesamt zwölf mechatronischen Handlungsprinzipien zusammengestellt (z. B. Wiederverwendung von interdisziplinärem Entwicklungswissen). Für die Methodik stellte die Modellgrenze eine mikroskopische

Betrachtung der Mechatronik dar. Dadurch war es möglich, Flexibilität und Anpassbarkeit des Modells zu stärken. Es wurde die Referenzsicht des Prozesses vorgestellt und in Prozessgebiete (z. B. AM) und Aktivitäten (z. B. Anforderungen spezifizieren) untergliedert. Für die Methodik konnte dadurch die prozessuale Sichtweise der Entwicklung in der Modellkonstruktion berücksichtigt werden. Im Abschnitt wurde ebenfalls die Referenzsicht der Funktion dargelegt. Es konnte in Funktionsgebiete (z. B. Automatisierung) und Funktionen (z.B. Ableiten) unterteilt werden. Darüber hinaus wurden digitale Technik (z. B. MCAD) im Modell ergänzt. Für die Methodik war es dadurch möglich, die Bedürfnisse und Wünsche der Anwender der Software-Systeme in das Modell einfließen zu lassen. Die Referenzsicht der Information verortete Informationen (z. B. disziplinspezifische Informationen) und Artefakte (z. B. Maschinenlayout) im Modell. Somit wurde erreicht, dass Zwischen- und Endergebnisse durch die digitalen Werkzeuge entlang des Entwicklungsprozesses in das Modell integriert werden konnten. Im Modell wurden insgesamt 250 Referenzanforderungen abgeleitet (z. B. Erstellung und Verwaltung einer Anforderungsspezifikation unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten) und mit der Modellgrenze sowie den Referenzsichten verknüpft. Für die Methodik konnten die Referenzanforderungen als Kriterien zur Bewertung und Gestaltung der DWL herausgestellt werden. Dadurch wurde die Grundlage für die weiteren Phasen der Methodik gelegt. Die Verknüpfungen hingegen stellte eine Möglichkeit dar, um das Referenzmodell umfänglich zu beschreiben. Es konnte sichergestellt werden, dass notwendige Komponenten zur Beantwortung von FF 1 in der Modellkonstruktion berücksichtigt wurden.

In Phase 2 wurde das Referenzmodell an die Entwicklungssituation der KMU angepasst (Abschnitt 4.3). Für die Arbeit beantwortete das Vorgehen die FF 2 und berücksichtigte die Spezifika von KMU im Maschinenbau. Es wurde die Entwicklungssituation anhand von Merkmalen (z. B. Unternehmensgröße) und Ausprägungen (z. B. <50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter) charakterisiert. Es wurde dadurch in der Methodik möglich, eine überschaubare und praxistaugliche Auswahl für die Anwender in den KMU bereitzustellen. Im Abschnitt wurden die Einflüsse der Entwicklungssituation auf das Referenzmodell dargelegt. Dazu wurde eine Einflussmatrix von den Ausprägungen auf die Referenzsicht des Prozesses erarbeitet (z. B. Prozessgebiet AM). Für die Methodik bedeutete dies, dass die Beurteilungen der Entwicklungssituation durch die Anwender zur Anpassung des Referenzmodells genutzt werden können. Mit den Einflüssen auf die Referenzsicht des Prozesses konnten die Auswirkungen auf die Referenzsichten der Funktion und der Information abgeleitet werden. Es wurde gezeigt, inwiefern einzelne Ausprägungen spezifische Bereiche im Modell als relevant kennzeichneten. Die Ergebnisse bestätigten, dass mittels der Ausprägungen spezifische Varianten des Referenzmodells gebildet werden

4 Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von digitalen Werkzeuglandschaften im Maschinenbau

können. Aufbauend wurde gezeigt, inwiefern aus der Kombination der Ausprägungen die Relevanz der Prozessgebiete berechnet werden kann. Dadurch war es möglich, das Bewertungs- und Gestaltungsobjekt der DWL für Phase 3 und 4 einzuschränken. Das Referenzmodell wurde auf Basis der Einschätzungen der Entwicklungssituation zugeschnitten. Eine unnötig hohe Anzahl der Kriterien konnte vermieden werden.

Das Vorgehen zur Bewertung der DWL erfolgte in Phase 3 (Abschnitt 4.4), wodurch die FF 3 beantwortet werden konnte. Orientiert am Ansatz der QFD nach REINHART (1996) wurde eine Kartographie vorgestellt, welche den Soll-Zustand (Referenzanforderungen) dem Ist-Zustand der DWL im KMU gegenüberstellt. Die DWL konnte in die Bestandteile der digitalen Werkzeuge und der Schnittstellen aufgegliedert werden. Für die Methodik dienten die Matrizen als Systematik zur Bewertung der Erfüllungen der Referenzanforderungen und zur Einschätzung der Interoperabilitäten. Es konnte hervorgehoben werden, dass die Kartographie als Hilfsmittel von den Anwendern genutzt werden kann. Es wurde ebenfalls gezeigt, wie auf Grundlage der Kartographie die DWL in die Fähigkeitsstufen Muss, Soll und Kann eingeordnet werden können. Für die Methodik stellten die Stufen eine Systematik zur Verfügung, die es erlaubt, anhand des Ist-Zustandes der DWL Zielstufen zu definieren. Somit konnte eine schrittweise Verbesserung ermöglicht werden. Anhand der Kartographie wurde die DWL in die Quadranten der inselartigen, interoperablen, teilintegrierten und integrierten Systeme eingeordnet. Im Ergebnis konnten Zielquadranten für die digitalen Werkzeuge festgestellt werden, die zur Ableitung von Handlungsempfehlungen dienen.

Die Phase 4 der Methodik beschreibt die Gestaltung des Beschaffungsprozesses 4.5, wodurch die FF 4 beantwortet wurde. Es wurde gezeigt, wie die Handlungsempfehlungen in einem Lastenheft für die KMU zusammenzustellen sind. Für die Methodik wurde dadurch die praxistaugliche Integration in die KMU gefördert. Neben dem Lastenheft wurde das LPP-Verfahren zur Auswahl von Software-Alternativen angepasst. In diesem Zusammenhang konnten Kostenkriterien aufgestellt und unter Berücksichtigung der Erfüllung des Lastenhefts durch das jeweilige Software-Angebot in einem Diagramm zusammengeführt werden. Im Ergebnis wurde eine Auswahl von Software-Produkten getroffen, die für eine Einführung oder Migration im KMU zu empfehlen sind. Die Methodik ermöglichte dadurch, die Anzahl zu reduzieren und ausschließlich diejenigen Alternativen auszuwählen, die für die Mechatronik als relevant zu erachten sind. Es wurde ebenfalls ein Rechnerwerkzeug zur Umsetzung der gesamten Methodik vorgestellt. Dabei wurden die Bereiche der Präsentation, der Verarbeitung und der Daten dargelegt. Es konnte gezeigt werden, dass die IT-gestützte Umsetzung der Phasen und Schritte der Methodik den Anwendern als Hilfsmittel dient.

5 Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel

5.1 Übersicht

Die Methodik wurde in die industrielle Praxis überführt und beispielhaft bei einem Hersteller von Verzahnungszentren angewandt. Das Unternehmen bietet Bearbeitungsverfahren für das Profil- und das Wälzschleifen an. Die Anwendung fand im Rahmen des Beschaffungsprozesses statt. Das Projektteam bestand aus Ingenieuren aus den Entwicklungsabteilungen und repräsentierte auch die Anwender der Methodik im KMU. Dazu stellten sie ihre Erfahrungen in zwei halbtägigen Workshops zur Verfügung. Eine zusätzliche Review-Schleife konnte zur Absicherung der Ergebnisse beitragen. In dem Unternehmen wurden diejenigen Phasen und Schritte der Methodik angewandt, die eine Eingabe durch die Anwender benötigten oder die zur nachvollziehbaren Präsentation und Diskussion von Teilergebnissen notwendig waren (Abbildung 5.1). Darüber hinaus wurden diejenigen Phasen und Schritte identifiziert, die als Voraussetzung für die Anwendung anzusehen waren und nicht explizit mit den Anwendern besprochen wurden.



Legende:

- Anwendungsphase
- Phase als Voraussetzung
- Schritt als Voraussetzung
- Schritt
- DWL – Digitale Werkzeuglandschaft

Abbildung 5.1: Anwendung der Methodik

Die Voraussetzung für die Anwendung stellten die Schritte in Phase 1 sowie der Schritt 4.c dar. Die Konstruktion des Referenzmodells in Phase 1 wurde als eine notwendige Voraussetzung für die Phase 2 bis 4 der Methodik betrachtet. Die Ergebnisse sind in einem allgemeinen Referenzmodell zusammengefasst, welches für ein jedes Anwenderunternehmen in gleicher Art und Weise zur Verfügung stand (Anhang A.2). Für die expliziten Anwendungsschritte im Anwendungsbeispiel repräsentierte das Referenzmodell eine Eingangsinformation und konnte somit als gegeben angesehen werden. Die Umsetzung der Methodik im Rechnerwerkzeug wurde ebenfalls für die Anwendung vorausgesetzt (Schritt 4.c). Das Rechnerwerkzeug wurde in einem jeden Anwendungsschritt der Methodik eingesetzt. Es unterstützte bei der strukturierten Eingabe der Informationen, der automatischen Verarbeitung der Ergebnisse und der grafischen Präsentation für die Anwender. Im Anwendungsbeispiel war ein expliziter Anwendungsschritt in diesem Fall nicht vorgesehen.

Die Anwendung der Methodik wurde in den Phase 2 bis 4 durchgeführt. In der Phase 2 fand die Analyse der Entwicklungssituation im Anwenderunternehmen statt (vgl. Abschnitt 5.2). Es wurden die Merkmale in den Bereichen der Organisation, des Projektes und des Teams beurteilt. Im Ergebnis konnten relevante Prozessgebiete abgeleitet werden. In der Phase 3 erfolgte die Bewertung der DWL (vgl. Abschnitt 5.3). Es wurde die Kartographie der DWL angewandt, wobei in der Folge eine Einordnung in die Fähigkeitsstufen und Quadranten der Interoperabilität stattfand. Die Phase 4 basierte auf den Erkenntnissen der Bewertung, leitete Handlungsempfehlungen ab, stellte ein Lastenheft für das Anwenderunternehmen zusammen (vgl. Abschnitt 5.4). Darüber hinaus konnten Kostenkriterien ergänzt und das LPP-Diagramm zur Auswahl von Software-Alternativen eingesetzt werden.

5.2 Analyse der Entwicklung

Das Anwenderunternehmen wurde anhand von Merkmalen und Ausprägungen der vorhandenen Entwicklungssituation erfasst (Abbildung 5.2). Hierzu konnten die Anwender zwischen den festgelegten Alternativen entscheiden. Die neun Merkmale wurden anhand der jeweils drei bis fünf Ausprägungen durch die Anwender eingeschätzt. Die für das KMU zutreffenden Ausprägungen wurden im Rechnerwerkzeug markiert und als Eingang zur Verfügung gestellt. Hierfür wurde ein schrittweises Vorgehen empfohlen. So wurde im Rechnerwerkzeug beispielsweise in Organisation, Projekt und Team mittels Registerkarten unterschieden. In jeder Registerkarte konnten die Merkmale eingesehen werden (z. B.

Entwicklungsstandorte). Die Auswahl der Ausprägung erfolgte mittels der Optionsfelder durch die Anwender (z. B. zwei bis drei Standorte). Die Aufnahme der Entwicklungssituation wurde bestätigt und für die Berechnung der Relevanz der Prozessgebiete in den Arbeitsblättern übernommen.

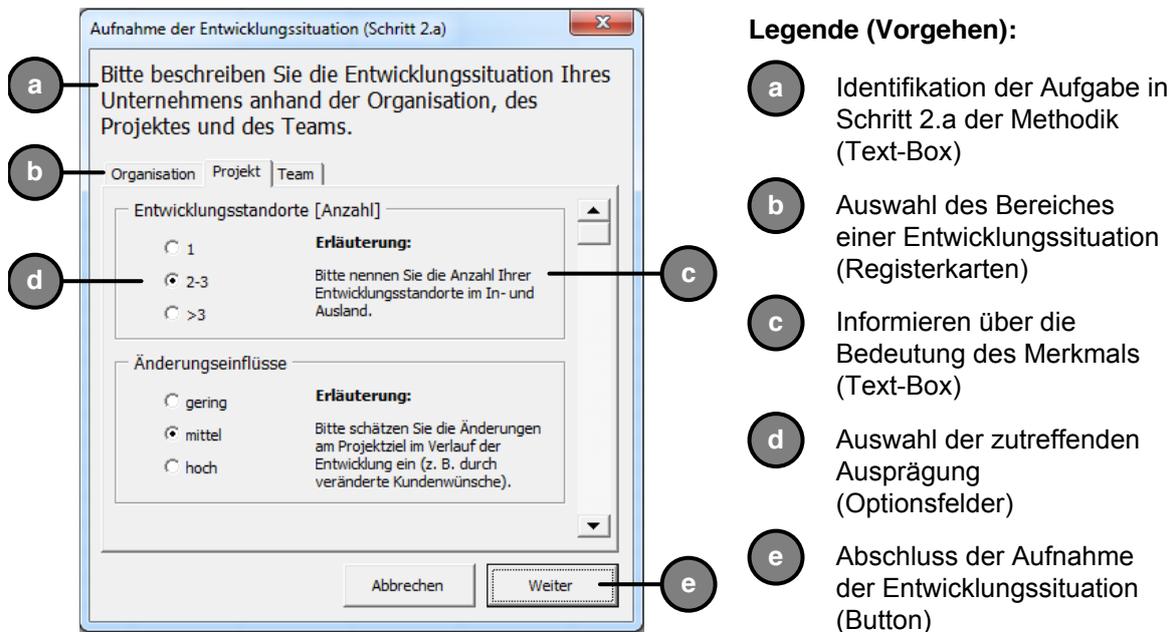


Abbildung 5.2: Eingabe der Entwicklungssituation in das Rechnerwerkzeug (Schritt 2.a)

Die Klassifizierung zeigte (Abbildung 5.3), dass es sich bei dem Anwenderunternehmen um ein mittleres Unternehmen mit ca. 800 Mitarbeitern und zwei Entwicklungsstandorten weltweit handelt. Das Anwenderunternehmen verstand sich als Technologieentwickler, wobei die mechanische Entwicklung vorangestellt, aber zunehmend die Bedeutung der Software zu erkennen ist. Die Konstruktionen waren typischerweise Anpassungen aus vorangegangenen Projekten, wobei mittlere Änderungseinflüsse auf den Projektverlauf beispielsweise durch zusätzliche Kundenwünsche festzustellen waren. Die Varianten der Konstruktionen waren vorwiegend in Baukästen hinterlegt. An einem Entwicklungsprojekt beteiligten sich mehrheitlich Entwicklerinnen und Entwickler aus der Mechanik und Software, wobei die Elektrik/Elektronik von nachgestellter Relevanz war. In der Mechanik waren acht Entwicklerinnen und Entwickler beteiligt, die sich auf die Bereiche der Schmierstoffe, der Spannmittel, des Maschinenbetts, der Fluidtechnik und der Simulation aufteilten. Die sechs Entwicklerinnen und Entwickler der Software verteilten sich auf die Programmierung der numerischen sowie programmierbaren Steuerungen, der Bediengeräte und der Verarbeitung der Maschinendaten. Die Entwicklerinnen und Entwickler der Elektrik/Elektronik befassten sich im Anwenderunternehmen maßgeblich mit dem Schaltschrankbau für die Maschinen.

5 Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel

Merkmal	Ausprägung	Prozessgebiete						
		AM	KM	SE	QM	SR	PP	PV
Unternehmensgröße	250-999	3	2	1	2	0	1	1
Kernkompetenz	Mechanik	1	1	1	1	1	0	0
Entwicklungsstandorte	2-3	1	1	1	1	0	0	1
Entwicklungsaufgabe	Anpassungsentwicklung	2	2	3	2	2	1	2
Änderungseinflüsse	mittel	2	2	1	1	0	1	1
Variantenbildung	Baukastensystem	1	2	3	1	3	2	0
Mechanik-Entwickler	6-10	1	1	1	1	0	1	1
Elektrik-Entwickler	<6	0	0	0	0	0	0	0
Software-Entwickler	6-10	1	1	2	2	0	1	1
Relevanz (Mittelwert):		1,3	1,3	1,4	1,2	0,7	0,8	0,8

Legende (Erklärung):

- a** Gewählte Ausprägungen der Merkmale einer Entwicklungssituation
- b** Prozessgebiete aus der Prozessreferenzsicht (Referenzmodell)
- c** Berechnete Relevanz der Prozessgebiete auf Basis der Auswahl der Ausprägung
- d** Weiter zur Auswahl des Prozessgebietes (Arbeitsblatt Schritt 2.c)

Abbildung 5.3: Einfluss der Ausprägungen auf die Prozessgebiete im Rechnerwerkzeug (Schritt 2.b)

Auf Basis der Eingaben der Anwender konnte das Referenzmodell auf ein spezifisches Prozessgebiet eingeschränkt werden. Dazu wurden die Ausprägungen durch die Anwender gelistet und mit den dazugehörigen Einflüssen auf die Prozessgebiete versehen (Abbildung 5.3). Die Werte der Einflüsse waren mittels Expertengesprächen gewonnen und standen den Anwendern im Rechnerwerkzeug als Datenbasis zur Verfügung (vgl. Anhang A.3). Für das Anwenderunternehmen wurde der kombinierte Einfluss kalkuliert. Die Bestimmung der Mittelwerte ermöglichte es, die Relevanz eines jeden Prozessgebietes festzustellen. Einen mittleren bis hohen Einfluss übten die Ausprägungen zum Einsatz von Baukastensystemen, die Entwicklung basierend auf Anpassungskonstruktionen sowie die Unternehmensgröße von ca. 800 Mitarbeitern aus. Ein geringer Einfluss ging hingegen von den mittleren Änderungseinflüssen, der Kernkompetenz der Mechanik und der weniger als sechs beteiligten Elektrik-/Elektronik-Entwicklerinnen und Entwickler aus.

Die grafische Auswertung fand anhand eines Diagramms im Rechnerwerkzeug statt (Abbildung 5.4). Dabei wurden die Prozessgebiete nach der absteigenden Relevanz gelistet. Die Übersicht diente den Anwendern zur Interpretation und zur Ableitung einer Entscheidung zum weiteren Vorgehen in der Bewertung der DWL. Die Anwender konnten dem Diagramm entnehmen, dass eine mittlere Relevanz der Prozessgebiete SE, KM, AM

und QM vorlag. Eine geringe Relevanz ergab sich für das Prozessgebiet PP, PV und SR. Im Vergleich empfiehlt es sich, für das Anwenderunternehmen das Prozessgebiet SE zu bewerten. Das Anwenderunternehmen konnte im Rechnerwerkzeug die abgeleitete Entscheidung festhalten. Aufgrund der Aufwände für eine Bewertung entschieden die Anwender, dass ein einzelnes Prozessgebiet im weiteren Verlauf der Methodik zu bewerten ist. Die Prozessgebiete KM und AM wurden bereits in Vorgängerprojekten im KMU betrachtet. Aus diesem Grund entfällt eine erneute Analyse dieser Prozessgebiete. Im Ergebnis wurde das Prozessgebiet SE für die Bewertung ausgewählt.

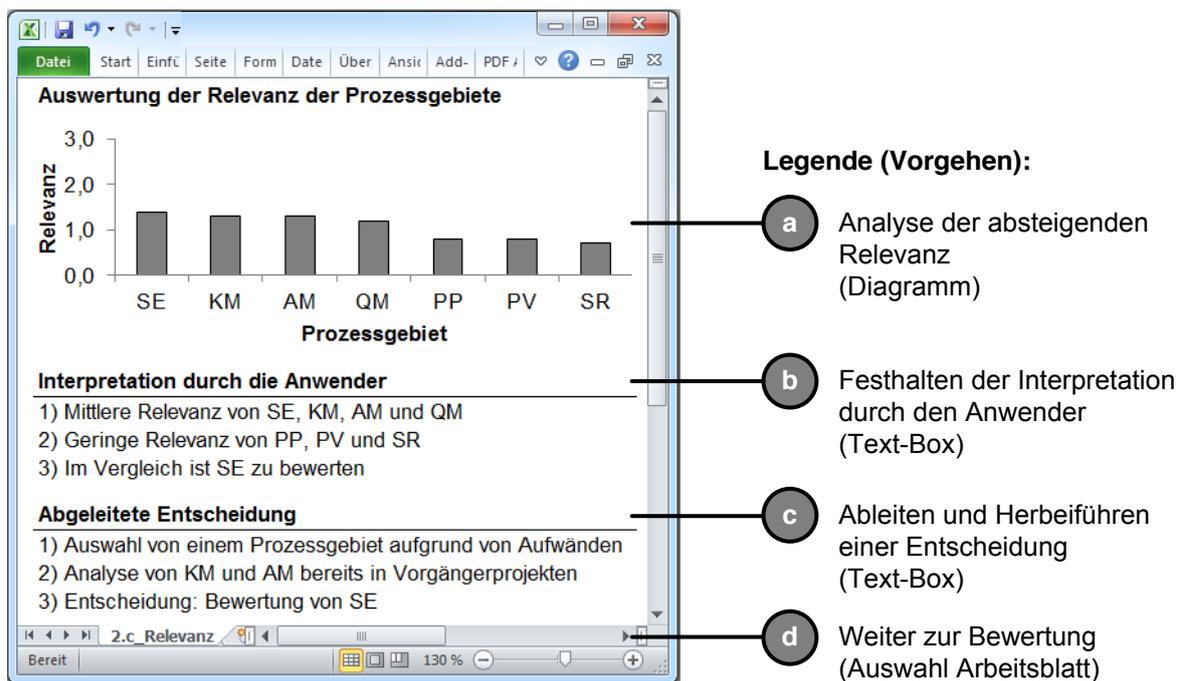


Abbildung 5.4: Auswahl des Prozessgebietes im Rechnerwerkzeug (Schritt 2.c)

5.3 Situationsspezifische Bewertung

Das Anwenderunternehmen setzt insgesamt elf digitale Werkzeuge entlang des Entwicklungsprozesses ein. Im Prozessgebiet SE konnten vier wesentliche digitale Werkzeuge und deren Abhängigkeiten identifiziert werden, welche den Betrachtungsbereich der Bewertung und Gestaltung bildeten. Der Verbund stellte eine heterogene DWL dar und war durch sowohl proprietäre als auch Standard-Systeme gekennzeichnet. Die Software-Produkte wurden von verschiedenen Herstellern bezogen. Die DWL wurde kartographiert und nach den mechatronischen Fähigkeiten und den Quadranten der Interoperabilität im Rahmen der Methodik untersucht.

5 Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel

Matrix der Interoperabilität

- : nicht notwendig
- 0 : Manuelle Ein-/Ausgaben
- 1 : Systemspezifische Konvertierungen
- 2 : Systemneutrales Format
- 3 : Systemneutrales Produktmodell

Matrix der Erfüllung

- : nicht notwendig...
- 0 : nicht erfüllt...
- 1 : erfüllt...
...für das Werkzeug

#	Referenzanforderung	SA 1	SA 2	SA 3	SA 4	Typ
RA034	Abbildung von Funktionsstrukturen (z.B. Funktionsstrukturbaum bzw. Strukturplan-Funktion).	1	-	1	-	KANN
RA035	Abbildung eines Gesamtsystems (Systemintegration) durch einen Strukturplan-System unter Berücksichtigung von Zusammenhängen.	1	-	1	-	MUSS
RA036	Abbildung aller wichtiger Systemeigenschaften (Geometrie, Kinematik, Steuerungsinformationen, etc.).	1	-	1	-	MUSS
RA037	Abbildung des Steuerungs- und des Maschinenverhaltens und definierter Schnittstellen des Systems.	-	-	1	-	SOLL

Legende (Vorgehen):

- a** Verstehen der Erfüllungs- und Interoperabilitätsmatrix
- b** Übernahme der Aktivitäten aus der Prozessreferenzsicht
- c** Übernahme der Referenzanforderungen aus den zugehörigen Aktivitäten
- d** Einordnung der digitalen Werkzeuge und Ausfüllen der Interoperabilitätsmatrix
- e** Ausfüllen des Typs der Referenzanforderungen (Muss, Kann, Soll)
- f** Ausfüllen der Erfüllungsmatrix entsprechend des digitalen Werkzeugs

Abbildung 5.5: Kartographie der DWL im Rechnerwerkzeug (Schritt 3.a)

Für eine Kartographie der DWL wurden die Referenzanforderungen aus dem Prozessgebiet SE gelistet und die Werkzeuge durch Vergabe von Punkten bewertet (Abbildung 5.5). Dabei wurden ebenfalls die Aktivitäten aus dem Referenzmodell übernommen und zur Gruppierung der Anforderungen genutzt. Das Rechnerwerkzeug unterstützte die Anwender, indem es die Anforderungen in die Bewertungsvorlage automatisch übertrug. Weiterhin wurde die Interoperabilität der Werkzeuge betrachtet, wobei in Anlehnung an die QFD innerhalb des *Dachs* die Wechselwirkungen zwischen den Werkzeugen abgebildet wurden. Dabei kann der Anwender die Schnittstellen anhand der Datenübertragung unterscheiden zwischen manuellen Ein-/Ausgaben, systemspezifischen Konvertierungen, systemneutralen Formate oder systemneutralen Produktmodellen. Der Typ der Referenzanforderung wurde durch die Anwender festgelegt und ermöglichte die Zuordnung in die Fähigkeitsstufen der Mechatronik im weiteren Verlauf der Methodik. Die Erfüllungsmatrix war ein Hilfsmittel, um die digitalen Werkzeuge durch den Anwender zu beurteilen. Es wurde zwischen nicht notwendig, nicht erfüllt oder erfüllt unterschieden.

Um einen Benchmark von Software-Produkten verschiedener Hersteller zu vermeiden, wurden diese in der Arbeit durch folgende fiktive Name ersetzt: die Software-Anwendungen SA 1, SA 2, SA 3 und SA 4. Es wurden 85 Anforderungen durch erfahrene Entwicklerinnen und Entwickler des Anwenderunternehmens eingeschätzt. So wurde beispielsweise für das Anwenderunternehmen die Referenzanforderung RA034 übernommen. Diese fordert von der DWL die Abbildung von Funktionsstrukturen der Maschine oder Anlage, wie es durch Funktionsstrukturbäume möglich wäre. Im Beispiel wurde die Referenzanforderung RA034 als eine Kann-Anforderung eingestuft. Dies bedeutete, dass die Anforderung bei einer Erfüllung einen überproportionalen Nutzensgewinn für das KMU darstellte. Die Referenzanforderung wurde durch die digitalen Werkzeuge SA 1 und SA 3 erfüllt. Die Werkzeuge SA 2 und SA 4 leisteten hingegen keinen Beitrag zur Erfüllung der Anforderung in der DWL. Die Interoperabilität wurde beispielsweise zwischen SA 1 und SA 2 eingeschätzt. Dabei wurde festgestellt, dass manuelle Ein- und Ausgaben zwischen den Werkzeugen vorherrschen. Diese fanden beim Anwender vorwiegend beim Übertrag von prinzipiellen Skizzen der Maschine in der frühen Phase der Entwicklung statt.

Die Bewertung der DWL ermöglichte die Einordnung in die Muss-, Soll- und Kann-Fähigkeitsstufen (Abbildung 5.6). Jeder Stufe waren Anforderungen anhand des Typs zugeordnet, die zuvor innerhalb der Kartographie der DWL durch den Anwender eingeschätzt wurden. Hierfür waren die Aktivitäten des Prozessgebietes SE horizontal und die Erfüllungsgrade vertikal im Diagramm aufgetragen. Die Werkzeuge der DWL sind farblich gekennzeichnet und zeigen den Beitrag in einer jeden Stufe auf. Im Ergebnis konnten die Erfüllungsgrade der DWL visualisiert werden. Im Anwenderunternehmen konnten die Beiträge der digitalen Werkzeuge SA 1 bis SA 4 zur Mechatronik dargelegt werden. Die DWL im Prozessgebiet SE wurde in den Fähigkeitsstufen vollständig erfasst. Die Erfüllungsgrade in der Aktivität „System/Maschine strukturieren“ wurde durch die Werkzeuge SA 1, SA 2 und SA 3 bestimmt. Die Erfüllungsgrade lagen bei 0,4 in der Muss-Fähigkeitsstufe und bei 0,3 in der Soll-Fähigkeitsstufe. Es wurden hingegen keine der Referenzanforderungen in der Kann-Fähigkeitsstufe erfüllt.

Innerhalb der Muss-Fähigkeitsstufe dominierte das digitale Werkzeug SA 1. Während in den Bereichen der Spezifikation der Gesamtmaschine bereits alle Anforderungen der Fähigkeitsstufe erfüllt waren, ließen sich in den Bereichen der Strukturierung, der Prüfung sowie der Spezifikation von Schnittstellen der Maschine noch Potenziale für eine informationstechnische Unterstützung erkennen. Da die Muss-Anforderungen nicht vollständig erfüllt waren, wurde die DWL in die Muss-Fähigkeitsstufe eingeordnet. Zur Erreichung der Soll-Fähigkeitsstufe wurden die bisher nicht erfüllten Anforderungen in das Lastenheft übertragen, welche an das zukünftige Software-System gestellt waren.

5 Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel

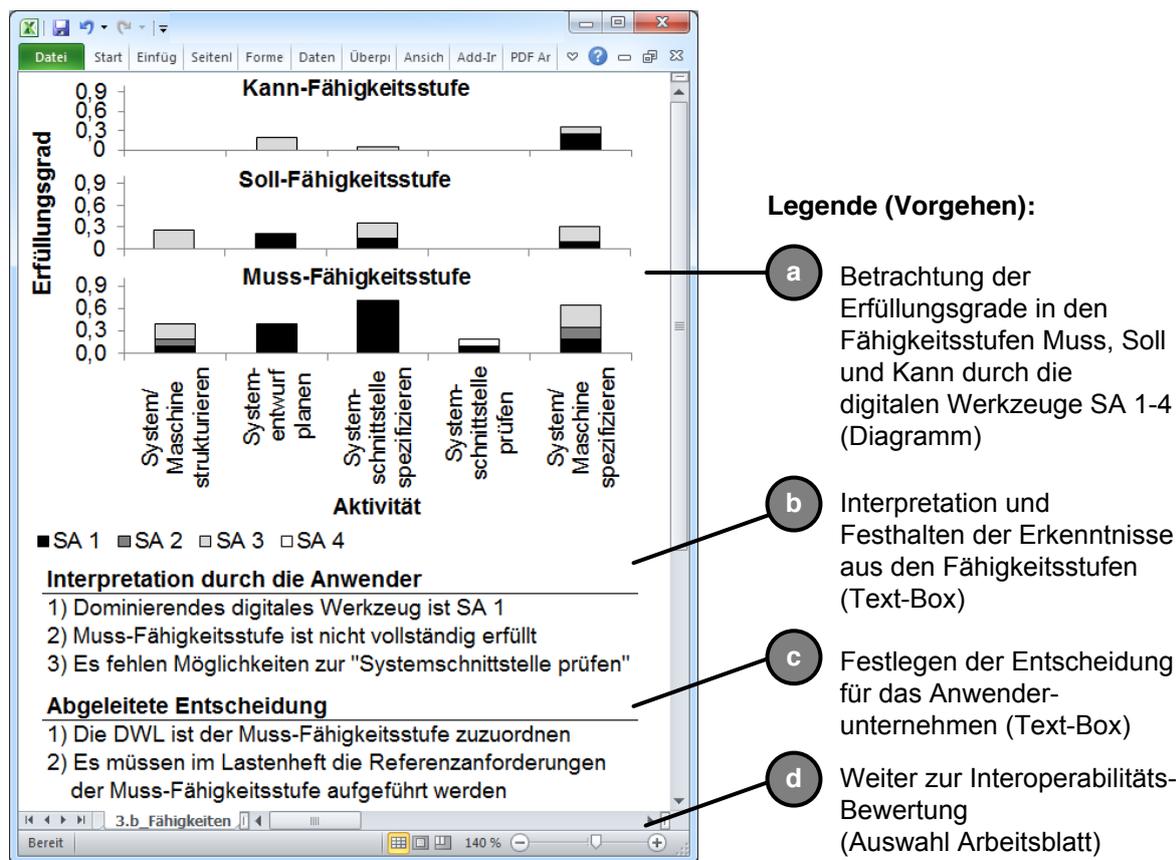


Abbildung 5.6: Fähigkeitsstufen der Mechatronik im Rechnerwerkzeug (Schritt 3.b)

Während die Betrachtung der Fähigkeitsstufen einen prozessualen Fokus aufwies, ermöglichte die Analyse der Interoperabilität zwischen den Werkzeugen einen systemischen Blick auf die DWL (Abbildung 5.7). Die digitalen Werkzeuge konnten anhand der Schnittstellen in vier Quadranten eingeordnet werden, die über Anzahl und Qualität der Schnittstelle (Achsen) bestimmt waren. Der Quadrant I repräsentierte integrierte, der Quadrant II teil-integrierte, der Quadrant III inselartige und der Quadrant IV interoperable Systeme. Das Ziel der digitalen Werkzeuge des Anwenderunternehmens war es dabei, den Quadranten der integrierten Systeme zu erreichen. Der maßgebliche Handlungsbedarf lag bei den Werkzeugen, die sich im Quadrant der inselartigen Systeme befanden.

Im Anwenderunternehmen herrschten inselartigen Systeme vor. Das Werkzeug SA 3 grenzte zusätzlich an den Quadranten der interoperablen Systeme an. Im Vergleich der digitalen Werkzeuge stellte sich heraus, dass der Handlungsbedarf beim Werkzeug SA 1 lag. Das Werkzeug war gekennzeichnet durch eine hohe Anzahl an Schnittstellen, die nicht standardisiert waren und hohe Aufwände bei der Eingabe und der Übergabe von Dokumenten vom Bediener verlangten. Es mussten beispielsweise Angebote und mechanische Skizzen manuell eingetragen in das Werkzeug eingetragen werden.

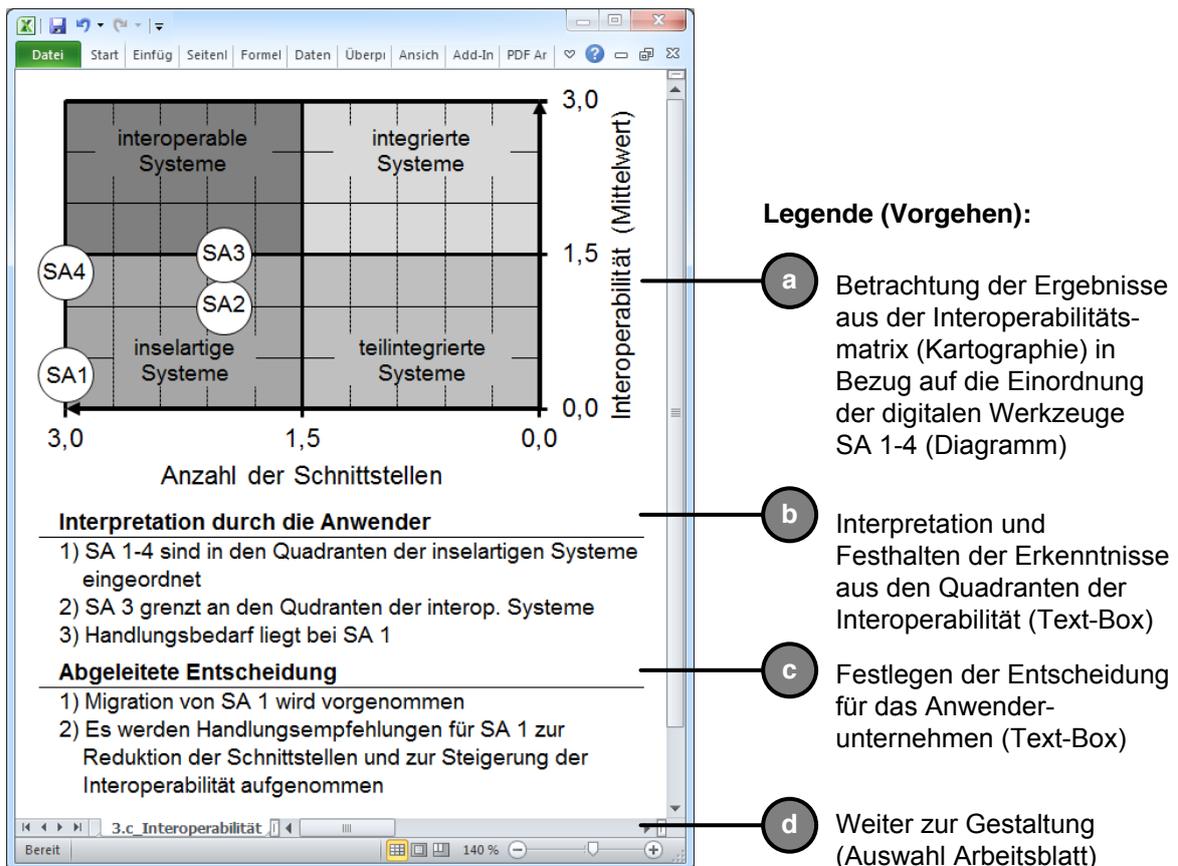


Abbildung 5.7: Quadranten der Interoperabilität im Rechnerwerkzeug (Schritt 3.c)

Für das Anwenderunternehmen wurde die Migration von SA 1 empfohlen. Dies bedeutete, dass ein erweiterter Funktionsumfang durch die Einführung eines neuen digitalen Werkzeuges realisiert werden sollte. Neben den Aufwänden zur Einführung und zur Schulung der Software wurde empfohlen, die Konvertierungen der Daten vom Alt- in das Neusystem zu berücksichtigen. Die Anforderungen zur Migration aus dem Blickwinkel der Interoperabilität wurden in dem Lastenheft für das Anwenderunternehmen zusammengestellt. Analog zu den Anforderungen aus der Analyse der Fähigkeitsstufen der Mechatronik dienen die Handlungsempfehlungen aus den Quadranten der Interoperabilität zur Gestaltung der DWL im Rahmen des unternehmensinternen Beschaffungsprozesses.

5.4 Gestaltung der Beschaffung

Die Erkenntnisse aus den Fähigkeitsstufen der Mechatronik und den Quadranten der Interoperabilität wurden in die Abläufe des Anwenderunternehmens überführt. Hierfür wurde die Integration der Anforderungen in den bereits laufenden Beschaffungsprozess von

5 Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel

einem digitalen Werkzeug vorgenommen. Dabei war u. a. das Ziel, die interdisziplinäre Entwicklung der Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik zu fördern. Zu diesem Zweck wurde die Methodik dieser Arbeit durch das Team im Beschaffungsprozess angewandt. Im Ergebnis entstand ein Lastenheft, welches zur Anpassung des Soll-Konzepts und des Anforderungsprofils an das zukünftige IT-System beitrug. Ebenfalls wurde der Beschaffungsprozess ergänzt, indem die Methodik zusätzlich die Kosten der IT-Alternativen am Markt berücksichtigte und einen Vergleich auf Grundlage des LPP-Ansatzes vorschlug. Die Phase der Bewertung und Auswahl im Beschaffungsprozess des Anwenderunternehmens wurde durch eine Vorauswahl an geeigneten IT-Systemen zur Migration unterstützt. Es konnte somit ein IT-System ausgewählt werden, welches in einem Pilot-Projekt im Unternehmen untersucht wurde.

Das Lastenheft stellte die zusammengeführten Anforderungen an das IT-System dar (Abbildung 5.8). Für das Anwenderunternehmen wurden diejenigen Anforderungen aufgenommen, die für die Erfüllung der Muss-Fähigkeitsstufe im Prozessgebiet des SE notwendig waren. Hierfür wurde eine Gliederung in die Aktivitäten des SE vorgenommen (z. B. System/Maschine spezifizieren). Eine der Anforderungen war beispielsweise die Abbildung von Maschineninformationen und -elementen in Bibliotheken oder Baukästen (SE01). Die Anforderungen zur Interoperabilität bezogen sich hingegen auf die Kommunikation zwischen den bestehenden Werkzeugen in der DWL. So konnte für das digitale Werkzeug SA 1 beispielsweise der Einsatz eines standardisierten Austauschformats zur Übertragung von Prinzipskizzen gelistet werden. Auch musste für das Anwenderunternehmen festgehalten werden, dass die Konsistenz der Begrifflichkeiten im SE zwischen den Werkzeugen sicherzustellen war. Die Rahmenkriterien hingegen beinhalteten Ergänzungen, die während der Anwendung der Methodik auftauchten, im Besonderen in der Auswertung der Bewertungsergebnisse. Eine der Forderungen war beispielsweise, dass ein Hersteller für das zukünftige IT-System zu bevorzugen war, der bereits als Software-Lieferant für SA 2, 3 oder 4 in der bestehenden DWL diente.

Für das Anwenderunternehmen wurde das Lastenheft zur Migration von SA 1 durch ein kommerzielles IT-System genutzt. Die Anwender der Methodik wurden auf die Aufwänden der Datenkonvertierung von dem Alt- zu dem Neusystem hingewiesen. Die Entscheidung für eine Migration ging aus der Notwendigkeit hervor, einen erweiterten Funktionsumfang umzusetzen. Das Lastenheft stellte Forderungen an das IT-System, welche über eine einfache Fehlerbehebung von bestehenden Funktionen hinausgingen (Update). Auch bot der Hersteller von SA 1 kein Upgrade an, um die Anforderungen umzusetzen. Das Anwenderunternehmen entschied sich gegen die Einführung eines zusätzlichen Systems, um doppelte Datenhaltungen zu vermeiden.

no.	Typ	Kriterien an das zukünftige IT-System
Systementwurf		
System/ Maschine spezifizieren (5)		
SE01	Muss	Abbildung von Maschinenfunktionen und -elementen in Bibliotheken (z.B. Baukasten).
SE02	Muss	Zuordnung einzelner Funktionen zu den späteren Modulen des mechatronischen Produkts.
SE03	Muss	Darstellung eines funktionalen Modells (Funktionen als separate Blöcke und Verbindungen).
System strukturieren (2)		
Systementwurf prüfen (0)		
Systemschnittstelle spezifizieren (3)		
Schnittstelle prüfen (1)		
Interoperabilität (Ziel: Integrierte Systeme)		
Rahmenkriterien		

Legende (Erklärung des Lastenheftes):

- | | |
|---|---|
| a Prozessgebiet Systementwurf aus der Bewertung der DWL | d Anforderungen aus der Analyse der Quadranten der Interoperabilität |
| b Aktivität „System/ Maschine spezifizieren“ des Prozessgebiets | e Zusätzliche Anforderungen |
| c Anforderungen an das IT-System zur Erreichung der Soll-Fähigkeitsstufe | f Weiter zu Schritt 4.b (Arbeitsblatt) |

Abbildung 5.8: Auszug des Lastenheftes im Rechnerwerkzeug (Schritt 4.a)

Für das Unternehmen wurden insgesamt neun am Markt angebotene IT-Systeme identifiziert, die als Ersatz für das bestehende Werkzeug SA 1 infrage kommen. Die IT-Systeme wurden hinsichtlich der Erfüllung des Lastenheftes untersucht, wobei Kostenaspekte ebenfalls berücksichtigt wurden. Hierfür wurden vertikale und horizontale Kosten abgeschätzt und auf die Software umgelegt (vgl. Tabelle 4.9). Dabei konnte im Besonderen herausgestellt werden, dass die Kosten für die Schulung bei den IT-Alternativen im Mittel bei 25.000 Euro bei zehn Schulungstage lagen. Die Kosten die Wartung der Software schwankte je IT-Hersteller zwischen 400 Euro und 1.500 Euro je Arbeitstag. Auch die Kosten für die Netzwerk-Lizenzen waren unterschiedlich zwischen den IT-Herstellern. Diese lagen zwischen 8.000 und 35.000 Euro je Lizenz pro Jahr. Die Kosten flossen in die Auswahl der IT-Alternative ein (Abbildung 5.9).

Bei der Auswahl der am Markt vorhandenen Software-Produkte stellte die Abszisse im Diagramm den Grad der Erfüllung des Lastenheftes dar (Abbildung 5.9). Die Ordinate bezieht die prognostizierten Kosten in die Auswahl ein, wie beispielsweise o. g. Wartungs-

5 Anwendung der Methodik in einem Praxisbeispiel

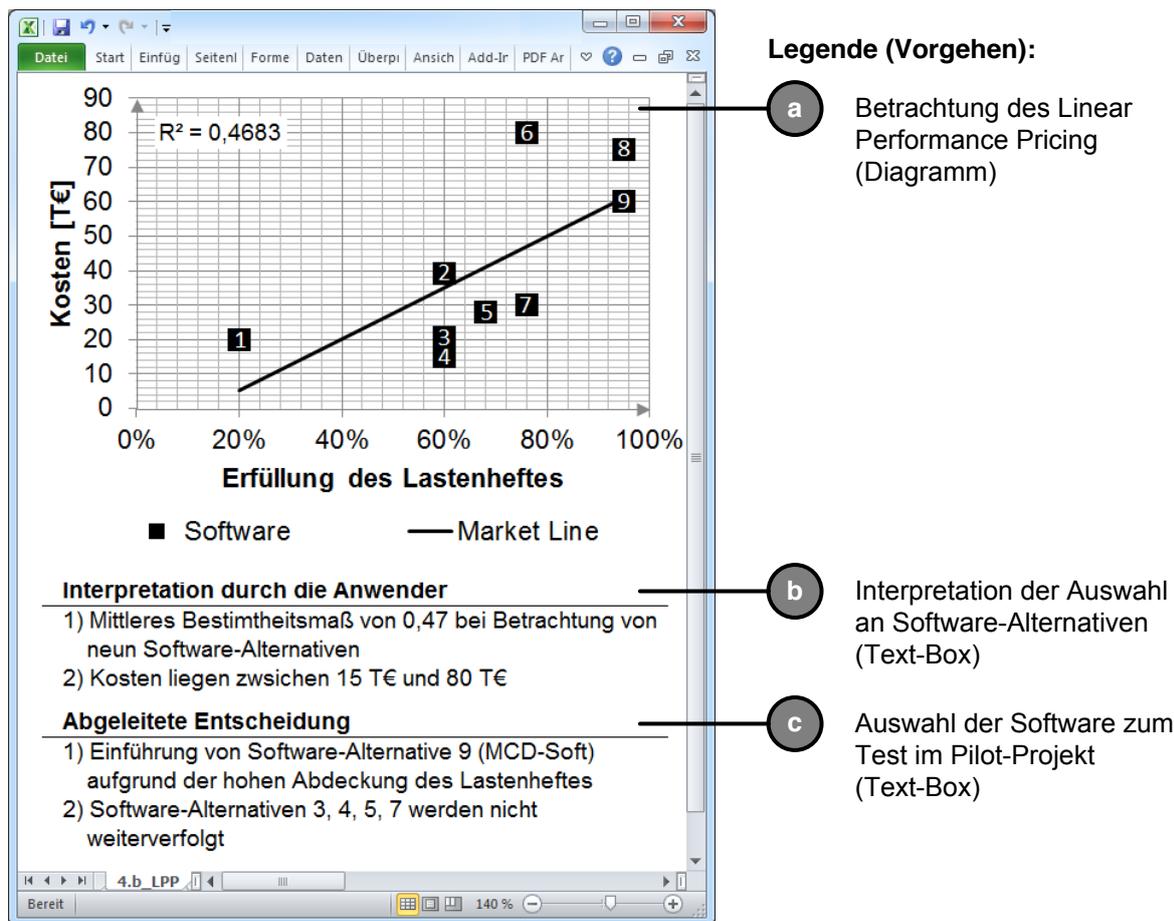


Abbildung 5.9: Auswahl des Software-Produktes im Rechnerwerkzeug (Schritt 4.b)

kosten. Es wurden neun Software-Alternativen in das Diagramm aufgenommen. Ebenfalls konnte die Market Line (Regressionsgerade im Diagramm) berechnet und eingezeichnet werden. Die Best Practice Line hingegen entfiel für das Anwendungsbeispiel, da nicht ausreichend Software-Alternativen für eine verlässliche Aussage vorhanden waren. Ergänzend konnten im Rechnerwerkzeug die Interpretation des LPP und die abgeleiteten Entscheidungen für das Anwenderunternehmen festgehalten werden.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 lag bei 0,47 und bestätigte die Aussagekraft der Market Line. Ein höheres Bestimmtheitsmaß könnte durch die Aufnahme von Software-Alternativen erfolgen, die weitere Messpunkte im Sinne der Regression darstellen würden. Für das Anwenderunternehmen galt, dass die Software-Produkte unterhalb der Regressionsgeraden ausgewählt wurden. Die Werkzeuge zeichneten sich durch geringere Kosten bei der Beschaffung aus. Im Besonderen wurde die Software-Alternative 9 in Erwägung gezogen, da es die meisten betrachteten Anforderungen aus dem Lastenheft erfüllte. Im Team wurde entschieden, dass das digitale Werkzeug in einem Pilotprojekt getestet und für eine eventuelle Einführung bei dem Unternehmen vorbereitet werden soll.

5.5 Fazit

In Abschnitt 5.1 wurden der Beschaffungsprozess eines Herstellers von Verzahnungszentren als Anwendungsbeispiel identifiziert. Dabei wurden der Aufbau des Referenzmodells und die Realisierung im Rechnerwerkzeug als notwendige Voraussetzung angesehen. Für das Anwenderunternehmen konnten die Anwendungsschritte der Methodik festgelegt und in einer Übersicht vorgestellt werden.

In Abschnitt 5.2 wurde die Phase 2 vorgestellt, die eine Anpassung der Bewertung an die Situation der Entwicklung des Anwenderunternehmens vornahm. Die Entwicklung wurde hierfür charakterisiert und im Anschluss ein Prozessgebiet für die Bewertung und Gestaltung ausgewählt. Für das Anwenderunternehmen konnten die entscheidenden Ausprägungen der Entwicklungssituation herausgestellt werden. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz von Baukastensystemen, die Entwicklung basierend auf Anpassungskonstruktionen sowie die Unternehmensgröße einen hohen Einfluss ausübten. Im Ergebnis konnten die Prozessgebiete absteigend nach deren Relevanz gelistet werden. Das Anwenderunternehmen traf auf dieser Basis die Entscheidung, das Prozessgebiet des Systementwurfs in Phase 3 und 4 zu betrachten.

Die Bewertung der DWL in dem ausgewählten Prozessgebiet (Phase 3) wurde in Abschnitt 5.3 vorgestellt. Dabei wurde gezeigt, inwiefern die digitalen Werkzeuge und die Schnittstellen in einer DWL kartographiert werden konnten. Im Anschluss daran wurden die Erfüllungsgrade in den Fähigkeitsstufen der Mechatronik bestimmt und die Werkzeuge in die Quadranten der Interoperabilität eingeordnet. Für das Anwenderunternehmen bestand die DWL aus den digitalen Werkzeugen SA 1 bis 4 in dem Prozessgebiet des Systementwurfs. Aufbauend auf der Kartographie wurde die DWL in die Muss-Fähigkeitsstufe eingeordnet. Um in die Soll-Stufe zu gelangen, war es für das Anwenderunternehmen zuerst notwendig, die Muss-Anforderungen vollständig zu erfüllen. Die digitalen Werkzeuge SA 1 bis 4 wurden als inselartige Systeme identifiziert. Im Vergleich konnte festgestellt werden, dass ein erhöhter Handlungsbedarf für SA 1 bestand.

Die Gestaltung der DWL des Anwenderunternehmens erfolgte im Rahmen des Beschaffungsprozesses (Phase 4). Hierfür wurden in Abschnitt 5.4 die Handlungsempfehlungen in einem Lastenheft zusammengestellt. Dem Unternehmen wurde der Austausch des Werkzeuges SA 1 empfohlen. Die Methodik unterstützte bei der Auswahl zwischen den alternativen IT-Systemen am Anbietermarkt. Es wurde die Prüfung der Software-Alternative 9 im Rahmen eines Pilotprojektes im Anwenderunternehmen empfohlen. Für das Anwenderunternehmen konnte somit ein Hilfsmittel entwickelt werden, welches bei der Auswahl zwischen den Software-Alternativen unterstützte.

6 Beurteilung der Methodik

6.1 Forschungsfragen und Anforderungen

Die FF 1 mündete in einem Referenzmodell der DWL, welches durch eine Modellgrenze aus mechatronischen Handlungsprinzipien begrenzt und in die Referenzsichten des Prozesses, der Funktion und der Information strukturiert ist. Der Bezug zum Maschinenbau wurde durch die inhaltliche Gestaltung des Modells durch Referenzanforderungen hergestellt (vgl. Abschnitt 4.2). Die FF 2 wurde mittels eines Vorgehens zur Anpassung des Referenzmodells ergründet, wobei die Entwicklungssituation mittels Merkmalen und Ausprägungen in den Bereichen Organisation, Projekt und Team erfasst und die Wechselwirkung mit dem Referenzmodell erklärt und zur Eingrenzung des Bewertungs- und Gestaltungsobjektes genutzt wurden (vgl. Abschnitt 4.3). Die FF 3 richtete sich an die Bewertung von digitalen Werkzeuglandschaften, die mittels der Kartographie zum Abgleich zwischen Soll- und Ist-Werkzeuglandschaft, der Systematisierung mechatronischer Fähigkeitsstufen und Quadranten der Interoperabilität erfolgte (vgl. Abschnitt 4.4). Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse konnte die FF 4 in der Art und Weise beantwortet werden, indem die Überführung durch ein Lastenheft, eine Einführung oder Migration von digitalen Werkzeugen und eine zusätzliche rechnergestützte Umsetzung der Methodik erfolgte (vgl. Abschnitt 4.5).

Die Anwendbarkeit der Methodik wurde durch einen zweckorientierten, realitätsnahen Aufbau des Referenzmodells, eindeutige sowie verständliche Referenzanforderungen und die Integration in den Beschaffungsprozess sichergestellt. Dabei wurde ein Leitfaden entwickelt und als Grundlage für die Gestaltung und Integration angewandt. Von einer Verfügbarkeit notwendiger Daten konnte im Zuge des Beschaffungsprozesses ausgegangen werden. Die Praktikabilität wurde durch geringe Ein- und Vorbereitungszeiten und ein angemessenes Aufwand-/Nutzen-Verhältnis in Bezug auf den Maschinenbau sichergestellt. Die Methodik vermittelte ein schrittweises, nachvollziehbares und kriterienbezogenes Vorgehen, wobei die Kriterien für die Entwickler verständlich und eindeutig formuliert sind. Mittels zweckorientierter und transparenter Berechnungsvorschriften wurde die Methodik zusätzlich für den praktischen Einsatz vorbereitet. Die Nachvollziehbarkeit wurde durch ein transparentes Vorgehen mit eindeutigen, dokumentierten Schritten und Verrechnungen sichergestellt. Die insgesamt 250 Referenzanforderungen des Referenz-

modells und die zusätzliche Reduktion der Anzahl gemäß der Entwicklungssituation bedeuten ein überschaubares Maß an Aufwänden bei der Leistungsmessung für die Anwender. Die quantitativen Kriterien wurden zusätzlich durch eine dreistufige Skaleneinteilung unterstützt. Dies ist bei der Zusammenführung der Ist- und Soll-Landschaften im Rahmen der Kartographie erkennbar. Die Ergebnisqualität zeigte sich in der Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse zwischen den Anwenderunternehmen. Die Integration eines Lastenheftes und die Adaption des Beschaffungsprozesses unterstützten die praxistaugliche Überführung von Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der Entwicklungssituation der KMU.

Die Spezifika der Maschinenbaubranche wurden in der Methodik aufgegriffen, indem neun Merkmale mit drei bis sechs Ausprägungen in den Bereichen Organisation, Projekt und Team zur Situationsklärung für eine Einschränkung der Anforderungen an die DWL genutzt werden. Durch die insgesamt mehr als 32.000 theoretischen Kombinationen einer Entwicklung ist eine bereite Anwendungsmöglichkeit von verschiedenen Unternehmen des Maschinenbaus gegeben. Auch wurden bei der Zusammenstellung der Merkmale und Ausprägungen die Herausforderungen und der Charakter der Unternehmen des Maschinenbaus berücksichtigt. In diesem Zusammenhang wurde insbesondere den Möglichkeiten von KMU Rechnung getragen. Die Spezifika der Mechatronik wurden durch die Modellgrenze des Referenzmodells aus mechatronischen Handlungsprinzipien sichergestellt, wobei der Entwicklungsprozess als eine der Referenzsichten zentral in den Mittelpunkt gerückt wurde. Durch die Integration in den Beschaffungsprozess konnte im Besonderen die Mechatronik bei der Auswahl von alternativen digitalen Werkzeugen am Markt im Rahmen einer Ersteinführung oder Migration Berücksichtigung finden. Die Kartographie bedurfte Anwender mit Expertisen aus den Entwicklungsdomänen der Mechanik, Elektrik/ Elektronik und Software. Die DWL wurde umfänglich anhand der Referenzsichten des Prozesses, der Funktion und der Information beschrieben. Ergänzend wurde eine Betrachtung der Interoperabilitäten vorgenommen, die es ermöglichte, die Mechatronik auf die Ebene der Architektur zu erfassen.

6.2 Praktische Anwendung

Es konnte gezeigt werden, dass das schrittweise Vorgehen des Rechnerwerkzeugs die Nutzer bei der Anwendung der Methodik unterstützte. Die Anpassung an die Entwicklungssituation durch die Auswahl eines Prozessgebiets hat sich in der Praxis als sinnvoll herausgestellt. Es war dadurch möglich, die Aufwände für die Anwender auf ein

überschaubares Maß zu beschränken. In der Anwendung stellte sich heraus, dass im Besonderen die Bewertung der DWL (Phase 3) es ermöglichte, den disziplinenübergreifenden Austausch zwischen den Entwicklerinnen und Entwicklern zu fördern. Es konnten die Beteiligten aus den Abteilungen im Unternehmen in die Methodik involviert werden. Darüber hinaus fokussierte die Methodik einen schrittweisen Ansatz, der durch die Anwender begrüßt wurde. Die Gestaltung der DWL (Phase 4) fand mittels der Integration der Mechatronik in bestehende Unternehmensprozesse statt. Die zentrale Rolle des Beschaffungsprozesses zur Überführung der Handlungsempfehlungen konnte bestätigt werden. Auch wurde gezeigt, dass die Handlungsempfehlungen in einer praxistauglichen und einem für die Anwendung geeigneten Detaillierungsgrad vorlagen.

Die Anwendung zeigt jedoch auch auf, welche Einschränkungen in der Methodik vorhanden waren. So war die Methodik auf bestimmte Prozessgebiete beschränkt, die z. T. nicht in der gleichen Art und Weise im Sprachgebrauch der Anwender im Unternehmen vorhanden waren. Es waren ausführliche Erklärungen und Definitionen notwendig, um ein gemeinsames Verständnis zu schaffen. Somit wurde von den Anwendern eine gewisse Transferleistung erwartet, um die Begrifflichkeiten, die in der Methodik verwendet werden, in den Sprachgebrauch des Anwenderunternehmens zu überführen. Auch fokussierte die Methodik die Bewertung und Gestaltung für die Branche des Maschinenbau. Die Beschreibung der Entwicklungssituation ermöglichte die Klassifizierung der Unternehmen. Bei der Anwendung hat es sich jedoch herausgestellt, dass die neun Merkmale einer Entwicklung als nicht ausreichend empfunden worden sind. Die Argumente zugunsten einer Erweiterung der Merkmale lauteten, dass das Anwenderunternehmen die Besonderheit und Einzigartigkeit der Entwicklungsabteilungen nicht ausreichend widerspiegelt habe. Es wurde von den Anwendern empfohlen, die Anzahl der Merkmale zu erhöhen.

Für die weitere Verbesserung der Methodik empfahlen die Anwender, dass das Rechnerwerkzeug mit der im Unternehmen bestehenden Software zur Begleitung des Beschaffungsprozesses zusammengeführt wird. Dadurch sollten eine doppelte Datenhaltung vermieden und die Anwendung der Methodik gestärkt werden. In diesem Zusammenhang wurde der Wunsch geäußert, dass die Handlungsempfehlungen in das bestehende Format des Lastenheftes im Beschaffungsprozess übertragen werden sollten. Auch ließ das Rechnerwerkzeug eine Vergleich von verschiedenen Zukunftsszenarien bisher nicht zu. Daher wurde die Forderung durch die Anwender gestellt, dass die Szenariotechnik in den Bewertungs- und Gestaltungsansatz integriert werden sollte. Das Rechnerwerkzeug sollte hierfür das Speichern, den Vergleich und eine gesonderte Auswertung zulassen. Ebenfalls äußerten die Anwender den Wunsch, dass die Auswahl der Software-Alternativen (Schritt 4.b) für die Verhandlung durch den Einkauf eingesetzt werden sollte. Hierfür

sollte die Methodik die Gegebenheiten beim Einkauf der Software berücksichtigen. Das Rechnerwerkzeug müsste die Diagramme für die Einkaufsverhandlungen aufbereiten, in das Vorgehen integriert und Schnittstellen zu bestehenden Hilfsmitteln bereitstellen.

6.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wird anhand von Aufwänden und Nutzeneffekten untersucht. Es wird der Beschaffungsprozess von digitalen Werkzeugen ohne und mit der Anwendung der Methodik verglichen. Dabei wird eine beispielhafte Abschätzung vorgenommen, die als Anregung und Orientierung dienen kann, wobei eine pauschale Repräsentanz aller Anwendungsszenarien der Methodik auszuschließen ist. Die angenommenen Vereinfachungen basieren dabei auf den Erfahrungen aus dem Anwendungsbeispiel und müssen für den spezifischen Einsatz hinterfragt, ggf. angepasst oder auch um zusätzliche Betrachtungen ergänzt werden. Das Beispiel zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit stellt monetäre Aufwände den Nutzeneffekten gegenüber. Während sich die Aufwände in der Kapazitätsbindung von internen und externen Personal widerspiegeln, werden unter einem Nutzen diejenigen Aufwendungen verstanden, die bei einer effizienten Durchführung der Bewertungs- und Gestaltungsmethodik eingespart werden können.

Für die beispielhafte Abschätzung seien zwei Szenarien des Beschaffungsprozesses, mit (Szenario 1) und ohne einem Einsatz der Methodik (Szenario 2), unter folgenden Voraussetzungen und Annahmen betrachtet: Der Beschaffungsprozess orientiert sich an den Aktivitäten von VAJNA (2009) und findet bei einem mittelständigen Unternehmen des Maschinenbaus statt, wobei die Notwendigkeit für die Einführung oder Migration eines digitalen Werkzeuges zur Unterstützung der Mechatronik bereits gegeben ist. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Rolle eines Mechatronik-Ingenieurs im Unternehmen vorhanden ist, werden mindestens drei Personen mit Erfahrungen aus den Bereichen Mechanik-, Elektrik/Elektronik- und Software-Entwicklung benötigt und ihre Beteiligung am Beschaffungsprozess mit 20 Prozent eingeplant. Die Projektdauer ist auf sechs Monate beschränkt, wobei der Vorgang mit der Auswahl eines konkreten digitalen Werkzeuges zur Einführung oder Migration vollständig abgeschlossen wird. Es werden externe Kapazitäten durch Beratungsleistungen einbezogen, die mit ihren Erfahrungen zu ca. 1/3 der Projektzeit zur Seite stehen. Für sie ist ein Kostensatz von 120 Euro pro Projektstunde, gegenüber der Verrechnung von internen Personalkosten von 80 Euro pro Arbeitsstunde, vorgesehen. Ein Arbeitstag beträgt acht Arbeitsstunden und ein Arbeitsmonat 20 Arbeitstage.

Tabelle 6.1: Szenarien ohne und mit Einsatz der Methodik

Phasen im Beschaffungsprozess	Personal-einsatz	ohne...		mit Einsatz der Methodik		
		Kapa. [Tag]	Aufwand [Euro]	Effiz.-faktor	Kapa. [Tage]	Aufwand [Euro]
Gründung	intern	3	1.920	0	3	1.920
	extern	1	960	0	1	960
Bildung Projektteam	intern	3	1.920	0	3	1.920
	extern	1	960	0	1	960
Wahl der Einführungspartner	intern	10	6.400	0	10	6.400
	extern	8	7.680	0	8	7.680
Analyse des aktuellen Zustands	intern	17	10.880	0	17	10.880
	extern	10	9.600	0,5	5	4.800
Sollkonzept und Anforderungsprofil	intern	13	8.320	0	13	8.320
	extern	8	7.680	0,5	4	3.840
Bewertung und Auswahl	intern	15	9.600	0	15	9.600
	extern	8	7.680	0,5	4	3.840
Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	intern	8	5.120	0	8	5.120
	extern	5	4.800	0,5	2,5	2.400
Begleitung der Einführung/Migration	intern	5	3.200	0	5	3.200
	extern	5	4.800	0	5	4.800
Summe:		120	91.520		104,5	76.640

Für einen Vergleich zwischen den Szenarien ohne und mit dem Einsatz der Methodik (Abbildung 6.1) wird ein Effizienzfaktor eingeführt, der sich in den Personalkapazitäten von externen Beratungsleistungen niederschlägt. Der Faktor repräsentiert im Allgemeinen einen Wissenszuwachs durch den Einsatz der Methodik, der im Speziellen durch das Referenzmodell, das Vorgehen zur Anpassung an die Entwicklungssituation sowie die Systematik zur Bewertung und Gestaltung der DWL unter Aspekten der Mechatronik gewonnen wird. Der Effizienzfaktor bietet eine Einsparung für das Unternehmen in den Phasen des Beschaffungsprozesses. In der Analyse des aktuellen Zustandes der DWL unterstützt die Methodik durch das Bewertungsvorgehen (Phase 3). Das Sollkonzept und das Anforderungsprofil kann durch die Gestaltung in der Methodik (Phase 4) eine Zeitverkürzung für die Anwender darstellen. Die Bewertung und Auswahl im Beschaffungsprozess wird durch die Schritte in der Methodik verbessert. Die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit erfährt durch die Berücksichtigung von Kosten im Fall der Einführung oder Migration von Software-Alternativen in Schritt 4.b der Methodik Unterstützung. Für diese Phasen kann der Effizienzfaktor von 0,5 auf externe Beratungsdienstleistungen abgeschätzt werden, welcher im Ergebnis des Vergleichs der Szenarien eine Einsparung von 14.880 Euro (16 Prozent) bei einem Einsatz der Methodik verspricht. Die internen Einsparungen sowie die Lernaufwände werden in den Szenarien nicht betrachtet, da sie

zumeist erst im Verlauf eines mehrfachen Einsatzes der Methodik im Unternehmen zum Tragen kommen.

Neben der Reduktion von Personalaufwänden liegen nicht-montäre Nutzeneffekte in der Vermeidung von Fehlinvestition bei einer Einführung oder Migration von Software, die sich in der Anwendung u. U. als ungeeignet oder hinderlich für die DWL im Unternehmen herausstellt. Die Methodik leistet einen positiven Beitrag zur Berücksichtigung der Mechatronik in den DWL der Unternehmen des Maschinenbaus. Neben den Potenzialen (Abschnitt 1.3), die bereits für die Erarbeitung der Methodik motivieren, sind wesentliche Nutzeneffekte auch in der Wissenskonzentration der Erfahrungen und Einschätzungen industrieller Anwender in einem ganzheitlichen Referenzmodell der DWL für die Branche des Maschinenbaus vorhanden. Es werden ihnen eine Orientierung und ein Regelwerk zur Verfügung gestellt, die es ermöglichen, die Werkzeuge unter mechatronischen Aspekten zu bewerten und zu gestalten. Dabei repräsentiert die Methodik ein standardisiertes Vorgehen, welches an die Bedürfnisse der KMU angepasst ist. Die entwickelten Hilfsmittel der Kartographie, der mechatronischen Fähigkeitsstufen und der Quadranten der Interoperabilität sind spezifisch für die Anwender und die Anwenderinnen systematisiert und versprechen eine Unterstützung bei der Bewertung und der Gestaltung von unternehmensinternen DWL.

Um Aussagen über den Gültigkeitsbereich eines wirtschaftlichen Einsatzes der Methodik zu treffen, ist es notwendig die Projektgröße zu berücksichtigen. Die Projektgröße ist u. a. beeinflusst durch die zu betrachtenden Prozessgebiete, die Anzahl der Werkzeuge in der DWL sowie die voraussichtliche Projektlänge im Beschaffungsprozess. Die o. g. beispielhaften Szenarien werden hierfür als Ausgangslage genutzt. Es werden zudem die Aufwände ergänzt, die bei einem jedem Einsatz der Methodik zum Tragen kommen (fixe Kosten). Von einer wirtschaftlichen Anwendung ist auszugehen, solange die Gesamtkosten im Beschaffungsprozess bei einem Einsatz der Methodik unterhalb derjenigen ohne methodische Unterstützung liegen.

Für die Berechnungen wird von einem linearen Zusammenhang zwischen den Kosten und der Projektgröße ausgegangen. Die Projektgröße wird mittels der Anzahl der Wiederholungen der Szenarien berücksichtigt, wobei die Aufwände eines typischen Projektes im Beschaffungsprozess wiederholt aufkommen (variable Kosten). Ebenfalls wird angenommen, dass es zu keinen Änderungen in der Zusammensetzung des Projektteams kommt. Neben den Kosten beim Einsatz der Szenarien (Tabelle 6.1) im Beschaffungsprozess sind zudem die Lernaufwände im Umgang mit der Methodik (z. B. dem vorgestellten Rechnerwerkzeug) einzubeziehen. Aufgrund der Neuheit des Ansatzes muss davon ausgegangen werden, dass die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Projekt bisher keine Erfahrungen

in der Anwendung der Methodik besitzen. Aus diesem Grund werden fixe Kosten von 38.320 Euro angenommen. Diese basieren auf Abschätzungen und entsprechen 1/3 der Gesamtkosten bei einer erstmaligen Durchführung des Beschaffungsprozesses (mit Methodik).

Tabelle 6.2: Grenze eines wirtschaftlichen Einsatzes der Methodik

Wiederholungen Szenarien	Beschaffung ohne/mit Methodik	fixe Kosten [Euro]	interne, variable... [Euro]	externe, variable... [Euro]	gesamte Kosten [Euro]
1	ohne	0	47.360	44.160	91.520
	mit	38.320	47.360	29.280	114.960
2	ohne	0	94.720	88.320	183.040
	mit	38.320	94.720	58.560	191.600
3	ohne	0	142.080	132.480	274.560
	mit	38.320	142.080	87.840	268.240

Die Gesamtkosten bei einem Einsatz ohne/mit Methodik ist der Projektgröße gegenübergestellt, repräsentiert durch die Wiederholungen der Szenarien 1 und 2 (Tabelle 6.2). Im Ergebnis der Berechnungen konnte die Grenze eines wirtschaftlichen Einsatzes im Beschaffungsprozess festgestellt werden. Diese liegt bei einer dreifachen Wiederholung der o. g. typischen Konfiguration der beiden Szenarien und einen Gesamtkosten von 274.560 Euro ohne sowie von 268.240 Euro mit einem Einsatz der Methodik (Differenz von 6.320 Euro). Bei geringeren Wiederholungen überwiegen die Kosten für Lernaufwände (mit Methodik) denen der Beauftragung von externen Beratern (ohne Methodik). Ab einer Projektgröße äquivalent zu einer dreimaligen Durchführung der Szenarien ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht die vorgestellte Methodik im Beschaffungsprozess zu empfehlen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn von einer Projektlänge von mehr als 18 Monaten auszugehen ist. Ebenfalls ist die Projektgröße zum Beispiel von der Anzahl der für eine Einführung im Unternehmen ausgewählten Software-Anwendungen abhängig. Bei mehr als drei Software-Anwendungen ist gleichermaßen ein Einsatz der Methodik anzuraten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Branche des Maschinenbaus ist ein Wandel von mechanisch hin zu mechatronisch geprägten Entwicklungsprozessen zu verzeichnen, der sich auch in den DWL der Unternehmen wiederfinden sollte. In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, eine Methodik zu entwickeln, die DWL unter den Gesichtspunkten der Mechatronik für spezifische Entwicklungssituationen bewertet und gestaltet. Dabei wurde eine ganzheitliche Abbildung notwendiger Aktivitäten, Funktionen, Artefakte und Techniken entwickelt, die angepasst auf die spezifische Konstellation der Organisation, des Projektes und des Teams im Entwicklungsbereich des Unternehmens angepasst wurde. Die Methodik wurde durch Systematiken unterstützt, die die Aspekte der Bewertung und Gestaltung herausstellen, um eine Überführung in die praxistaugliche Anwendung zu begünstigen. Da die Einflussnahme auf die DWL durch die investitionsintensive Einführung oder Migration von Software bestimmt war, berücksichtigt die Methodik auch den Beschaffungsprozess, erstellt Adaptionen und verdeutlicht Integrationsschwerpunkte.

Nach der Einleitung (Kapitel 1) erfolgte eine Begriffsbestimmung aus den Bereichen der Mechatronik und der digitalen Entwicklung (Kapitel 2). Der Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 3) verdeutlicht die Vielzahl und die Vielseitigkeit der Lösungsansätze der Unternehmen im Maschinenbau, die für ein angepasstes Vorgehen in unterschiedlichen Situationen in der Entwicklung motivierten. Im Rahmen der mechatronischen Entwicklung konnten bestehende Vorgehensmodelle dargelegt und es konnte auf die mangelnde Betrachtung der digitalen Werkzeuge geschlossen werden. Die Untersuchung der Vorgehensweisen beim Bewerten aus den Fachgebieten der Informatik und des Maschinenbaus bestätigten diese Aussage, wobei in der Folge wesentliche Handlungsbedarfe abgeleitet wurden. Auf deren Basis war es möglich, eine Methodik zur situationsspezifischen Bewertung und Gestaltung von DWL in der Entwicklung des Maschinenbaus zu entwickeln (Kapitel 4). Im Kern wurde ein ganzheitliches Referenzmodell zur Beschreibung von DWL erarbeitet, welches inhaltlich durch Referenzanforderungen gestaltet und in Referenzsichten des Prozesses, der Funktion und der Information strukturiert ist. Das Referenzmodell wurde an die Konstellationen der Organisation, der Projekte und des Teams in der Entwicklung angepasst. Dazu wurden Merkmale und Ausprägungen einer Entwicklungssituation festgelegt, die es ermöglichten, die Unternehmen der Branche des Maschinenbaus weitgehend zu charakterisieren und das Betrachtungsobjekt im Sinne einer Bewertung und einer Gestaltung von DWL auf relevante Bereiche einzugrenzen. Die situationsspezifische

Referenz wurde genutzt, um eine Bewertung der Ist-Werkzeuglandschaft zu ermöglichen. Die Methodik schlug dazu eine sogenannte Kartographie der DWL vor, welche die Landschaft in deren digitale Bestandteile aufschlüsselte und architekturbezogene Wertbeiträge zur Mechatronik zuordnete. Als Resultat zeigte die Methodik die Einordnung in Fähigkeitsstufen auf, die in die aufbauenden Kategorien von Muss, Soll und Kann untergliedert wurden. Weiterhin konnte die Landschaft anhand der Zusammenarbeit in die vier Quadranten der Interoperabilität (inselartig, interoperable, teilintegrierte und integrierte Systeme) gegliedert werden. Vor dem Hintergrund dieser Bewertung fand eine Gestaltung der DWL statt, indem ein unternehmensspezifisches Zielsystem abgeleitet und ein Lastenheft für die Einführung sowie für die Migration von notwendiger Software systematisiert wurde. Ergänzt wurde die Methodik durch eine Systematik zur Auswahl von Software-Alternativen am Markt und die Realisierung in einem Rechnerwerkzeug. Die Methodik wurde in einem repräsentativen Anwendungsbeispiel in die Praxis überführt (Kapitel 5), wobei das Vorgehen und die Ergebnisse für das Anwendungsunternehmen dargestellt wurden. Abschließend wurde die Erfüllung der Forschungsfragen und der Anforderungen geprüft, die Erkenntnisse aus der praktischen Anwendung genannt sowie die Wirtschaftlichkeit anhand eines Vergleichs von zwei Szenarien mit und ohne Einsatz der Methodik beispielhaft aufgezeigt (Kapitel 6). Im Ergebnis konnte anhand der Szenarien eine Einsparung von 16 Prozent der Projektkosten im Beschaffungsprozess abgeleitet werden. Auch wurden die Nutzeneffekte eines Einsatzes der Methodik herausgestellt.

Auch in Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass die digitale Unterstützung der Entwicklung im Maschinenbau zunimmt. Es ist anzunehmen, dass der Reifegrad von IT-Funktionen steigt und Fragestellungen der Interoperabilität zwischen den IT-Systemen in einer Landschaft zunehmen werden. Die ergonomische Gestaltung der Werkzeuge, der Einsatz mobiler Techniken, z. B. Internet-driven IT (ABRAMOVICI ET AL. 2015, S. 164), und die einhergehenden Geschäftsmodelle werden neuartige Formen der Zusammenarbeit bieten. Zusammenfassend können folgende zukünftige Forschungsfragen dargelegt werden, die im Folgenden detailliert ausgeführt werden:

- Wie kann die Methodik in weitere Branchen übertragen und ggf. angepasst werden?
- Wie können nicht-lineare Faktoren bei der Software-Auswahl berücksichtigt werden?
- Wie können Cyber-physische Module entwickelt und konfiguriert werden?
- Wie können agile Vorgehensweisen in die Modellvorstellung integriert werden?
- Wie kann ein Lean Digital Engineering gestaltet und etabliert werden?

Für das in der Methodik dargelegte Referenzmodell bedeutet dies, dass die Erweiterung um die sich zukünftig bietenden informationstechnischen Neuerungen und die anwendergerechte Anpassung im Modell berücksichtigt und systematisiert werden müssen. Neben den informationstechnischen Möglichkeiten ist der Modellzweck an die Branche des Maschinenbaus und die zunehmende Bedeutung der Mechatronik gebunden, wobei angrenzende und strukturell ähnliche Branchen und Gebiete nicht in die Modellbildung einbezogen worden sind. An dieser Stelle bieten sich die Ergänzungen des Modells zur Übertragung in weitere Branchen oder auch zur Kopplung an bestehende Modelle an, beispielsweise aus dem disziplinspezifischen Entwurf oder der Digitalen Fabrik.

Auch sind die zunehmenden Spezialisierungen und eine daraus resultierende erhöhte Anzahl an digitalen Werkzeugen zu beachten. Die Komplexität der Werkzeuge ist in der Methodik mittels eines Vergleichs zwischen der Erfüllung des Lastenhefts und den Kosten verknüpft. Zudem erfolgte eine Separation durch die linearen Regressionsgeraden (Market Line und Best Practice Line). Die Komplexitätszunahme deuten jedoch darauf hin, dass auch nicht-lineare Zusammenhänge eine Steigerung der Qualität und Präzision der Ergebnisse zur Folge haben können. Dabei ist in Zukunft zu untersuchen, für welche Fälle eine solche Betrachtung sinnvoll ist und wie eine nicht-lineare Abbildung die Auswahlentscheidung im Beschaffungsprozess unterstützen kann.

Weiterhin sind nicht nur Veränderungen in den digitalen Werkzeugen zu erwarten, sondern werden mechatronische Maschinen und Anlagen um Cyber-physische Module ergänzt (GAUSEMEIER ET AL. 2013c, S. 7), wodurch die Fragestellungen der Kommunikationen, der Abstimmungsprotokolle und der informationstechnischen Strukturen zwischen den Modulen an Bedeutung gewinnen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Herausforderungen an die digitalen Werkzeuglandschaften, Cyber-physische Module zu entwickeln, zu konfigurieren und in Betrieb zu nehmen. Für die Methodik der Arbeit sind diese Besonderheiten in Zukunft in der Bewertung und in der Gestaltung zu berücksichtigen.

Die Entwicklung von Cyber-physischen Modulen wird aufgrund der Komplexität hohe Abstimmungsbedarfe und organisatorische Flexibilität von den Unternehmen des Maschinenbaus fordern. Es müssen agile Vorgehensweisen für die Branche entwickelt werden, die ebenfalls eine digitale Unterstützung erfahren und die sich durch eine hohe Interoperabilität zu den bestehenden Landschaften auszeichnen. Dazu sollte diese Methodik sowohl in der Modellvorstellung als auch in den Systematiken zur Bewertung und Gestaltung adaptiert und ggf. erweitert werden.

In der Produktionstechnik sind die Methoden des Lean Management etabliert. Zunehmend werden die Ansätze auch in der Produktentwicklung von Maschinen und Anlagen

7 Zusammenfassung und Ausblick

eingesetzt. Für eine effektive und effiziente Anwendung ist die Frage zu beantworten, inwiefern und unter welchen Voraussetzungen eine Übertragung der Best Practices in das digitale Engineering stattfinden kann. Hierfür sind sowohl die bestehenden Gegebenheiten der IT-Infrastruktur wie auch die zusätzlichen IT-Möglichkeiten zur Unterstützung der Lean Prinzipien zu untersuchen. Mit dem Ziel ein Lean Digital Engineering zu schaffen, ist die Frage zu beantworten, wie zukünftige DWL gestaltet werden müssen.

Betreute Studienarbeiten

Studierende	Titel der Arbeit
Lorenz Sailer (15.02.-15.08.2012)	Methode zur Integration der physikbasierten mechatronischen Simulation in den Entwicklungsprozess
Thomas Bartnik (01.03.-31.08.2012)	Identifikation und Abbildung innovativer Simulationsverfahren zur Simulation formlabiler Materialflussobjekte
Matthias Braun (01.12.2012-01.06.2013)	Erstellung einer Methodik zur Auswahl von Vorgehensmodellen für den mechatronischen Produktentwicklungsprozess
Thomas Niedermeier (01.10.2012-10.04.2013)	Weiterentwicklung und Standardisierung elektrotechnischer Komponenten bei fördertechnischen Produktionsanlagen im Bereich der Lackier- und Endmontagetechnik
Lukas Stacheder (01.12.2012-01.06.2013)	Einfluss einer komplexitätsorientierten Bauteilbetrachtung im Produktentwicklungsprozess auf die Time-to-Market technischer Produkte am Beispiel von Kunststoff- Spritzguss-Bauteilen
Weiwei Sang (01.01.-01.07.2013)	Benchmark von Simulationswerkzeugen und -methoden anhand einer miniaturisierten Stanzanlage
Thomas Semm (01.04.-01.10.2013)	Bewertung des digitalen Engineerings am Beispiel der Entwicklung eines Abfüllmoduls einer miniaturisierten Modellanlage
Georg Mayer (01.05.-01.11.2013)	Methodik zur Bewertung von durchgängigen mechatronischen Entwicklungswerkzeugen
Andreas Matula (15.05.-15.11.2013)	Risikobasierte Kosten- und Nutzenbewertung von digitalen Werkzeugketten im mechatronischen Entstehungsprozess
Christian Läufer (15.06.-15.12.2013)	Kostenbewertung von digitalen Werkzeugketten im Entstehungsprozess von Produktionssystemen
Oliver Wangler (01.06.-01.12.2013)	Bewertung von informationsflüssen in digitalen Werkzeugketten am Beispiel der Elektronik-Konstruktion
Thomas Bartnik (15.07.2013-14.01.2014)	Kontextspezifisches Reifegradmodell für mechatronische Entwicklungsprozesse im Maschinen- und Anlagenbau
Maximilian Irlinger (01.09.2013-01.03.2014)	Erarbeitung eines Anforderungsmodells für digitale Werkzeuge als Grundlage einer Mechatronik-Reifegradbewertung
Andreas Brem (01.05.2013-01.11.2013)	Aufbau einer Leistungsbewertung für digitale Werkzeugketten am Beispiel der Entwicklung eines Moduls zum Falten und Kleben einer Verpackungsanlage

7 Zusammenfassung und Ausblick

Studierende	Titel der Arbeit
Andreas Matula (01.11.2013-30.04.2014)	Entwurf einer wandlungsfähigen Schnittstelle zwischen Simulation und Steuerung für die mechatronische Simulation
Thomas Semm (01.01.-01.07.2014)	Referenzmodell für mechatronische Entwicklungswerkzeuge
Maria Franke (01.08.2014-06.03.2015)	Reifegradmanagement digitaler Werkzeuge im Entwicklungsprozess mechatronischer Unternehmen
Xiaomei Li (01.08.2015-01.02.2016)	Entwicklung eines Reglers zur Auslegung eines Zerspanungsprozesses

A Anhang

A.1 Forschungsprojekte und Veröffentlichungen

Die Arbeit ist während der beruflichen Phase als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München sowie der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in München und Augsburg entstanden. Der Autor wirkte dabei maßgeblich in den Forschungsprojekten MEPROMA, AUTOPHYS und BAZMOD mit (chronologische Reihenfolge):

Mechatronisches Engineering zur effizienten Produktentwicklung im Maschinen- und Anlagenbau (MEPROMA, FKZ: 02PJ1051)

Um den mechatronischen Entwicklungsprozess nachhaltig zu verbessern, wurden in MEPROMA Lösungen erarbeitet, die im Allgemeinen zu Prozessverbesserungen des mechatronischen Engineerings beitragen. Im Speziellen wurden die kontextspezifischen Auswahl von Methoden, digitalen Werkzeugen und Beschreibungssprachen bei Entwicklungsprozessen thematisiert und die Ergebnisse durch die Erstellung von Schulungskonzepten sowie nationalen und internationalen Leitfäden in die Praxis transferiert. Die mitwirkenden Projektpartner waren die Fa. ITQ, die Fa. Trumpf, die Fa. Kapp, die Fa. Somic, die Fa. Optima, die Fa. Kostwein und das Technikum Wien.

Automobilbau mit Hilfe einer physikbasierten mechatronischen Simulation (AUTOPHYS, GZ: RE 1112/35-1)

In Kooperation mit der Produktionsplanung von Mercedes-Benz wurden die Methoden der physikbasierten virtuellen Inbetriebnahme auf den gesamten Entwicklungsprozess ausgeweitet, um so Potenziale in der Produkt- und Prozessentwicklung effizient nutzen zu können. Innerhalb des Projektes wurde dazu eine systemorientierte Methode für einen kontinuierlichen Einsatz der Physiksimulation in der Konzeptionierung, Planung, Entwicklung und Inbetriebnahme von automatisierten Produktionsanlagen in der Automobilindustrie erarbeitet.

Bauteilgerechte Maschinenkonfiguration in der Fertigung durch Cyber-Physische Zusatzmodule (BAZMOD, FKZ: 02PJ2637)

Das Forschungsprojekt BAZMOD entwickelte einen integrierten Ansatz zur Kommunikation zwischen Maschine, Steuerung und Produktionsumgebung am Beispiel der zerspanenden Fertigung. Es wurden geeignete Cyber-Physische Zusatzmodule konzeptioniert und prototypisch erarbeitet, die eine Selbstkonfiguration im Sinne eines *Plug-and-Produce* ermöglichen. Der Kern der Arbeiten ist in der Werkzeugmaschinen-spindel verortet, die mit standardisierten Schnittstellen ausgestattet und um Messmittel und Software-Module zur automatischen Identifikation erweitert wurde. Die mitwirkenden Projektpartner waren die Fa. KOMET Group, die Fa. Blum-Novotest, die Fa. Franz Kessler, die Fa. MAPAL Fabrik für Präzisionswerkzeuge Dr. Kress, die Fa. Renishaw, die Fa. Röhme und die Fa. Schwäbische Werkzeugmaschinen.

Während der wissenschaftlichen Tätigkeit an den Instituten entstanden unter maßgeblicher Mitwirkung des Autors wissenschaftliche Veröffentlichungen, die auf verschiedene Art und Weise zur vorliegenden Arbeit beitragen. Es entstanden Veröffentlichungen, die als grundlegende Vorarbeiten genutzt oder zum Aufzeigen von Handlungsbedarfen dienen. Weiterhin sind inhaltliche Abschnitte der Methodik in Veröffentlichungen ausgeführt oder auch durch angrenzende, weiterführende Gedanken erweitert. Die wissenschaftlichen Beiträge sind zusammengefasst, den Abschnitten der Arbeit zugeordnet und ergänzend in den betreffenden Textstellen explizit ausgewiesen:

Mitgewirkte Veröffentlichungen (chronologische Reihenfolge)	Einordnung
REINHART ET AL. (2012) Reinhart, G.; Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Haberstroh, P.: Produktqualität intelligent sichern - Herausforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess, In: Mechatronik 11/ 2012	Abschnitt 1.2
DRESCHER ET AL. (2012) Drescher, B.; Klein, T.; Stich, P.; Reinhart, G.: Kontextspezifische Auswahl und Adaption zur Effizienzsteigerung im Maschinen- und Anlagenbau, In: Tag des Systems Engineering 2012	Abschnitt 1.2 Abschnitt 3.3 Abschnitt 4.3
STICH ET AL. (2013a) Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Haberstroh, P.; Reinhart, G.: Aktuelle Herausforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess, In: Mechatronik News, Januar 2013	Abschnitt 1.2
STICH ET AL. (2013b) Stich, P.; Drescher, B.; Reinhart, G.: Mechatronik – aber konsequent. Leistungsbeurteilung heterogener Entwicklungswerkzeuge im Maschinen- und Anlagenbau, In: megalink Ausgabe 6/2013, S. 24–26	Abschnitt 1.2

A.1 Forschungsprojekte und Veröffentlichungen

Mitgewirkte Veröffentlichungen (chronologische Reihenfolge)	Einordnung
<p>DRESCHER ET AL. (2013b)</p> <p>Drescher, B.; Stich, P.; Reinhart, G.: Performance Assessment of Heterogeneous Engineering Tools along the Development Process of Manufacturing Systems, In: International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV) 7.-9. Okt 2013</p>	<p>Abschnitt 3.3</p> <p>Abschnitt 4.4</p>
<p>DRESCHER ET AL. (2013a)</p> <p>Drescher, B.; Stich, P.; Kiefer, J.; Strahilov, A.; Bär, T.; Reinhart, G.: Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess – Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau, In: ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Paderborn 09.–11. Okt 2013</p>	<p>Abschnitt 3.3</p> <p>Abschnitt 4.4</p>
<p>DRESCHER & REINHART (2013)</p> <p>Drescher, B.; Reinhart, G.: Unternehmensspezifische Zusammenstellung und Bewertung digitaler Werkzeugketten zur Unterstützung mechatronischer Anlagenentstehungsprozesse, Tag des Systems Engineering, Stuttgart, 2013</p>	<p>Abschnitt 4.1</p>
<p>DRESCHER ET AL. (2014a)</p> <p>Drescher, B.; Klein, T. P.; Spiegelberger, B.; Stetter, R.; Reinhart, G.: Synthesis of a mechatronic reference model for engineering processes of production systems, Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) IEEE/ASME 2014, Besançon, France</p>	<p>Abschnitt 4.2</p>
<p>DRESCHER & REINHART (2014)</p> <p>Drescher, B.; Reinhart, G.: Reference Model for the Description of Digital Engineering Tools Based on Mechatronic Principles and Concepts, WGP Kongress, In: Trans Tech Publ 2014 – Advanced Materials Research, S. 547–554</p>	<p>Abschnitt 4.2</p>
<p>DRESCHER ET AL. (2014b)</p> <p>Drescher, B.; Läufer, C.; Reinhart, G.: Kostenbewertung und Einordnung digitaler Werkzeuglandschaften zur Entwicklung von mechatronischen Produktionssystemen, In: VDI Automation 2014, 01. und 02. Juli 2014 in Baden-Baden</p>	<p>Abschnitt 4.5</p>
<p>HERRMANN ET AL. (2015)</p> <p>Herrmann, C.; Reinhart, G.; Schuh, G.; Spengler, T.; Vietor, T.; Drescher, B.; Gäde, M.; Klein, T.; Richter, T.; Schönemann, M.; Spiegelberger, B.; Vogels, T.: Strategien, Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung mechatronischer Produkte, In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), Ausgabe 5/2015</p>	<p>Abschnitt 1.2</p>
<p>VDMA (2015)</p> <p>Spiegelberger, B.; Stetter, R.; Reinhart, G.; Drescher, B.; Haberstroh, P.; Hammers-tingl, V.; Klein, T.; Stich, P.; Tenner, A.; Wölfel, F.; Frank, C.; Marwitz, G.; Pfeifer, G.; Bonetsmüller, M.; Julinek, S.; Munk, M.; Wetzel, M.: Anforderungen und Methoden im mechatronischen Engineering – Leitfaden für Anwender im Maschinen- und Anlagenbau, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), ISBN: 978-3-8163-0678-8, 2015 in Frankfurt am Main</p>	<p>Abschnitt 4.2</p>

Mitgewirkte Veröffentlichungen (chronologische Reihenfolge)	Einordnung
STICH ET AL. (2015)	
Stich, P.; Richter, C.; Klein, T.; Drescher, B.; Reinhart, G.: Engineering-Wertstrom – Analyse und Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse,	Abschnitt 1.2 Abschnitt 3.3
In: VDI Automation 2015, 11. und 12. Juni 2015 in Baden-Baden	

A.2 Referenzmodell digitale Werkzeuglandschaft

Legende:

Funktionsreferenzsicht

AT	Automatisierung
KK	Kommunikation
RV	Rollenvergabe
VK	Verifikation
VW	Verwaltung
WV	Wiederverwendung

Informationsreferenzsicht

A	Ausgangsinformation
DS	Disziplinspezifische Maschineninformation
E	Eingangsinformation
IB	Inbetriebnahmebezogene Maschineninformation
ID	Interdisziplinäre Maschineninformation
OG	Organisationsbezogene Maschineninformation
ST	Simulations- und testbezogene Maschineninformation

Digitale Technik

CAA	Computer Aided Analysis
CAC	Computer Aided Conceptioning
CAE	Computer Aided Engineering
CAEX	Computer Aided Engineering eXchange
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAO	Computer Aided Office
CAP	Computer Aided Planning

CAT	Computer Aided Testing
CAQ	Computer Aided Quality Assurance
CACE	Computer Aided Control Engineering
CAD	Computer Aided Engineering
CASE	Computer Aided Software Engineering
ECAD	Electrical Computer Aided Design
FEM	Finite Element Methode
MCAD	Mechanical Computer Aided Design
PDM	Product Data Management
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
TAM	Technik des Anforderungsmanagement
TDM	Team Data Management
TFM	Technik der Funktionsmodellierung
TPM	Technik des Projektmanagements
TPP	Technik der Publikationsplattform
TWM	Technik des Wissensmanagement
TZR	Technik zur Recherche
TZK	Technik der Kommunikation
VR	Virtual Reality
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information										
			Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG									
Anforderungsmanagement																							
Anforderung spezifizieren																							
RA001	Erstellung und Verwaltung einer Anforderungsspezifikation unter Berücksichtigung von Abhängigkeiten.	7	TAM	x													A						
RA002	Sammeln der Anforderungen mit eindeutigen und durchgängigen Begrifflichkeiten im Entwicklungsheft.	7	TAM	x													EA						
RA003	Projektübergreifende Bereitstellung von Sicherheitsvorschriften der Maschine oder Anlage.	3	CAC		x											E	E		A				
RA004	Definition der Bedienungsabläufe der Maschine oder Anlage.	8	CAP	x												A							
RA005	Strukturierung und Status der Anforderungen für die Entwicklung der Maschine (Erfüllungsgrad).	7	TAM		x												EA						
RA006	Sammeln von Anforderungen mit Vertrieb (Erfahrungen einholen).	1	TAM	x												E	EA						
RA007	Definition der Zuverlässigkeit (Verfügbarkeit) der Maschine.	5	TAM, CAQ	x												E	EA	E					
RA008	Integration der branchenspezifischen Sicherheitsvorschriften.	5	TAM		x											E	EA	E					
RA009	Definition der Leistungsmerkmale der Maschine (Zeit-/Lebensdauerverhalten, Integrationsfähigkeit).	5	TAM	x													EA						

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information					
			Technik	VW	VV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG				
RA010	Definition der Zielkosten und -termine des Entwicklungsprojektes (Maschine oder Anlage).	1	TAM	x														A
RA011	Definition der technischen Randbedingungen für die Entwicklung wie beispielsweise Abmaße und Muster.	5	TAM	x														A
RA012	Integration von neuen Trends (z.B. ökologische, technische, Industrie 4.0) im Produktbereich.	3	TZR		x													A
RA013	Beschreibung der Anwendungsfälle (z. B. Ablaufskizzen) und Funktionalität je Detaillierungsgrad.	11	CAC, TFM	x														A
RA014	Beschreibung verschiedener Bediener-/Nutzersichten der Maschine.	5	TAM	x														A
RA015	Beschreibung von Maschinenzuständen in einem einheitlichen Format.	7	TAM		x													A
RA016	Schnittstelle zur Integration von Anforderungen in eine zentrale Datenbasis.	7	CAC, TAM		x													E EA
RA017	Verweise zwischen Anforderungen und allen Lösungen innerhalb der zentralen Datenbasis.	11	CAC, TAM		x													E EA
Anforderung strukturieren																		
RA018	Definition von MUSS-/KANN-/Soll-Anforderungen mit Kunde an die Maschine oder Anlage.	5	TAM	x														EA

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Technik	Funktionsgebiet							Information					
				VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA019	Einheitliche Strukturierung der Anforderungen für den gesamten Funktionsbaukasten und für Testprozesse.	4	TAM		x								EA			
RA020	Differenzierung zwischen funktionalen, nicht-funktionalen (Design, Kosten, etc.) Anforderungen.	5	TAM		x								EA			
RA021	Automatische Ableitung von Modellen (z. B. Systemmodelle) aus der Anforderungsspezifikation.	12	TWM			x						A	E			
Anforderung prüfen																
RA022	Prüfung und Beurteilung der Machbarkeit aller Anforderungen des Lastenheftes.	6	TAM						x					EA		
RA023	Einbindung der beteiligten Disziplinen in die Spezifikation und Prüfung der Anforderungen von Anfang an.	5	TPP					x				E	EA			
RA024	Absicherung der Anforderungen durch Diskussion mit den Fachabteilungen und formale Freigabe.	1	TAM							x			A			
RA025	Festlegen von Prüfkriterien für Anforderungen aus dem Entwicklungsheft der Maschine oder Anlage.	6	CAQ						x					EA		
RA026	Durchführung von detaillierten Machbarkeitsstudien (-versuche) für kritische Funktionalitäten.	4	CAQ						x			E	E		A	
RA027	Review der Anforderungen mit den Stakeholdern vor Abschluss des Vertrages (z. B. Genauigkeit).	1	TAM		x									EA		
RA028	Bewertung der Zusatznutzen gegenüber Konkurrenzprodukten unter Berücksichtigung von Markt/Produkt.	6	TPP, TZR			x								EA		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information			
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG	
RA029	Dokumentation der Projektentscheidung im interdisziplinären Entwicklungsteam.	6	PLM	x											A
RA030	Management von Änderungen (zum Beispiel an Anforderungen).	6	TAM		x						A				
Angebot erstellen															
RA031	Durchführung einer Risikoanalyse des Entwicklungsprojektes	6	CAQ	x							E			E	A
RA032	Aufnahme von detaillierten anwendungsspezifische Kundenanforderungen in das Vertragsdokument.	5	TAM		x						E				A
Systementwurf															
System/ Maschine spezifizieren															
RA033	Dokumentation der technischen Anforderung an die Maschine oder Anlage.	5	TAM	x									A		
RA034	Abbildung von Funktionsstrukturen (z.B. Funktionsstrukturbauum bzw. Strukturplan-Funktion).	11	TFM	x									A		
RA035	Abbildung des Gesamtsystems durch einen StrukturplanSystem (inkl. deren Abhängigkeiten).	2	CAC	x									A		
RA036	Abbildung aller wichtiger Systemeigenschaften (Geometrie, Kinematik, Steuerungsinformationen, etc.).	7	CAC	x									A		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information						
			Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG					
RA037	Abbildung des Steuerungs- und des Maschinenverhaltens und definierter Schnittstellen des Systems.	7	CAC	x													A		
RA038	Abbildung von Facetten, deren Abhängigkeiten sowie möglichen Aggregationen.	8	TFM, PLM	x													A		
RA039	Darstellung von hierarchischen Anordnung von Elementen zur Abbildung komplexer Strukturen.	7	TFM, PLM	x													A		
RA040	Erstellung des Modells der Beziehungen zwischen Baugruppen und Einzelteilen (nach Fertigungspunkten).	2	TFM, PLM		x												A		
RA041	Abbildung von Wirkprinzipien und physikalischen Effekten anhand von Katalogen.	3	CAC	x										E	EA				
RA042	Abbildung von Maschinenfunktionen und -elementen in Bibliotheken (z.B. Baukasten).	3	TFM	x														A	
RA043	Erstellung und Verwaltung einer Bibliothek von vorhandenen Fertigungs- und Montagetechnologien.	3	TWM		x									E	E	EA			
RA044	Zuordnung einzelner Funktionen zu den späteren Modulen des mechatronischen Produkts.	11	CAC, TFM		x									E	EA				
RA045	Plastische und zeitliche Darstellungen im Strukturplan-System und Strukturplan-Funktion ermöglichen.	7	CAC, TFM	x													A		
RA046	Darstellung eines Modells mit Funktionen als separate Blöcke und Verbindungen (z. B. Signalfluss).	11	TFM	x													A		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information				
			Technik	VW	VV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA047	(Automatische) Erstellung und Verwaltung einer disziplinenübergreifenden Stückliste.	12	CAC, TWM			x									A		
RA048	Spezifikation von Soll- und Fehlverhalten von Funktionen des Produktionssystems.	5	CAT	x											A		
RA049	Erstellung einer Funktionsliste auf Grundlage der Anforderungen der Maschine oder Anlage.	11	TFM	x											EA		
RA050	Umsetzung der geprüften Anforderungen in das Entwicklungsheft der Maschine oder Anlage.	6	TAM	x											A		
RA051	Erstellung des Strukturplan-System, des Strukturplan-Funktionen und der Funktionsbeschreibung.	7	CAC, TFM	x											A		
RA052	Erstellung und Verwaltung von Konzepten, Ideen und ersten Layouts der Maschine oder Anlage.	8	CAC, MCAD	x											A		
RA053	Erarbeitung von mindestens zwei Lösungsvorschlägen inkl. zeichnerischer Darstellung.	5	CAC, TFM	x											A		
RA054	Suchen bereits vorhandener Lösungsvarianten einzelner Disziplinen aus Vorgängerprojekten.	6	TWM, TPP			x									EA		
RA055	Suchen bereits vorhandener disziplinenübergreifender Lösungsvarianten anhand von Dokumentationen.	3	TWM, TPP			x									EA		
RA056	Prüfung der Wiederverwendbarkeit vorhandener Komponenten/Baussteine auf Grundlage der Anforderungen.	3	TWM, TPP			x									E		A

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information				
			Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA057	Erstellung eines Montagekonzept für die Lösungsvorschläge (Leistungsfähigkeit, Kosten) der Maschine.	7	CAP	x									E	E	EA	E	
RA058	Spezifikation der Einbauebenenheiten für Komponenten erstellen.	5	CAP	x									E	E	EA		
RA059	Verpackungs- und Installationskonzept für den Versand der Maschine erstellen.	5	CAP	x									E	E	EA	E	
RA060	Plastische Darstellungen in den Strukturplänen ermöglichen (aktueller/ zeitliche Statusinformationen).		TAM		x								E		EA		
RA061	Definition von Anforderungen an die Produktion und die Montage der Maschine oder Anlage.	5	TAM	x													
System strukturieren																	
RA062	Anlegen und Strukturieren einer Modultdatenbank (Funktionsbausteine).	7	TFM		x										A		
RA063	Zentrale Erstellung und Verwaltung eines Funktionsbaustens (Funktionsbausteine).	11	TFM		x										EA		
RA064	Plastische Darstellung der benötigten Funktionen des Maschinensystems.	11	TFM, PLM		x										EA		
RA065	Zentrale Erstellung und Verwaltung von Spezifikationen für Funktionsbausteine.	11	TFM, PLM		x										EA		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information					
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA066	Definieren der Funktionsbausteine aus Komponenten (Mechanik, Elektrik/ Elektronik, Software).	11	TFM		x								E	EA			
RA067	Verknüpfung von Dokumenten und Teillösungen der einzelnen Disziplinen.	3	PLM		x								E	EA		E	
RA068	Visualisierung der Maschine mittels verschiedener Darstellungsformen (z. B. Listen, Netzwerke).	8	PLM					x					E	EA		E	
RA069	Visualisierung von Abhängigkeiten von mechatronischen Modulen und Komponenten der Maschine.	2	CAC, TFM					x					E	EA		E	
RA070	(Teil-)automatisierte Ableitung der Stromlaufpläne aus dem Systemmodell des Produktionssystems.	12	CASE			x							A	E			
RA071	Erzeugung von abläuffähigen Steuerungscode aus dem Systemmodell (bzw. deren Simulation).	12	CASE			x							A	E			
RA072	Verwaltung der Randbedingungen der Komponenten oder Module (Teilautomatische Suche und Vergleich).	12	PLM	x										EA			
RA073	Suchen bereits vorhandener disziplinenübergreifender Lösungsvarianten in den Datenbanken.	3	CAC, TWM		x								E	EA			
Systementwurf prüfen																	
RA074	Abstimmung verschiedener Lösungsansätze des Produktes disziplinenübergreifend.	1	TPP										x	E	E		A
RA075	Bewertung und Priorisierung aller Lösungsvarianten und Auswahl nach eindeutigen Entscheidungskriterien.	5	CAC	x										E			A

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information				
		MH	Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA076	Absicherung kritischer Funktionalitäten durch Tests (Machbarkeitsnachweis).	4	CAA					x					E	E		A
RA077	Prüfung der Konsistenz zwischen Anforderungen und Lösungen.	6	TAM, CAC					x						EA		
RA078	Benutzerfreundlichkeit (Wartbarkeit, Umstellbarkeit) bei der Konzeptauswahl berücksichtigen.	5	CAC					x						EA		
RA079	Freigabe der Lösungsspezifikation durch den Kunden/Auftraggeber.	1	TEK									x		E		EA
RA080	Gemeinsames Verständnis für die gewählte technischen Lösung mit dem Kunden schaffen.	1	CAC									x		E		EA
RA081	Abfragen der technologischen Erfahrungen des Kunden und Suche nach Einsparpotenzialen.	3	TEK, TWM									x		A		E
RA082	Prüfung des erarbeiteten Lösungsspezifikation mit dem Kunden (Design Reviews).	6	TPM									x		A		E
RA083	Durchführung von FMEA für Elemente der zentralen Datenbasis.	6	CAQ					x						E		A
Schnittstellen spezifizieren																
RA084	Spezifikation der Schnittstellen zwischen den Funktionen sowie der Umgebung und dem Maschinensystem.	11	TFM	x												EA

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information				
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA085	Spezifikation von Benutzerschnittstellen und Bedienungsabläufen der Maschine.	7	TAM	x									EA	E		
RA086	Spezifikation von Service- und Diagnose-Schnittstellen und Sicherheitskreisen (-richtlinien).	7	TAM	x									A		E	
RA087	Zusammenspiel des Produktionssystems mit weiteren Umgebungssystemen.	2	CAC, TFM		x									EA	E	
RA088	Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Elementen des Produktionssystems untereinander.	2	CAC, TFM		x									EA		
RA089	Definition von Ein-/Ausgangsverhalten, Signalleitungen des Produktionssystems.	2	ECAD	x									A	E	E	
Schnittstellen prüfen																
RA090	Prüfung der Schnittstellen zu externen Systemen des Kunden.	7	CAA								x		EA	E	E	
RA091	Prüfung der Schnittstellen hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen, des interne Standards und Sicherheit.	6	CAA								x		EA	E		
Qualitätsmanagement																
Test/Prüfung planen und durchführen																
RA092	Definition von Testfällen auf Grundlage von funktionalen Anforderungen.	4	CAT	x										E		A

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information				
		MH	Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA093	Definition, ob ein Test der Anforderungen durchgeführt werden kann.	4	CAQ	x									E			A
RA094	Berücksichtigung von Erfahrungswissen (z. B. Störignale) bei der Auswahl von Testfällen.	3	TPP		x											A
RA095	Verwendung von kontinuierlichen Testphasen und Überprüfung der Testkriterien (Qualitätssicherung).	4	CAT		x											A
RA096	Erstellen von Prüfplänen für System- und Integrationstests.	6	CAQ	x									E			A
RA097	Planung von Risikoanalysen anhand der Maschinenrichtlinie.	6	TAM	x												A
RA098	Definition von Testfällen zur mechatronischen Integration (Schnittstellen zwischen den Disziplinen).	4	CAT	x									E			A
RA099	Definition von unterschiedlichen Testarten und Priorisierung der Testfälle.	4	CAT	x												EA
RA100	Definition von projektübergreifenden und disziplinenübergreifenden Teststrategien (z. B. Integrationstests).	3	CAT	x												A
RA101	Definition von Testumgebungen für die Testphasen (Komponenten-, Modul-, Systemtest).	4	CAT	x												A
RA102	Systematische Durchführung von disziplinübergreifenden Reviews.	1	PLM											x		A

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Technik	Funktionsgebiet							Information					
				VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA111	Festlegung der zu integrierenden Komponenten und Funktionsbausteine.	7	CAC	x									E			A
RA112	(Teil-)automatisierte Erstellung von Testbeschreibungen (z. B. Regressionstest).	12	CAT, CAQ			x										EA
RA113	(Teil-)automatisierte Ableitung der Modellparameter für die Simulation.	12	CAT, CAQ			x							E			EA
Abnahme durchführen																
RA114	Validierung der Kriterien (Testergebnisse, Risikoanalysen) und Dokumentation der Ergebnisse.	6	CAT						x							EA
RA115	Erstellung eines Abnahmeprotokolls (inkl. Verantwortungen und offenen Diskussionspunkten).	6	PLM								x		E	E	E	A
Systemrealisierung																
Software entwerfen																
RA116	Erstellen von statischen Software-Strukturen (z. B. Klassen-/Komponentendiagramme).	7	CASE	x										A		
RA117	Erstellen dynamischer Software-Strukturen (Ablauf-, Fluss-, Zustandsübergangsdiagramme).	7	CASE	x										A		
RA118	Spezifikation und Implementierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI).	5	CASE	x										A		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information					
		MH	Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA119	Spezifikation und Implementierung der PLC Ablaufsteuerung und Hardware-Konfiguration.	5	CASE, ECAD	x										A			
RA120	Schnittstelle zur Integration von SPS Quellcode in eine zentrale Datenbasis.	2	CACE, CASE	x										A			
RA121	Spezifikation und Implementierung der NC-Software.	5	CASE, ECAD	x										A			
RA122	Simulation der NC-Abläufe (virtuelle NC) auf Grundlage von 3D-Modellen.	10	CAA							x				EA	E		
RA123	Schnittstelle zur Integration von NC Quellcode in eine zentrale Datenbasis.	2	TAM, TPP		x									EA	E		
RA124	Schnittstelle zur Integration von Quellcode verschiedener Programmiersprachen in eine zentrale Datenbasis.	2	TAM, TPP		x									EA	E		
RA125	Möglichkeit zur Durchführung von SIL/HIL Tests auf Grundlage der zentralen Datenbasis.	10	CAA											A			
RA126	Spezifikation von Schnittstellen der beteiligten Software-Komponenten.	2	TAM	x										EA	E		
RA127	Spezifikation einer Installationsstrategie für Software-Komponenten.	5	TAM	x										E		EA	
RA128	Definition und Integration von Entwicklungsumgebungen für Software-Komponenten.	5	CACE, CASE	x										EA			

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet								Information					
			Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA129	Möglichkeit zur Dokumentation aller Code-Teile.	6	CAGE, CASE		x								EA			
Elektrik/Elektronik entwerfen																
RA130	Erstellung eines Entwurfs unter Berücksichtigung von Richtlinien für Schaltschrank (z. B. Anschlussleistung).	6	MCAD, ECAD	x												
RA131	Integration der Module und Komponenten aus den ECAD-Modellen in die mechanische Stückliste.	3	MCAD		x								EA	E		
RA132	Definition von die Schnittstellen und Abhängigkeiten zu weiteren Systemeinheiten/ -komponenten.	3	TFM	x									E	EA		
RA133	Integration von Aufbau- und Kabelpläne der elektrischen Komponenten in die Stückliste.	2	MCAD		x								E	EA		
RA134	Festlegung der Sensorik/ Aktorik nach Vorgaben (z. B. Sensor-Aktor-Liste) und Nachbildung der Geometrie.	5	MCAD, ECAD	x									EA	E		
RA135	Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten (elektrische Sicherheit, Eigensicherheit, Notabschaltung).	6	TFM		x								A			
RA136	Prüfung der Integrationsfähigkeit der spezifizierten Elektrik/ Elektronik in die mechanische Grundstruktur.	6	CAA							x			EA	E		
RA137	Analyse des Zeitverhaltens des Gesamtsystems (Performance, Zykluszeit).	5	CASE	x									A			

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information				
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG		
RA138	Prüfung der Eignung der spezifizierten Elektrik/Elektronik als Plattform für die Software.	4	CAT	x									EA	E		
RA139	Ableitung von Elektrik-/Elektronik-Spezifikationen aus den Systemspezifikationen.	12	TFM		x								A	E		
RA140	Freigabe der Dokumente zur Spezifikation der Elektrik/Elektronik.	3	PLM						x				E			A
RA141	Prüfung und Zuordnung aller Elektrik-/Elektronik-Anforderungen spezifizierten Komponenten.	6	TFM		x								EA	E		
RA142	Erstellung von Sensor-Aktor-Listen auf Grundlage der MCAD und ECAD Datenbasis.	6	MCAD, ECAD	x									EA	E		
RA143	Prüfung von elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und zum Klimabereich (Temperatur/Luftfeuchte).	6	CAE	x									E			A
RA144	Berücksichtigung der Anforderungen an die Verfügbarkeit des Produkts beim Elektrik/Elektronik-Entwurf.	2	TAM		x								EA	E		
RA145	Schnittstelle zur Integration von ECAD-Daten und Modellen in eine zentrale Datenbasis.	11	ECAD, PLM		x								E	A		
Mechanik entwerfen																
RA146	Festlegung von Konstruktionszeichnungen, CAD, Stückliste, Fluidplan, Pneumatikplan, Sensor-/Aktorliste.	5	MCAD, PLM	x									A			
RA147	Spezifikation von Norm-, Kauf- und Fertigungsteilen der Maschine oder Anlage.	5	MCAD	x									A			

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information				
			Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA148	Festlegung der Kopplung zwischen Werkzeugen, z. B. CAD/CAM.	2	CAP	x										E	A		
RA149	Installation, Einstellung und Kalibrierung der Maschinen oder Anlage.	1	CAP	x										A			
RA150	Festlegung der Schnittstellen und der Bauteil-Struktur, besonders zwischen Mechanik und Elektrik/ Elektronik.	2	TFM, CAP	x										A			
RA151	Ableiten der Mechanik-Spezifikationen aus der Systemspezifikation der Maschine oder Anlage.	12	CAC, TFM				x							A	E		
RA152	Spezifikation der Mechanik-Anforderungen von disziplinspezifischen Komponenten.	5	CAC, TFM	x										A			
RA153	Schnittstelle zur Integration von MCAD Daten und Modellen in eine zentrale Datenbasis.	3	CAC, MCAD	x										E	A		
RA154	Aufwandsarme Erstellung von Mechanik Simulationen auf Grundlage einer zentralen Datenbasis.	12	CAA, MCAD				x							E			A
RA155	Kontinuierliche Verfeinerung von Mechanik Simulationen auf Grundlage aktueller ECAD und MCAD Daten.	10	CAA, MCAD				x							E	E		A
RA156	Integration von variablen und disziplinübergreifenden Parametern in der MCAD und E/FCAD Konstruktion.	2	MCAD			x								A	E		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information			
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG	
System realisieren															
RA157	Sicherheitsrichtlinien bei der Auswahl der Lösungsalternativen beachten.	3	CAA, MCAD		x								A		
RA158	Definition von Design Richtlinien für Software-, Elektrik-, Elektronik- und Mechanik-Komponenten.	1	CAC, TAM	x									A		
RA159	Definition der Schnittstellen von Modulen und Komponenten der Maschine oder Anlage.	7	CAC, TAM	x									A		
RA160	Spezifikation und Bewertung von Lösungsvarianten hinsichtlich der Projektziele (inkl. Budget).	5	CAC	x									A		
Projektplanung															
Ablauf planen															
RA161	Erstellen eines Projektplans mit Arbeitspaketen und Meilensteinen und Visualisierung der kritischen Pfade.	1	TPM	x										A	
RA162	Definition von Visualisierungstechniken für den Ablauf des Projektes z.B.: ScrumBurndownChart.	1	TPM	x										A	
RA163	Definition von Arbeitspaketen gleichen Aufwandes bzw. gleicher Dauer für das Entwicklungsprojekt.	2	TPM	x										A	
RA164	Definition von Meilensteinen mit erforderlichen Ergebnissen und Dokumenten anhand von Vorlagen.	3	TPM		x									A	

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information						
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG				
RA175	Abschätzung des Kostenprofils für die wesentlichen Funktionen der Maschine oder Anlage.	6	TPM	x														A
RA176	Festlegung und Berücksichtigung der Zuschläge für Qualitätsmaßnahmen (z. B. FMEA).	6	TPM	x														A
RA177	Interne Kostenverrechnung anhand der Arbeitspakete (Kostenarten/ -stellen) vornehmen.	6	TPM	x														A
Ressourcen planen																		
RA178	Festlegung der Rollen (z.B. Projektleiter, Entwickler) und Zuordnung von Personen zu Rollen.	2	TPM							x								A
RA179	Zuordnung zwischen Personal/ Qualifikation und Projektplanung (pro Arbeitspaket).	2	TPM							x								EA
RA180	Ressourcenplanung unter Berücksichtigung von Verfügbarkeiten (z. B. von Verantwortlichen).	2	TPM							x								EA
RA181	Verfügbarkeitsprüfung von Ressourcen in Abhängigkeit von Terminen und Grundlast.	2	TPM	x														EA
RA182	Prüfen der Verfügbarkeit der Produktionskapazitäten in Abhängigkeit der Terminplanung.	2	TPM	x														EA
RA183	Ressourcenplanung und Verfügbarkeitsprüfung pro Arbeitspaket unter Berücksichtigung der Erfahrungsdaten.	2	TPM													x		EA

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information					
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA194	Definition eines internen Berichtswesen (Ampel-Status des Projektes, Eskalationsstufen)	3	TPM	x													A
RA195	Bestimmung eines standardisierten Vorgehens zur Projekt- / Auftragsdurchführung.	9	TPM			x											A
RA196	Grobe Beschreibung (z. B. Voraussetzungen) und Definition der Projektart auf Grundlage der Entwicklung.	9	TPM	x													A
RA197	Definition eines Projektkoordinatensystems (System-Bild, Strukturplan-System, Strukturplan-Funktionen).	7	TPM	x													A
RA198	Definition und Festlegung eines Ablaufes für Änderungsanforderungen.	6	TPM	x													A
RA199	Überprüfung des Projektplanes auf Vollständigkeit und Konsistenz.	3	TPM			x											EA
RA200	Abstimmung des Berichtswesens mit dem Kunden, um möglichen Änderungen vorzubeugen.	1	TPM						x								EA
RA201	Abstimmung des Projektplans mit dem Projektteam, um eine gemeinschaftliche Entwicklung vorzunehmen.	1	TPM							x							EA
Projektverfolgung																	
Projektfortschritt verfolgen																	
RA202	Verwendung und regelmäßige Aktualisierung eines Projektplans für die Besprechungen und Terminkontrollen.	6	TPM											x			EA

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information					
			Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG				
RA213	Visualisierung von Abweichungen gegenüber dem Resourcenplan.	6	TPM								x							A
RA214	Planung und Vorbereitung von Reviews (inkl. Teilnehmerlisten) bei Überschreitung des Zielbereichs.	1	TPM								x							A
RA215	Status des Erfüllungsgrades der Anforderungen der Module und des Gesamtsystems prüfen.	6	TAM								x			EA				
RA216	Anwendung eines System-Bildes zur Fortschrittskontrolle (Status Anforderungen, Umsetzung, Test).	7	CAC			x								EA				
RA217	Anwendung eines Strukturplans-System zur Fortschrittskontrolle (Status Umsetzung, Test).	7	CAC			x								EA				
RA218	Anwendung eines Strukturplans-Funktionen zur Fortschrittskontrolle (Status Umsetzung, Test).	7	CAC			x								EA				
Offene Punkte und Änderungen verwalten																		
RA219	Identifikation von offenen Punkten sowie Änderungen, die mit dem Kunden geklärt werden müssen.	6	TAM								x			EA				
RA220	Information des Kunden und aller beteiligten Disziplinen über notwendige Änderungen.	1	TAM								x							A
RA221	Bewertung der Auswirkungen einer Änderung und Ableitung der Maßnahmen (z. B. Dringlichkeit).	6	TAM				x							EA				

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	MH	Funktionsgebiet										Information				
			Technik	VW	WV	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA222	Regelmäßige Erfassung des Status von Änderungsanforderungen und Verwaltung der Abwicklung.	6	TAM	x										EA			
RA223	Überführung der Änderungsanforderungen in Verkaufsträger/Lastenhefte.	12	TAM			x								E	A		
RA224	Prüfung der Auswirkungen von geänderten Dokumenten und Teillösungen zwischen den einzelnen Disziplinen.	9	TAM			x								EA			
Prozesse verbessern																	
RA225	Disziplinübergreifender Austausch der Review-Erkenntnisse.	1	TPM										x				A
RA226	Integrieren von erfolgreich etablierten Abläufen und Werkzeugen in die Projekt- / Auftragsorganisation.	3	TWM			x									A		
RA227	Identifikation von Abweichungen gegenüber der definierten Projekt- / Auftragsorganisation.	6	TPM			x											A
RA228	Dokumentation von Störungen, die während des Reviews oder Tests aufgetreten sind.	3	CAT, CAQ			x											A
RA229	Ableiten von Schulungsbedarfen aus Projekten und Erstellung von Aus- bzw. Weiterbildungsplänen.	12	CAQ					x									A
RA230	Selbstständiges Einbringen von Verbesserungsvorschlägen durch die Mitarbeiter (KVP).	2	TPP										x				A

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information			
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG	
Konfigurationsmanagement															
Baukasten verwalten															
RA231	Definition von Standard Funktionsbausteinen innerhalb eines Systembaukastens.	9	TFM		x								EA		
RA232	Systematische Untersuchung von Technologien zur Verwendung innerhalb der Funktionsbausteine.	5	TFM		x								EA		
RA233	Gremium zur Definition von zu verwendenden standardisierten Funktionsbausteinen.	9	TFM					x					EA		
RA234	Darstellung der Auswirkung einer Veränderung auf weitere standardisierte Funktionsbausteine.	9	TFM			x							EA		
RA235	Konfigurator zur Auswahl von Funktionsbausteinen zur Realisierung eines Produkts/einer Maschine.	9	TFM			x							EA		
RA236	Versionierung des aktuellen Baukastens sowie der Versionen aller Funktionsbausteine.	9	TFM	x									EA		
RA237	Eindeutige Bezeichnung aller Elemente innerhalb des Systembaukastens.	9	CAC	x									EA		
RA238	Hierarchische Struktur des Systembaukastens (Funktionseinheiten/-bausteine).	7	CAC	x									EA		
RA239	Standardisierte Spezifikation für jedes Element des Systembaukastens (Struktur, Leistungsklassen).	9	CAC		x								EA		

Tabelle A.2: Referenzmodell digitaler Werkzeuglandschaften

no.	Referenzanforderung	Funktionsgebiet										Information					
		MH	Technik	VW	VW	AT	RV	VF	KK	DS	ID	IB	ST	OG			
RA240	Standardisierte Spezifikation der Schnittstellen aller Elemente des Systembaukastens.	9	CAC		x									EA			
RA241	Definition einer standardisierten Software-Hardware-Architektur.	9	CASE		x								E	EA			
RA242	Standardisierte Test-Spezifikation (z. B. Test-Checklisten) für alle Funktionsbausteine.	9	CAE		x									EA	E	E	E
RA243	Wiederverwendbarkeit/ Erweiterbarkeit/ Konfiguration des Funktionsbaukastens.	3	TFM		x									EA			
Produkte/Aufträge verwalten																	
RA244	Dokumentation für jedes Produkt/jeden Auftrag, welche Elemente des Systembaukastens verwendet wurde.	3	TFM		x									E	EA		
RA245	Darstellung des Status einer Funktionsbausteine: Standard (grün), Option(gelb), Sonderentwicklung (rot).	6	TFM		x									E	EA		
RA246	Dokumentation für jeden Auftrag, welchen Status (grün, gelb, rot) die Funktionsbausteine aufweisen.	6	TFM		x									E	EA		
Varianten/Versionen verwalten																	
RA247	Verwaltung von Versionen und Varianten von Dokumenten der beteiligten Disziplinen.	9	TFM		x									E	EA		
RA248	Disziplinübergreifende Verwaltung von Versionen und Varianten von Dokumenten.	9	TFM		x									E	EA		

A.3 Anpassungsmatrix an die Entwicklungssituation

Tabelle A.3: Anpassungsmatrix

no.	Merkmal	Ausprägung	Prozessgebiet						Aktivsumme	
			Anforderungsmanagement (AM)	Konfigurationsmanagement (KM)	Systementwurf (SE)	Qualitätsmanagement (QM)	Systemrealisierung (SR)	Projektplanung (PP)		Projektverfolgung (PV)
1 Kernkompetenz										
		Mechanik	1	1	1	1	1	0	0	5
		Elektrik/ Elektronik	1	1	1	1	1	0	0	5
		Software	2	2	2	2	1	0	1	10
2 Unternehmensgröße [Anzahl Beschäftigte]										
		<50	1	1	0	0	0	0	0	2
		50-99	1	1	0	1	0	0	0	3
		100-249	2	2	1	1	0	1	1	8
		250-999	3	2	1	2	0	1	1	10
		>999	3	2	1	2	0	1	1	10
3 Entwicklungsstandorte [Anzahl]										
		1	0	0	0	0	0	0	0	0
		2-3	1	1	1	1	0	0	1	5
		>3	3	2	2	2	0	2	3	14
4 Entwicklungsaufgabe										
		Neuentwicklung	3	1	3	3	3	2	3	18
		Anpassungsentwicklung	2	2	3	2	2	1	2	14
		Variantenentwicklung	1	2	2	2	2	1	2	12

A.3 Anpassungsmatrix an die Entwicklungssituation

Tabelle A.3: Anpassungsmatrix

no.	Merkmal	Ausprägung	Prozessgebiet						Aktivsumme	
			Anforderungsmanagement (AM)	Konfigurationsmanagement (KM)	Systementwurf (SE)	Qualitätsmanagement (QM)	Systemrealisierung (SR)	Projektplanung (PP)		Projektverfolgung (PV)
5 Änderungseinflüsse										
		hoch	3	3	2	2	0	1	2	13
		mittel	2	2	1	1	0	1	1	8
		gering	1	1	0	0	0	2	0	4
6 Art der Variantenbildung										
		Baureihe	1	1	2	1	2	2	0	9
		Baukastensystem	1	2	3	1	3	2	0	12
		Plattform	1	2	2	1	1	2	0	9
7 Mechanik-Entwickler [Anzahl]										
		<6	0	0	0	0	0	0	0	0
		6-10	1	1	1	1	0	1	1	6
		>10	2	2	2	2	0	2	2	12
8 Elektrik/ Elektronik-Entwickler [Anzahl]										
		<6	0	0	0	0	0	0	0	0
		6-10	1	1	1	1	0	1	1	6
		>10	2	2	2	2	0	2	2	12
9 Software-Entwickler [Anzahl]										
		<6	0	0	1	1	0	0	0	2
		6-10	1	1	2	2	0	1	1	8
		>10	2	2	3	3	0	2	2	14
Passivsumme			42	40	40	38	16	28	27	

Literaturverzeichnis

[ABELE & REINHART 2011]

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser Verlag 2011.

[ABELN 1997]

Abeln, O.: Innovationspotentiale in der Produktentwicklung: Das CAD-Referenzmodell in der Praxis. Stuttgart: Teubner Verlag 1997.

[ABRAMOVICI 2005]

Abramovici, M.: PLM: Kern künftiger Unternehmensstrategien: Engineering-Prozesse auf dem Prüfstand. Intelligenter produzieren 2005 (2005) 2, S. 6–9.

[ABRAMOVICI 2013]

Abramovici, M.: IT-Systeme zur virtuellen Produktentwicklung: Manuskript Teil 2. Bochum: Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik der Ruhr-Universität Bochum 2013.

[ABRAMOVICI ET AL. 2015]

Abramovici, M.; Göbel, J.; Neges, M.: Smart Engineering as Enabler for the 4th Industrial Revolution. In: Fathi, M. (Hrsg.): Integrated Systems: Innovations and Applications. Springer International Publishing 2015, S. 163–170.

[ALBERS ET AL. 2012]

Albers, A.; Sauer, B.; Steinhilper, W.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1: Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 8. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2012.

[ALPAR ET AL. 2000]

Alpar, P.; Grob, H.; Weimann, P.; Winter, R.: Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik: Eine Einführung in die strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informations- und Kommunikationssystemen. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag 2000.

[ANDERL 2007]

Anderl, R.: Vorlesungsskript Virtuelle Produktentwicklung. Darmstadt: Lehrstuhl für Datenverarbeitung in der Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt 2007.

[ANDERL 2012]

Anderl, R.: Smart Engineering: Interdisziplinäre Produktentstehung. Acatech diskussion Auflage. Berlin: Springer Verlag 2012.

[ANDERL & TRIPPNER 2000]

Anderl, R.; Trippner, D. (Hrsg.): STandard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag 2000.

[ANDERL ET AL. 2000]

Anderl, R.; Beuthel, R.; Gogoll, A.; Awiszus, B.: Die Schmiedeprozesskette: Analyse ihrer Abbildungsmöglichkeiten in der ISO 10303. Produkt-Daten Journal (2000) 2, S. 33–37.

[ANDERL ET AL. 2013]

Anderl, R.; John, H.; Trippner, D.; Arlt, M.; Endres, M.; Katzenmaier, J.; Philipp, M.; Pütter, C.; Angebrandt, A.; Axtner, H.: STandard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag 2013.

[ANDREASEN & HEIN 2000]

Andreasen, M. M.; Hein, L.: Integrated Product Development. Michigan (USA): Springer Verlag 2000.

[AREND ET AL. 2013]

Arend, U.; Eberleh, E.; Pitschke, K.: Software-Ergonomie '99: Design von Informationswelten. Stuttgart und Leipzig: Vieweg und Teubner Verlag 2013.

[ARMAN ET AL. 2006]

Arman, H.; Hodgson, A.; Gindy, N.: Threat and Opportunity Analysis in Technological Development. In: Technology Management for the Global Future (PICMET), Portland (USA) 2006, Band 1. S. 9–17.

[ARNAUD & BARNES 2006]

Arnaud, R.; Barnes, M. C.: COLLADA: Sailing the gulf of 3D digital content creation. Wellesley (USA): Peters, A. K. 2006.

[ARNOLD ET AL. 2011]

Arnold, V.; Dettmering, H.; Engel, T.; Karcher, A.: Product Lifecycle Management beherrschen: Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand. Dordrecht: Springer Verlag 2011.

[AUERHAMMER 2014]

Auerhammer, S.: Vergleich und Beurteilung verschiedener CASE-Tools für den Einsatz im konzeptionellen Datenbankentwurf. München: Fachbereich Informatik der Technischen Universität München 2014.

[AUSLANDER 1996]

Auslander, D. M.: What is mechatronics? IEEE/ASME Transactions on Mechatronics of Dynamic Systems and Control Division 1 (1996) 1, S. 5–9.

[BABER 2003]

Baber, C.: Cognition and tool use: Forms of engagement in human and animal use of tools. London (UK) und New York (USA): Taylor and Francis 2003.

[BADERTSCHER & SCHEURING 2006]

Badertscher, K.; Scheuring, J.: Wirtschaftsinformatik Grundlagen: Informations- und Kommunikationssysteme gestalten: Grundlagen mit zahlreichen Illustrationen, Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten. Compendio Bildungsmedien 2006.

[BADKE-SCHAUB & FRANKENBERGER 2004]

Badke-Schaub, P.; Frankenberger, E.: Design Representations in Critical Situations of Product Development. In: Goldschmidt, G.; Porter, W. L. (Hrsg.): Design Representation. London: Springer Verlag 2004, S. 105–126.

[BAJAJ ET AL. 2011]

Bajaj, M.; Zwemer, D.; Peak, R.; Phung, A.; Scott, A.; Wilson, M.: Satellites to Supply Chains, Energy to Finance — SLIM for Model-Based Systems Engineering. In: INCOSE International Symposium, Denver (USA) 2011, Band 21. S. 368–394.

[BANNERT 2008]

Bannert, M.: Ein Verfahren zur Verbesserung der Innovativität von Unternehmen auf der Grundlage des komplexen Problemlösens, Band 474. Stuttgart: Jost-Jetter-Verlag (Dissertation) 2008.

[BEANEY 2015]

Beaney, M.: Analysis. 2015, <http://plato.stanford.edu/entries/analysis/>, zugegriffen am 07.08.2015.

[BELLALOUNA 2009]

Bellalouna, F.: Integrationsplattform für eine interdisziplinäre Entwicklung mechatronischer Produkte. Dissertation, Ruhr-Universität-Bochum, Aachen and Bochum, 2009.

[BENDER 2005]

Bender, K.: Embedded Systems: Qualitätsorientierte Entwicklung. Berlin: Springer Verlag 2005.

[BENDER ET AL. 2006]

Bender, K.; Stetter, R.; Rhöse, F.; Kausler, B.; Danzer, B.; Herp, A.; Oberender, U.; Hofmann, R.; Bockermann, U.; Röcker, J.; Kollmannsberger, O.; Hämmerl, R.; Kopp, W.; Jacksch, R.; Witzel, O.: Leitfaden Softwarequalitätssicherung. Frankfurt am Main: VDMA Verlag 2006.

[BERNROIDER & KOCH 2003]

Bernroider, E.; Koch, S.: ERP-Implementierung: Big Bang vs. Stufenweiser Einführung von ERP-Systemen. Wien (Österreich): Wirtschaftsuniversität Wien 2003.

[BIERSCHENK ET AL. 2005]

Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.; Ritter, A.: Stand der digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen: Auswertung einer Breitenbefragung. Stuttgart: Verlag des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) 2005.

[BIFFL ET AL. 2013]

Biffel, S.; Lüder, A.; Petzold, T.; Schmidt, N.; Steininger, H.: Anforderungen an Engineeringketten. Fertigungs- und Maschinenautomation 2013 (2013) 9, S. 18–22.

[BING 2001]

Bing, T.: Zeitduplexbasierte Mobilkommunikation, untersucht am Beispiel eines TD-CDMA-Mobilfunksystems, Forschungsberichte Mobilkommunikation, Band 8. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2001.

[BIRKHOFFER & LINDEMANN 1999]

Birkhofer, H.; Lindemann, U.: Empirical Design Research - what we know and what we want to know. In: Mortensen, N. H.; Sigurjonsson, J.; Norwegian Research Council. P2005 Research Program (Hrsg.): Critical Enthusiasm: Contributions to Design Science. Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet 1999.

[BIRKHOFER ET AL. 2001]

Birkhofer, H.; Lindemann, U.; Albers, A.; Meier, M.: Product Development as a Structured and interactive Network of Knowledge: a revolutionary Approach. Design Application in Industry and Education (2001), S. 457–464.

[BIRKHOFER ET AL. 2005]

Birkhofer, H.; Jänsch, J.; Kloberdanz, H.: An extensive and detailed View of the Application of Design Methods and Methodology in Industry. The 15th International Conference on Engineering Design: Engineering Design and the Global Economy (2005).

[BIRNBAUM 2004]

Birnbaum, M.: Essential Electronic Design Automation (EDA). Prentice Hall Modern Semiconductor Design Series. Prentice Hall Professional 2004.

[BIT 2005]

BIT: V-Modell-XT Bund, Band 2005. Bundesregierung für Informationstechnik (BIT) 2005, http://download.gsb.bund.de/BIT/V-Modell_XT_Bund/V-Modell-XT-Bund-Gesamt.pdf, zugegriffen am 10.06.2015.

[BLAU ET AL. 2007]

Blau, H.; Eicker, S.; Hofmann, A.; Spies, T.: Reifegradüberwachung von Software. Essen: ICB Research Reports 2007.

[BN 2014]

BN: Hinterer Bayerischer Wald, 2014, <http://www.bfn.de/>, zugegriffen am 20.07.2016.

[BÖHM & FUCHS 2002]

Böhm, R.; Fuchs, E.: System-Entwicklung in der Wirtschaftsinformatik. Zürich (Schweiz): Hochschulverlag der ETH Zürich 2002.

[BÖRNER ET AL. 2012]

Börner, K.; Boyack, K. W.; Milojevic, S.; Morris, S.: An Introduction to Modeling Science: basic Model Types Key Definitions and a general Framework for the Comparison of Process Models. In: Scharnhorst, A.; Börner, K.; van Besselaar, P. (Hrsg.): Models of Science Dynamics. Berlin und New York (USA): Springer Verlag 2012, Springer Complexity.

[BRACHT ET AL. 2011]

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele. Berlin und New York (USA): Springer Verlag 2011.

[BRASAT 2012]

Brasat, N.: Internes Benchmarking in Handelsunternehmen als Basis wertorientierter Unternehmensführung (Schriften zum Management), Band 36. München und Mering: Rainer Hampp Verlag 2012.

[BRAUN 2005]

Braun, T. E.: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. 1. Auflage. München: Dissertation der Technischen Universität München (Dr. Hut Verlag) 2005.

[BREUSTE & KEIDEL 2008]

Breuste, J.; Keidel, T.: Urbane und suburbane Räume als Kulturlandschaften: Planerische Gestaltungsaufgaben. Informationen zur Raumentwicklung 2008 (2008) 5.

[BROCKE & GROB 2003]

Brocke, J. V.; Grob, H. L.: Referenzmodellierung: Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen (Advances in Information Systems and Management Science), Band 4. Berlin: Logos Verlag 2003.

[BROUSSEAU ET AL. 2009]

Brousseau, E. B.; Barton, R.; Dimov, S.; Bigot, S.: Technology Maturity Assessment of micro and nano Manufacturing Processes (2009).

[BROY & RAUSCH 2005]

Broy, M.; Rausch, A.: Das neue V-Modell XT. Informatik-Spektrum 28 (2005) 3, S. 220–229.

[BROY ET AL. 2010]

Broy, M.; Feilkas, M.; Herrmannsdoerfer, M.; Merenda, S.; Ratiu, D.: Seamless Model-Based Development: From Isolated Tools to integrated Model Engineering Environments. Proceedings of IEEE 98 (2010) 4, S. 526–545.

[BRUNS 2013]

Bruns, M.: Systemtechnik: Ingenieurwissenschaftliche Methodik zur interdisziplinären Systementwicklung. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2013.

[BUCHER ET AL. 2006]

Bucher, T.; Fischer, R.; Kurpjuweit, S.; Winter, R.: Analysis and Application Scenarios of Enterprise Architecture: An Exploratory Study. In: Proceedings of the Workshop in Enterprise Architecture Research (10th IEEE International Conference Enterprise Distribution Object Computing), Los Alamitos (USA) 2006. S. 28.

[BUCKL ET AL. 2008]

Buckl, S.; Ernst, A. M.; Lankes, J.; Matthes, F.; Schweda, C. M.: Enterprise Architecture Management Patterns – Exemplifying the Approach. In: 12th IEEE International Conference Enterprise Distribution Object Computing, München 2008. S. 393–402.

[BUCKL ET AL. 2009]

Buckl, S.; Ernst, A.; Matthes, F.; Schweda, C.: An Information Model for Landscape Management – Discussing Temporality Aspects. In: Feuerlicht, G.; Lamersdorf, W. (Hrsg.): Service-Oriented Computing – ICSSOC Workshops. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2009, Lecture Notes in Computer Science, Band 5472, S. 363–374.

[BULLINGER 2008]

Bullinger, H.: Fokus Technologie: Chancen erkennen – Leistungen entwickeln. München: Hanser Verlag 2008.

[BULLINGER ET AL. 2009]

Bullinger, H.; Spath, D.; Warnecke, H.; Westkämper, E.: Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2009.

[CAMP 1994]

Camp, R. C.: Benchmarking: The Search for Industry Best Practices that Lead to Superior Performance. München: Hanser Fachbuchverlag 1994.

[CHAN & LEUNG 1996]

Chan, L. W.; Leung, T. P.: Spiral Design Model for Consumer Mechatronic Products. In: IFAC (Hrsg.): Mechatronics. Oxford (UK): Pergamon Press 1996, S. 35–51.

[CHROUST 1992]

Chroust, G.: Modelle der Software-Entwicklung. München: Oldenbourg Verlag 1992.

[COLEMAN 2010]

Coleman, J. S.: Grundlagen der Sozialtheorie. Handlungen und Handlungssysteme. München: Oldenbourg Verlag 2010.

[DEMERS 2000]

Demers, M.: Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, 2000.

[DERN 2006]

Dern, G.: Management von IT-Architekturen. Leitlinie für die Ausrichtung, Planung und Gestaltung von Informationssystemen., Band 3. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2006.

[DEUSE ET AL. 2006]

Deuse, J.; Petzelt, D.; Sackermann, R.: IT-Industrielle Informationstechnik – Digitale Modellierung - Modellbildung im Industrial Engineering. Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 1-2, S. 66–69.

[DIEHL 2013]

Diehl, H. J.: Marketing für betriebswirtschaftliche Standardanwendungssoftware: Bewältigung von Unsicherheit und Spezifität im Systemgeschäft. Business-to-Business-Marketing. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2013.

[DIETRICH & SCHIRRA 2006]

Dietrich, L.; Schirra, W.: Innovationen durch IT: Erfolgsbeispiele aus der Praxis. Expert Press Series. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2006.

[DIN 2005]

DIN: Qualitätsmanagementsysteme: Grundlagen und Begriffe (DIN EN ISO 9000). 2005. Auflage. Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN) 2005.

[DIN 2010]

DIN: Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik - Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilddarstellung und CAE-Systeme. DIN EN (IEC) 62424. Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN) 2010.

[DOHMEN 2002]

Dohmen, W.: Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme. Dissertation, iwv der Technischen Universität München, München, 2002.

[DOMBROWSKI & TIEDEMANN 2005]

Dombrowski, U.; Tiedemann, H.: Die richtigen Fabrikplanungswerkzeuge auswählen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 2005 (2005) 100, S. 136–140.

[DONGES ET AL. 1999]

Donges, C.; Krastel, M.; Anderl, R.: MechaSTEP – STEP Datenmodelle zur Abbildung mechatronischer Systeme. Product Data Journal (1999) 5, S. 30–34.

[DÖRNER 1998]

Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1998.

[DRATH 2010]

Drath, R.: Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2010.

[DRATH & BARTH 2013]

Drath, R.; Barth, M.: Wie der Umgang mit unterschiedlichen Datenmodellen beim Datenaustausch im heterogenen Werkzeugumfeld gelingt. In: Automation 2013. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013, VDI-Berichte, Band 2209.

[DRATH ET AL. 2011]

Drath, R.; Fay, A.; Barth, M.: Interoperabilität von Engineering-Werkzeugen: Konzepte und Empfehlungen für den Datenaustausch zwischen Engineering-Werkzeugen. Automatisierungstechnik AT 59 (2011) 9, S. 598–607.

[DRESCHER & REINHART 2013]

Drescher, B.; Reinhart, G.: Unternehmensspezifische Zusammenstellung und Bewertung digitaler Werkzeugketten zur Unterstützung mechatronischer Anlagenentstehungsprozesse. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. München: Hanser Verlag 2013.

[DRESCHER & REINHART 2014]

Drescher, B.; Reinhart, G.: Reference Model for the Description of Digital Engineering Tools Based on Mechatronic Principles and Concepts. In: Advanced Materials Research (WGP-Kongress). Trans Tech Publications 2014, Band 1018. S. 547–554.

[DRESCHER ET AL. 2012]

Drescher, B.; Klein, T.; Stich, P.; Reinhart, G.: Kontextspezifische Auswahl und Adaption zur Effizienzsteigerung im Maschinen- und Anlagenbau. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. München: Hanser Verlag 2012.

[DRESCHER ET AL. 2013a]

Drescher, B.; Stich, P.; Kiefer, J.; Strahilov, A.; Bär, T.; Reinhart, G.: Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess - Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau. In: Dangelmaier, W. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2013a.

[DRESCHER ET AL. 2013b]

Drescher, B.; Stich, P.; Reinhart, G.: Performance Assessment of Heterogeneous Engineering Tools along the Development Process of Mechatronic Manufacturing Systems. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): The 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV). München: iwv der Technischen Universität München 2013b.

[DRESCHER ET AL. 2014a]

Drescher, B.; Klein, T. P.; Spiegelberger, B.; Stetter, R.; Reinhart, G.: Synthesis of a mechatronic reference model for engineering processes of production systems. In: Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on, Besancon (Frankreich) 2014a. S. 1592–1597.

[DRESCHER ET AL. 2014b]

Drescher, B.; Läufer, C.; Reinhart, G.: Kostenbewertung und Einordnung digitaler Werkzeuglandschaften zur Entwicklung von mechatronischen Produktionssystemen. In: Smart X. Baden-Baden: VDI Automation 2014b.

[DYLA 2002]

Dyla, A.: Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung. Dissertation, Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München, München, 2002.

[DYLLA 1991]

Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren, Konstruktionstechnik München, Band 5. München: Hanser Verlag 1991.

[EDER & HOSNEDL 2008]

Eder, W. E.; Hosnedl, S.: Design Engineering: A Manual for enhanced Creativity. Boca Raton (USA): CRC Press 2008.

[EHRENSPIEL 2009]

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Auflage. München: Hanser Verlag 2009.

[EIGNER 2012a]

Eigner, M.: System Lifecycle Management: Modellbasiertes Systems Engineering für eine innovative Systementwicklung. 4. Auflage. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung der Technische Universität Kaiserslautern 2012a.

[EIGNER 2012b]

Eigner, M.: Informationstechnologie für Ingenieure. 2012. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2012b.

[EIGNER 2014]

Eigner, M.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Verlag 2014.

[EIGNER & ABRAMOVICI 2008]

Eigner, M.; Abramovici, M.: Impulsbeitrag zum Workshop: Neue Ansätze der Rechnerunterstützung – Projektidee HOPE. In: Eigner, M. (Hrsg.): Mechatronik – die Herausforderung an Integration im Produktentstehungsprozess. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2008, Schriftenreihe VPE des Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung, Band 3.

[EIGNER & STELZER 2008]

Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2. Auflage. Dordrecht: Springer Verlag 2008.

[EIGNER & STELZER 2013]

Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. VDI, 2. Auflage. Dordrecht: Springer Verlag 2013.

[EIGNER ET AL. 2012]

Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R.: Proposal for functional Product Description as Part of a PLM Solution in interdisciplinary Product Development. In: Proceedings of Design 2012, Dubrovnik (Croatia) 2012.

[ENCARNACAO ET AL. 2013]

Encarnacao, J.; Hellwig, H. E.; Hettesheimer, E.; Klos, W. F.; Lewandowski, S.; Messina, L. A.; Poths, W.; Rohmer, K.; Wenz, H.: CAD-Handbuch: Auswahl und Einführung von CAD-Systemen. Informatik-Handbücher. Berlin and Heidelberg: Springer Verlag 2013.

[ENGELS & VOSS 2008]

Engels, G.; Voß, M.: Quasar Enterprise: Anwendungslandschaften serviceorientiert gestalten. Heidelberg: Dpunkt-Verlag 2008.

[FOEHR ET AL. 2013]

Foehr, M.; Kohlein, A.; Elger, J.; Schaffler, T.; Lüder, A.: Optimization of the Information Chain within the Engineering Process of Production Systems. In: 7th Annual IEEE International Systems Conference. Orlando (USA): IEEE 2013, S. 693–698.

[FRANKENBERGER 1997]

Frankenberger, E.: Arbeitsteilige Produktentwicklung: empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion, Band 291. Düsseldorf: VDI-Verlag (Dissertation) 1997.

[FRITZSCHE & KEIL 2007]

Fritzsche, M.; Keil, P.: Kategorisierung etablierter Vorgehensmodelle und ihre Verbreitung in der deutschen Software-Industrie. München: Institut für Informatik der Technischen Universität München 2007.

[FUSCH 2005]

Fusch, T.: Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie. München: iwB der Technischen Universität München 2005.

[GAJEWSKI 2004]

Gajewski, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 158. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2004.

[GAUSEMEIER 2000]

Gausemeier, J.: Kooperatives Produktengineering: Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2000.

[GAUSEMEIER 2008]

Gausemeier, J.: Domänenübergreifende Vorgehensmodelle. TransMechatronic des Heinz-Nixdorf-Institut (2008), S. 1–17.

[GAUSEMEIER 2012]

Gausemeier, J.: Maschinenbau braucht Systems Engineering. In: Max-Syrbe-Kolloquium. Karlsruhe: Heinz-Nixdorf-Institut 2012.

[GAUSEMEIER & BIGL 2006]

Gausemeier, J.; Bigl, T.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. München: Hanser Verlag 2006.

[GAUSEMEIER ET AL. 1999]

Gausemeier, J.; Grasmann, M.; Kespohl, H. D.: Verfahren zur Integration von Gestaltungs- und Berechnungssystemen. VDI-Berichte 1487 (1999), S. 71–88.

[GAUSEMEIER ET AL. 2001]

Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Hanser Verlag 2001.

[GAUSEMEIER ET AL. 2009]

Gausemeier, J.; Plass, C.; Wenzelmann, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München und Wien: Hanser Verlag 2009.

[GAUSEMEIER ET AL. 2013a]

Gausemeier, J.; Czaja, A.; Wiederkehr, O.; Dumitrescu, R.; Tschirner, C.; Steffen, D.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. Hanser Verlag 2013a.

[GAUSEMEIER ET AL. 2013b]

Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Steffen, D.; Czaja, A.; Wiederkehr, O.; Tschirner, C.: Systems Engineering in der industriellen Praxis. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut and Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT and Unity 2013b.

[GAUSEMEIER ET AL. 2013c]

Gausemeier, J.; Tschirner, C.; Dumitrescu, R.: Der Weg zu intelligenten technischen Systemen. Industrie Management 29 (2013c).

[GEISBERGER & SCHMIDT 2004]

Geisberger, E.; Schmidt, R.: Abschlussbericht des Projekts "ProMiS" - Projektmanagement für interdisziplinäre Systementwicklungen. Software. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag 2004.

[GERHARDT 2010]

Gerhardt, F.: Supporting virtual Product Engineering Processes by Integration of a neutral, lightweight and CAD-Derived Data Formate, Schriftenreihe VPE, Band 8. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2010.

[GERNERT & AHREND 2002]

Gernert, C.; Ahrend, N.: IT-Management: System statt Chaos: Ein praxisorientiertes Vorgehensmodell. 2. Auflage. München: Oldenbourg Verlag 2002.

[GNOSS 2008]

Gnoss, R.: Klassifikation der Wirtschaftszweige. Berlin: Statistisches Bundesamt Deutschland 2008.

[GRANDE 2013]

Grande, M.: 100 Minuten für Konfigurationsmanagement: Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag 2013.

[GRÄSSLER 2013]

Gräßler, I.: Kundenindividuelle Massenproduktion: Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2013.

[GRIMM & GRIMM 2014]

Grimm, J.; Grimm, W.: Deutsches Wörterbuch von Jacob Grimm und Wilhelm Grimm. Trier: Online-Version 2014, <http://dwb.uni-trier.de/de/>, zugegriffen am 08.12.2014.

[GROSS 2010]

Groß, J.: Lineare Einfachregression. In: Grundlegende Statistik mit R: Eine anwendungsorientierte Einführung in die Verwendung der Statistik Software R. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2010, S. 191–204.

[GÜTTEL & FAY 2008]

Güttel, K.; Fay, A.: Beschreibung von fertigungstechnischen Anlagen mittels CAEX. atp edition – Automatisierungstechnische Praxis 50 (2008) 05, S. 34–39.

[HABERFELLNER & BECKER 2012]

Haberfellner, R.; Becker, M.: Systems Engineering: Methodik und Praxis. 12. Auflage. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 2012.

[HABERFELLNER & DAENZER 2002]

Haberfellner, R.; Daenzer, W. F.: Systems Engineering. Methodik und Praxis. Zürich (Schweiz): Verlag Industrielle Organisation 2002.

[HABERFELLNER ET AL. 1994]

Haberfellner, R.; Daenzer, W. F.; Huber, F.: Systems Engineering: Methodik und Praxis. 8. Auflage. Zürich (Schweiz): Verlag Industrielle Organisation 1994.

[HACKEL 2010]

Hackel, M.: Auf dem Weg zum interdisziplinären mechatronischen Konstruktionsprozess: Entwickelnde Arbeitsforschung im Maschinen- und Anlagenbau, Europäische Hochschulschriften, Band 1003. Peter Lang Verlag 2010.

[HAGENKORT-RIEGER 2012]

Hagenkort-Rieger, S.: Statistisches Jahrbuch: Deutschland und Internationales. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt Deutschland 2012.

[HAMMERS 2012]

Hammers, C.: Modell für die Identifikation kritischer Informationspfade in Entwicklungsprojekten zur projektindividuellen Umsetzung der Quality-Gate-Systematik, Produktionsqualität und Messtechnik, Band 14. Aachen: Apprimus-Verlag 2012.

[HANSSEN 2010]

Hanssen, S. C.: Bestimmung und Bewertung der Wirkungen von Informationssystemen, Wirtschaftsinformatik, Band 67. Eul Verlag 2010.

[HECKERT 2013]

Heckert, U.: Informations- und Kommunikationstechnologie beim Wissensmanagement: Gestaltungsmodell für die industrielle Produktentwicklung. Wirtschaftsinformatik. Deutscher Universitätsverlag 2013.

Literaturverzeichnis

[HEIMANN ET AL. 2007]

Heimann, B.; Gerth, W.; Popp, K.: Mechatronik: Komponenten – Methoden – Beispiele. 3. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig 2007.

[HELBING 2009]

Helbing: IT Performance Management: IT Kennzahlen, 2009, <http://www.helbling.de/hol/publikationen/dokumente/it-performance-management-kennzahlen-1/view>, zugegriffen am 01.08.2016.

[HELPER 2013]

Helfer, T.: Interview mit Dr. Rainer Stetter von der ITQ GmbH über Qualifizierungsmaßnahmen im Bereich Mechatronik. Mechatronik News 2013 (2013), S. 1–2.

[HENSEL 2013]

Hensel, T. C.: Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen. Dissertation, iwb der Technischen Universität München, München, 2013.

[HERFS 2010]

Herfs, W. J.: Modellbasierte Software in the Loop Simulation von Werkzeugmaschinen, Ergebnisse aus der Produktionstechnik Werkzeugmaschinen, Band 2010/5. 1. Auflage. Aachen: Apprimus-Verlag 2010.

[HERRMANN ET AL. 2015]

Herrmann, C.; Reinhart, G.; Schuh, G.; Spengler, T.; Vietor, T.; Drescher, B.; Gäde, M.; Klein, T.; Richter, T.; Schönemann, M.; Spiegelberger, B.; Vogels, T.: Strategien, Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung mechatronischer Produkte: Ergebnisse und Synergiepotenziale aus den Forschungsprojekten GibWert, MEPROMA und SynProd. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 2015 (2015).

[HINTERHUBER & MATZLER 2013]

Hinterhuber; Matzler, K.: Kundenorientierte Unternehmensführung: Kundenorientierung - Kundenzufriedenheit - Kundenbindung. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2013.

[HOFFMANN 2013]

Hoffmann, D. W.: Software-Qualität. Umfassende und praxisnahe Einführung in das Gebiet der Software-Qualitätssicherung, 2013.

[HOFMANN 2004]

Hofmann, E.: Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin – Zur Diskrepanz von Wissenschaft und Praxis bei der Erarbeitung von Gestaltungsempfehlungen. In: Pfohl, H.-C. (Hrsg.): Netzkompetenz in Supply Chains. Wiesbaden: Gabler Verlag 2004, S. 285–297.

[HOKEMA 2009]

Hokema, D.: Die Landschaft der Regionalentwicklung: Wie flexibel ist der Landschaftsbegriff? (Landscape in Regional Development). Raumforschung und Raumordnung 67 (2009) 3, S. 239–249.

[HUMPERT 1995]

Humpert, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 1995.

[HUNDT ET AL. 2011]

Hundt, L.; Lüder, A.; Köhlein, A.; Gewalt, N.: Methodology for the Evaluation of Tools with Respect to its Applicability within mechatronical Engineering. 16th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 2011 (2011).

[ISERMANN 1999]

Isermann, R.: Mechatronische Systeme: Grundlagen. 1. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 1999.

[ISERMANN 2008]

Isermann, R.: Mechatronische Systeme: Grundlagen. Institut für Automatisierungstechnik der Technischen Universität Darmstadt, 2. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2008.

[ISERMANN ET AL. 2002]

Isermann, R.; Breuer, B.; Hartnagel, H. L.: Mechatronische Systeme für den Maschinenbau: Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 241" aus Integrierte mechanisch-elektronische Systeme für den Maschinenbau (IMES). Weinheim: Wiley-VCH 2002.

[JABLONSKI 2013]

Jablonski, S.: Datenverwaltung in verteilten Systemen: Grundlagen und Lösungskonzepte. Informatik-Fachberichte. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2013.

[JADHAV & SONAR 2011]

Jadhav, A.; Sonar, R.: Framework for Evaluation and Selection of the Software Packages: A hybrid Knowledge based System Approach. The Journal of Systems and Software 84 (2011), S. 1394–1407.

[JÄGER ET AL. 2013]

Jäger, T.; Foehr, M.; Horn, S.; Mühlhause, M.; Seidel, H.; Lehmann, O.; Diedrich, C.: Systematische Absicherung des Mehrwerts von Engineeringwerkzeugen. In: Automation. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013, VDI-Berichte, Band 2209.

[JUNGKUNZ 2005]

Jungkunz, R.: PDM-basierte Überwachung komplexer Entwicklungsprojekte. Dissertation, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen der Technischen Universität München, München, 2005.

[JURAN 1989]

Juran, J. M.: Handbuch der Qualitätsplanung. 2. Auflage. Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie 1989.

[KAHLERT ET AL. 2003]

Kahlert, M.; Paetzold, K.; Schweiger, W.: Konzept und Architektur für einen mechatronischen Effektkatalog. In: Mechatronik. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003, VDI-Berichte, Band 1753, S. 145–162.

[KAHLERT ET AL. 2004]

Kahlert, M.; Iriondo, A.; Schweiger, W.: Simulation of an Adaptive ER Damper Supported by an Effect-Catalog. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of Design 2004 (8. International Design Conference), Dubrovnik (Kroatien) 2004.

[KANO ET AL. 1984]

Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji, S.: Attractive Quality and must-be Quality. Journal of the Japanese Society of Quality Control 14 (1984) 2, S. 147–156.

[KAPP & CONSTANTINESCU 2006]

Kapp, R.; Constantinescu, C.: Digitales Engineering: Neue Werkzeuge und Trends. Intelligenter Produzieren 2006 (2006) 3.

[KAYNAK 1996]

Kaynak, M. O.: Guest Editorial – The Age of Mechatronics. In: IEEE Transactions on Mechatronics. New York (USA): American Society of Mechanical Engineers (ASME) 1996, Band 43.

[KAZMAN ET AL. 1994]

Kazman, R.; Bass, L.; Webb, M.; Abowd, G.: SAAM: A method for analyzing the properties of software architectures. In: Proceedings of the 16th international Conference on Software Engineering (ICSE), Sorrento (Italien) 1994. S. 81–90.

[KERN 2005]

Kern, E. M.: Verteilte Produktentwicklung – Rahmenkonzept und Vorgehensweise zur organisatorischen Gestaltung. Berlin: Gito Verlag 2005.

[KICKINGER 2012]

Kickinger, R.: Some Practical Considerations on Mechatronic Design, Machine Modularization and Safety Technology. In: Scheidl, R.; Jacoby, B. (Hrsg.): The 13th Mechatronics Forum international Conference. Linz (Österreich): Trauner Verlag 2012, Advances in Mechatronics.

[KIEFER 2007]

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2007.

[KIEFER ET AL. 2006]

Kiefer, J.; Bär, T.; Bley, H.: Mechatronic-oriented Engineering of Manufacturing Systems Taking the Example of the Body Shop. In: Proceedings of the International Academy for Production Engineering (CIRP), Leuven (Belgien) 2006, Band 2006. S. 681–686.

[KLEIN 2016]

Klein, T.: Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, iwb der Technischen Universität München, München, 2016.

[KLEIN & REINHART 2014]

Klein, T.; Reinhart, G.: Approaches for Integration of Agile Procedures into Mechatronic Engineering of Manufacturing Systems. In: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2014, S. 225–230.

[KNOPP 2014]

Knopp, C.: Softwarewartung - warum eigentlich?, 2014, <http://viererblog.de/2014/03/softwarewartung-warum-eigentlich/>, zugegriffen am 01.07.2016.

[KOEHNE 2011]

Koehne, D.: Integration der Disziplinen. Digital Engineering Magazin (2011) 3, S. 44–46.

[KOPP 2014]

Kopp, C.: Einführung von IT-Governance: Vorgehensmodell für mittelständische Unternehmen mit den Referenzmodellen COBIT, Val-IT und ITIL. Hamburg: Diplomica Verlag 2014.

[KRAHTOV 2003]

Krahtov, K.: Nutzwertanalyse als Auswahlmethode eines PDM-Systems: Prozess- und Datenmanagement im Engineering. Karlsruhe: FZI Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie 2003, <http://www.plmportal.de/wks/uploads/NWA/Nutzwertanalyse.html>, zugegriffen am 05.05.2015.

[KRAUSE 2008]

Krause, L.: Methode zur Implementierung von integriertem Produktdatenmanagement (PDM). Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik. Berlin: Gito Verlag 2008.

[KRCMAR 2015]

Krcmar, H.: Informationsmanagement. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2015.

[KRCMAR & SCHWARZER 1994]

Krcmar, H.; Schwarzer, B.: Prozessorientierte Unternehmensmodellierung—Gründe, Anforderungen an Werkzeuge und Folgen für die Organisation. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 1994.

[KREHMER 2012]

Krehmer, H.: Vorgehensmodell zum Iterations- und Produktreifegradmanagement in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung. Konstruktionstechnik und Maschinenelementen, 1. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 2012.

[KRICK 1965]

Krick, E. V.: An Introduction to Engineering and Engineering Design. New York (USA): Johan Wiley and Sons 1965.

[KÜMMEL 2000]

Kümmel, M.: Integration von Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2000.

[LEMKE 2013]

Lemke, C.: Germany in Europe: Powerhouse at the Crossroads - Introduction. In: Germany in Europe: Powerhouse at the Crossroads. New York (USA): New York University (Working paper) 2013, S. 1–3.

[LENTES & EICHERT 1999]

Lentes, J.; Eichert, J.: Potentiale digitaler Werkzeuge weiter ausschöpfen. wt – Werkstatttechnik online 1999 (1999) 3, S. 117–118.

[LERCHER 2008]

Lercher, B.: Konzeption und System einer Integrationsplattform zur Entwicklung von Werkzeugmaschinen. Dissertation, iwb der Technischen Universität München, München, 2008.

[LINDEMANN 2006]

Lindemann, R. Z. M. F., U.; Reichwald: Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. 2006. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2006.

[LINDEMANN 2009]

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Entwicklung technischer Produkte als komplexer Prozess, 2009. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2009.

[LINDWORSKY 2011]

Lindworsky, A.: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest. Dissertation, iwb der Technischen Universität München, 2011.

[LINNER 1995]

Linner, S.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung. Berlin und New York (USA): Springer Verlag 1995.

[LINNHOF 1996]

Linnhoff, M.: Eine Methodik für das Benchmarking von Entwicklungskooperationen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 96. Aachen: Shaker Verlag 1996.

[LÜDER ET AL. 2013]

Lüder, A.; Foehr, M.; Schmidt, N.; Schäffler, T.; Elger, J.: Roadmap zur Integration mechatronischer Konzepte in Werkzeugketten. In: Automation. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013, VDI-Berichte, Band 2209.

[MAIER & TAUCHNITZ 2009]

Maier, U.; Tauchnitz, T.: Prozessleitsysteme und SPS-basierte Leitsysteme. ATP-Schriftenreihe. Berlin: Oldenbourg Verlag 2009.

[MALETZ 2008]

Maletz, M.: Integrated Requirements Modeling: A Contribution towards the Integration of Requirements into an holistic Product Lifecycle Management Strategy, Schriftenreihe VPE, Band 4. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2008.

[MANKINS 1995]

Mankins, J.: Technology Readiness Levels. Office of Space Access and Technology der NASA 1995, <https://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>, zugegriffen am 01.08.2016.

[MARSCHALL & WERK 2007]

Marschall, I.; Werk, K.: Die Europäische Landschaftskonvention. Natur und Recht (2007).

[MASAK 2006]

Masak, D.: Legacysoftware: Das lange Leben der Altsysteme. Xpert.press. Berlin: Springer Verlag 2006.

[MAUDERER 2011]

Mauderer, M.: Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen. Dissertation, iwB der Technischen Universität München, München, 2011.

[MAURMAIER & DENCOVSKI 2010]

Maurmaier, M.; Dencovski, K.: Engineering Challenges – Evaluierungskonzept für Engineering-Werkzeuge. In: Schiller, F. (Hrsg.): Erfolgreiches Engineering. München: Oldenbourg-Industrieverlag 2010, Atp kompakt, Band 1.

[MAYR & DRATH 2007]

Mayr, G.; Drath, R.: Grafische Darstellung PLT-Aufgaben und Datenaustausch zu Engineering-Systemen. *Automatisierungstechnische Praxis* 49 (2007) 5, S. 22.

[McFARLAN 1981]

McFarlan, F. W.: Portfolio Approach to Information-Systems. *Harvard Business Review* 59 (1981) 5, S. 142–150.

[MEISSNER ET AL. 2005]

Meißner, M.; Gericke, K.; Gries, B.; Blessing, L.: Eine adaptive Produktentwicklungsmethodik als Beitrag zur Prozessgestaltung in der Produktentwicklung. In: *Proceedings of the 16th Symposium on Design for X*, Neukirchen/Erlangen 2005.

[MERSCH ET AL. 2011]

Mersch, H.; Behnen, D.; Schmitz, D.; Epple, U.; Brecher, C.; Jarke, M.: Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Prozess- und Fertigungstechnik. *Automatisierungstechnik – Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik* 59 (2011) 1, S. 7–17.

[MICHALKOWSKI 2015]

Michalkowski, D.: Intelligente Pneumatik bereit für Industrie 4.0. *Konstruktion* 2015 (2015) 7-8.

[MILBERG & SCHUH 2013]

Milberg, J.; Schuh, G.: *Erfolg in Netzwerken*. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2013.

[MM 2011]

MM: *Entwicklung in der Mechatronik. Mensch und Mechatronik 2011*, <http://www.mensch-mechatronik.de/index.html>, zugegriffen am 10.11.2011.

[MURMANN 2013]

Murmann, P.: *Zeitmanagement für Entwicklungsbereiche im Maschinenbau*. DUV Wirtschaftswissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2013.

[MURPHY & SIMON 2001]

Murphy, K. E.; Simon, S. J.: Using Cost Benefit Analysis for Enterprise Resource Planning Project Evaluation: a Case for including Intangibles. In: *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Science (HICSS)*, 2001.

[NEWMAN & KREHBIEL 2007]

Newman, W. R.; Krehbiel, T. C.: Linear Performance Pricing: A collaborative Tool for focused Supply Cost Reduction. *Journal of Purchasing and Supply Management* 13 (2007) 2, S. 152–165.

[NORTON 1985]

Norton, D. P.: *Stage by Stage – Letter to Management: The Economics of Computing in the Advanced Stages*. Nolan, Norton & Company (1985).

[NYHUIS ET AL. 2009]

Nyhuis, P.; Hirsch, B.; Klemke, T.; Wulf, S.: Bewertung und Auswahl digitaler Werkzeuge in der Fabrikplanung. In: Schenk, M. (Hrsg.): *Digital Engineering – Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation*. Berlin: Gito Verlag 2009, Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V., S. 127–149.

[OPPELT ET AL. 2015]

Oppelt, M.; Barth, M.; Urbas, L.: The Role of Simulation within the Life-Cycle of a Process Plant. *atp – Automatisierungstechnik in der Praxis (atp edition)* 57 (2015) 9, S. 46–59.

[OTT 2009a]

Ott, S.: Konzept zur methodischen System-Modellierung in der anforderungsgerechten Produktentwicklung, *Berichte zum Generic-Management*, Band 3. Aachen: Shaker Verlag 2009a.

[OTT 2009b]

Ott, S.: Konzept zur methodischen System-Modellierung in der anforderungsgerechten Produktentwicklung. *Berichte zum Generic-Management*. Herzogenrath: Shaker Verlag 2009b.

[OTTERBACH & SCHÜTTE 2004]

Otterbach, R.; Schütte, F.: Effiziente Funktions- und Software-Entwicklung für mechatronische Systeme im Automobil. In: *Mechatronischer Systementwurf: Workshop intelligente, mechatronische Systeme*. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004. S. 119–132.

[OTTOSSON 2004]

Ottosson, S.: Dynamic Product Development (DPD). *Technovation* 24 (2004) 3, S. 207–217.

[PAHL ET AL. 2006]

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2006.

[PENNY 1970]

Penny, R. K.: Principles of Engineering Design. Postgraduate Medical Journal 46 (1970), S. 344–349.

[PFEIFER & SCHMITT 2014]

Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement. München: Hanser Verlag 2014.

[PIETSCH 2003]

Pietsch, T.: Bewertung von Informations- und Kommunikationssystemen: Ein Vergleich betriebswirtschaftlicher Verfahren. 2. Auflage. München: Erich Schmidt Verlag 2003.

[PIETSCH & KLOTZ 1989]

Pietsch, T.; Klotz, M.: Ersparnisanalyse als Entscheidungsgrundlage zur Einführung von Büroinformations- und kommunikationssystemen. Praktische Anwendung moderner Bürotechnologie. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1989.

[PONN & LINDEMANN 2008]

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte – systematisch von Anforderungen zu Konzepten. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2008.

[PONN & LINDEMANN 2011]

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2011.

[PONN 2007]

Ponn, J. C.: Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, München, 2007.

[PORTER 1986]

Porter, M. E.: Changing Patterns of International Competition. California Management Review. The Regents of the University of California. 28 (1986) 2.

[PROBST ET AL. 2012]

Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 7. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag 2012.

[PULM 2004]

Pulm, U.: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, München, 2004.

[RAMMER ET AL. 2012]

Rammer, C.; Aschhoff, B.; Crass, D.; Doherr, T.; Hud, M.; Köhler, C.; Peters, B.; Schubert, T.; Schwiebacher, F.: Innovationsverhalten der deutschen Wirtschaft: Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2012. Mannheim: Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung 2012.

[RAUCHENBERGER 2010]

Rauchenberger, J.: Reifegradmodelle als Ordnungsrahmen zur systematischen Prozessverbesserung für mechatronische Entwicklungsprozesse. Aachen: Apprimus-Verlag 2010.

[REINHART 1996]

Reinhart, G.: Qualitätsmanagement: Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 1996.

[REINHART & STICH 2011]

Reinhart, G.; Stich, P.: Auslegung von Transportprozessen mit Hilfe der physikbasierten mechatronischen Simulation. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2011, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294.

[REINHART ET AL. 1999]

Reinhart, G.; Milberg, J.; Broser, W.: Produzieren in Netzwerken: Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele. Seminarberichte iwv der Technischen Universität München. München: Utz Verlag 1999.

[REINHART ET AL. 2012]

Reinhart, G.; Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Haberstroh, P.: Produktqualität intelligent sichern: Herausforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess. *Mechatronik 2012* (2012) 11, S. 36–37.

[RICHTER 2013]

Richter, C.: Reifegradmodelle für Werkzeuglandschaften zur Unterstützung von ITSM-Prozessen. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 2013.

[ROELOFSEN 2011]

Roelofsen, J.: Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, München, 2011.

[ROHLOFF 2005]

Rohloff, M.: Enterprise Architecture – Framework and Methodology for the Design of Architectures in the Large. In: *Proceedings of European Conference on Information Systems (ECIS)*, 2005. Paper 113, eingereicht von Siemens Corporate Information Office.

[ROLLER & DETTLAFF 1996]

Roller, D.; Dettlaff, B.: Realisierung einer modernen ECAD Systemarchitektur in Anlehnung an das CAD-Referenzmodell. *Verteilte und intelligente CAD-Systeme (Tagungsband CAD) 1996* (1996), S. 242–255.

[ROSS 1977]

Ross, D. T.: Structured analysis (SA): A Language for Communicating Ideas. *IEEE Transactions on Software Engineering* 3 (1977), S. 16–34.

[ROTH, K. 2000]

Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2000.

[ROTHHÖFT 2012]

Rothhöft, M.: Marktstudie Engineering-Prozess: Mechanik – Elektronik – Software. Kleiner Auszug aus den Ergebnissen einer Befragung von Unternehmen aus dem Maschinenbau im Januar/Februar 2012. *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2012*, <http://www.marktstudien.org/>, zugegriffen am 01.08.2016.

[RÜEGG-STÜRM 2005]

Rüegg-Stürm, J.: Das neue St. Galler Management-Modell: Grundkategorien einer integrierten Managementlehre. 2. Auflage. Bern (Schweiz): Universität St. Gallen 2005.

[SAATY 1990]

Saaty, T. L.: Multicriteria Decision Making – the Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, Band 1. 2. Auflage. Pittsburgh (USA): RWS Publication 1990.

[SASSONE 1987]

Sassone, P. G.: Cost-benefit Methodology for Office Systems. ACM Transaction Information Systems 5 (1987) 3, S. 273–289.

[SBD 2011]

SBD: Datenreport 2011: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland. Bonn: Bundeszentrale für Politische Bildung des Statistisches Bundesamt Deutschland (SDB) 2011.

[SCHACK 2007]

Schack, R.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Dissertation, iwB der Technische Universität München, München, 2007.

[SCHEITHAUSER 2012]

Scheithauser, D.: Analyse und Synthese im Systems Engineering. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. München: Hanser Verlag 2012.

[SCHLEIDT 2009]

Schleidt, B.: Kompetenzen für Ingenieure in der unternehmensübergreifenden virtuellen Produktentwicklung, Schriftenreihe VPE, Band 7. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2009.

[SCHUH 2006]

Schuh, G.: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. VDI-Buch, 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag 2006.

[SCHUH ET AL. 2010]

Schuh, G.; Lenders, M.; Nussbaum, C.; Müller, J.: Integratives Prozessmodell einer Entwicklungsumgebung. In: Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2010, Band 7.

[SCHURZ 2011]

Schurz, G.: Einführung in die Wissenschaftstheorie. 3. Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 2011.

[SEDER & ALHAZZA, M. H. F. 2014]

Seder, A. M. F.; Alhazza, M. H. F.: Review on the Theory of Attractive Quality Kano Model. Journal of Advanced Science and Engineering Research 4 (2014) 2, S. 88–102.

[SEUS & SEELE 2013]

Seus, F.; Seele, S.: Flexibilität ist ein wichtiger Wettbewerbsfaktor. ArgumentierBAR. Argumentationshilfen aus dem VDMA. Berlin: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2013.

[SIEFERLE 1997]

Sieferle, R. P.: Rückblick auf die Natur: Eine Geschichte des Menschen und seiner Umwelt. München: Luchterhand Fachverlag 1997.

[SIMON 2006]

Simon, S.: Benchmark im Werkzeugmaschinenbau: Ein Beitrag zur wettbewerbsfähigen Produktentwicklung. Dissertation, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, 2006.

[SPIEGELBERGER 2011]

Spiegelberger, B.: Anwendergerechte Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse für kleine und mittlere Unternehmen im Maschinenbau. Dissertation, Institut für Informatik im Maschinenbau der Technischen Universität München, München, 2011.

[SPRAGUE 2001]

Sprague, R. H. (Hrsg.): Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Band 8. Los Alamitos (USA): IEEE Computer Society 2001.

[SPUR & ESSER 2013]

Spur, G.; Eßer, G.: Innovationssystem Produktionstechnik. München: Hanser Verlag 2013.

[SPUR & KRAUSE 1997]

Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. München: Hanser Verlag 1997.

[STARK ET AL. 2011]

Stark, R.; Hayka, H.; Israel, J. H.; Kim, M.; Müller, P.; Völlinger, U.: Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie. Informatik-Spektrum 34 (2011) 1, S. 20–28.

[STETTER 2008]

Stetter, R.: Das Wort Mechatronik zu kennen genügt nicht. In: Jamal, R.; Jaschinski, H. (Hrsg.): Virtuelle Instrumente in der Praxis: Begleitband zum Kongress VIP. Heidelberg: Hüthig Verlag 2008.

[STETTER & BLUM 2010]

Stetter, R.; Blum, T.: Mechatronik im Wandel begriffen. Economic Engineering 2010 (2010) 02/2010, S. 70–73.

[STICH ET AL. 2013a]

Stich, P.; Drescher, B.; Klein, T.; Haberstroh, P.; Reinhart, G.: Aktuelle Herausforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess. Mechatronik News 2013 (2013a), S. 3–5.

[STICH ET AL. 2013b]

Stich, P.; Drescher, B.; Reinhart, G.: Mechatronik – aber konsequent: Leistungsbewertung heterogener Entwicklungswerkzeuge im Maschinen- und Anlagenbau. megalink 2013 (2013b) 6, S. 24–26.

[STICH ET AL. 2015]

Stich, P.; Richter, C.; Klein, T.; Drescher, B.; Reinhart, G.: Engineering-Wertstrom: Analyse und Gestaltung mechatronischer Entwicklungsprozesse. In: Automation. Baden-Baden: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2015.

[SUCHOLD ET AL. 2009]

Suchold, N.; Riedl, M.; Fedrowitz, C.; Mikuta, G.; Diedrich, C.: Mechatronisches Anlagenmodell für die Austaktung von Fertigungszellen. KUKA-Report 2009 (2009).

[TEICH 2012]

Teich, J.: Hardware/Software Codesign: The Past, the Present, and Predicting the Future. Proceedings of the IEEE 100 (2012) Special Centennial Issue, S. 1411–1430.

[TEICH & HAUBELT 2007]

Teich, J.; Haubelt, C.: Digitale Hardware/Software-Systeme: Synthese und Optimierung. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2007.

[THRAMBOULIDIS 2008]

Thramboulidis, K.: Challenges in the Development of Mechatronic Systems: The Mechatronic Component. 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 2008 (2008).

[TILCH 2009]

Tilch, D.: Mechatronik, quo vadis: Funktionsintegration in der Automatisierungstechnik, Band 2009. Stuttgart: Motek Kongress Mechatronik 2009.

[TOENSHOFF ET AL. 1999]

Toenshoff, H. K.; Zahn, G.; Woelk, P.-O.: Datenmodell zum systemneutralen Informationsaustausch auf der Basis Technischer Elemente. VDI-Berichte 1497 (1999), S. 431–450.

[TOMIZUKA 1996]

Tomizuka, M.: Guest Editorial. In: ASME Transactions on Mechatronics. New York (USA): IEEE 1996, Band 1, S. 101–102.

[TRISTL ET AL. 2013]

Tristl, C.; Klenk, H.; Karcher, A.: Adaptives SE-basiertes Rahmenwerk zur Synchronisation von Teilentwicklungsprozessen. In: Maurer, M.; Schulze, S.-O. (Hrsg.): Tag des Systems Engineering. München: Hanser Verlag 2013.

[ULRICH & WEIBEL 2007]

Ulrich, E.; Weibel, D.: IT-Kosten bei Schweizer Unternehmen: Eine empirische Studie. Arbeitsbericht Nr. 195 des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Universität Bern (2007).

[ULRICH 1981]

Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Sandig, C.; Geist, M. N.; Köhler, R. (Hrsg.): Die Führung des Betriebes. Stuttgart: Poeschel Verlag 1981.

[ULRICH 2001]

Ulrich, H.: Der systemorientierte Ansatz in der Betriebswirtschaftslehre. In: Management: Aufsätze I. Teil. Bern (Schweiz): Haupt Verlag 2001, Band 4, S. 21–40.

[ULRICH ET AL. 1984]

Ulrich, H.; Dyllick, T.; Probst, G.: Management. Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung. Bern (Schweiz): Haupt Verlag 1984.

[ULRICH & HILL 1976]

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5 (1976) 7, S. 304–309.

[VAJNA 2009]

Vajna, S.: CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. 2. Auflage. Berlin and Heidelberg: Springer Verlag 2009.

[VDA 2009]

VDA: Datenfernübertragung von CAD/CAM Daten: Übersicht, Begriffe und Codes. Richtlinie 4951. Berlin: Abteilung Logistik – Arbeitskreis PLM des Verband der Automobilindustrie (VDA) 2009.

[VDI 1993]

VDI: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Richtlinie 2221. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1993.

[VDI 1996a]

VDI: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Richtlinie 2222. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1996a.

[VDI 1996b]

VDI: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Richtlinie 3633. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1996b.

[VDI 1999]

VDI: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Richtlinie 2223. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1999.

[VDI 2002]

VDI: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung: Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Richtlinie 2219. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2002.

[VDI 2004]

VDI: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Richtlinie 2206. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2004.

[VDI 2010]

VDI: Engineering von Anlagen: Evaluieren und Optimieren des Engineerings – Grundlagen und Vorgehensweise. Richtlinie 3695 Blatt 1. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2010.

[VDI 2014]

VDI: Format für den Austausch von Verzahnungsdaten – Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format). Richtlinie 2610. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2014.

[VDMA 2006]

VDMA: Leitfaden Softwarequalitätssicherung. Software. Frankfurt am Main: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2006.

[VDMA 2013a]

VDMA: Maschinenbau in Zahl und Bild: Volkswirtschaft und Statistik. Frankfurt am Main: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2013a.

[VDMA 2013b]

VDMA: Flexibilität ist ein wichtiger Wettbewerbsfaktor. Frankfurt am Main: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2013b.

[VDMA 2015]

VDMA: Anforderungen und Methoden im mechatronischen Engineering: Leitfaden für Anwender im Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt am Main: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) 2015.

[WARTZACK 2007]

Wartzack, S.: Vorlesung Methodisches und Rechnergestütztes Konstruieren. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen 2007.

[WEBER 2000]

Weber, M.: Wissenschaft und Praxis: Plädoyer für eine organisationstheoretische Betrachtung. Nümbrecht: Kirsch Verlag 2000.

[WEIDENHAUPT 2001]

Weidenhaupt, K. L.: Anpassbarkeit von Software-Werkzeugen in prozessintegrierten Entwicklungsumgebungen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2001.

Literaturverzeichnis

[WEINZIERL 2006]

Weinzierl, J.: Produktreifegrad-Management in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken: Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Anlaufmanagement. Fabrikorganisation der Technische Universität Dortmund. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2006.

[WELLNIAK 1994]

Wellniak, R.: Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz. Dissertation, Technische Universität München, München, 1994.

[WERNICKE 1996]

Wernicke, J.: CAD-Mechatronik. In: CAD zur Verkürzung der Time to Market. Hagenburg: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1996.

[WIECZORREK & MERTENS 2008]

Wieczorrek, H. W.; Mertens, P.: Management von IT-Projekten: Von der Planung zur Realisierung. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag 2008.

[WILD 1982]

Wild, J.: Grundlagen der Unternehmungsplanung, WV-Studium, Band 26. 4. Auflage. Opladen: Westdeutscher Verlag 1982.

[WINZER 2013]

Winzer, P.: Generic Systems Engineering: Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung. Berlin: Springer Vieweg 2013.

[WITTE & DAVIS 2013]

Witte, E. H.; Davis, J. H.: Understanding Group Behavior: Consensual Action By Small Groups. New York: Psychology Press 2013.

[WITTENSTEIN ET AL. 2015]

Wittenstein, M.; Reinhart, G.; Scholz-Reiter, B.; Wahlster, W.; Zühlke, D. (Hrsg.): Intelligente Vernetzung in der Fabrik: Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis. München: Fraunhofer Verlag 2015.

[WOYWODE ET AL. 2012]

Woywode, M.; Mäde, A.; Wallach, D.; Plach, M.: Abschlussbericht des Forschungsprojekts: Gebrauchstauglichkeit von Anwendungssoftware als Wettbewerbsfaktor für

kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Mittelstand Digital 12 (2012), S. 2013, <http://www.mittelstand-digital.de>, zugegriffen am 12.07.2014.

[WULF 2001]

Wulf, J. E.: Elementarmethoden zur Lösungssuche. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München, München, 2001.

[WÜNSCH 2007]

Wünsch, G.: Methode für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme. Dissertation, iwb der Technischen Universität München, München, 2007.

[ZÄH 2006]

Zäh, M. F.: Technologische Innovation im Bereich des Maschinenbaus. In: Spur, G. (Hrsg.): Wachstum durch technologische Innovation. München: Acatech 2006, S. 63–69.

[ZÄH ET AL. 2004]

Zäh, M. F.; Vogl, W.; Wuensch, G.; Munzert, U.: Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus'. Virtuelle Produktionssystemplanung-Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik 23 (2004), S. 1–21.

[ZANGEMEISTER 2014]

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Norderstedt: Books on Demand 2014.

[ZELLER 2009]

Zeller, A.: Why Programs Fail: A Guide to Systematic Debugging. 2. Auflage. London (UK): Elsevier Science 2009.

[ZOBEL 2009]

Zobel, D.: Systematisches Erfinden: Methoden und Beispiele für den Praktiker mit 10 Tabellen. 5. Auflage. Renningen: Expert-Verlag 2009.