

Lehrstuhl für Produktentwicklung
der Technischen Universität München

**Entwicklungs- und
Einführungsmethodik
für das Projektierungswerkzeug
Pneumatiksimulation**

Thomas H. F. Anton

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i.R.)

Die Dissertation wurde am 15.09.2010 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 07.07.2011 angenommen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN 978-3-8439-0117-8

© Verlag Dr. Hut, München 2011
Sternstr. 18, 80538 München
Tel.: 089/66060798
www.dr.hut-verlag.de

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Autoren und ggf. Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der Vervielfältigung und Verbreitung in besonderen Verfahren wie fotomechanischer Nachdruck, Fotokopie, Mikrokopie, elektronische Datenaufzeichnung einschließlich Speicherung und Übertragung auf weitere Datenträger sowie Übersetzung in andere Sprachen, behält sich der Autor vor.

1. Auflage 2011

Für Thomas Schmid.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Durch die Globalisierung im Maschinen- und Anlagenbau sowie in spezifischer Weise durch eine Liberalisierung im Bahnsektor kam es in den vergangenen Jahren zu einem tiefgreifenden Strukturwandel in der Eisenbahnbranche. Die Überführung der Systemverantwortung von den vormals monopolistischen und überwiegend nationalen Betreibern auf die Fahrzeugbauer und Systemhäuser stellt diese vor neue Herausforderungen in der Projektierung. Die Wettbewerbssituation erzwingt eine schnelle aber hinreichend präzise Reaktion bereits in der Angebotslegung sowie dann eine Projektrealisierung in engstem Zeitrahmen.

Komplexe Software zur Systemauslegung steht Berechnungsexperten zwar häufig zur Verfügung, sie ist aber im umkämpften Markt mit seinem dynamischen Ausschreibungsgeschäft nur unter sehr hohem Aufwand und damit in der Regel nicht immer effizient einsetzbar. Diese Arbeit zeigt am Beispiel der Pneumatiksimulation die Entwicklung einer Methodik, die den Einsatz komplexer Werkzeuge auch außerhalb höchster Expertenspezialisierung und damit in einer industriellen Breite ermöglicht. Die Methodik definiert dabei Schritte, die die Adaption und Einführung in einem solchen industriellen Umfeld erfolgreich unterstützen. Das Ziel der Methodikanwendung ist damit nicht die Entwicklung des „besten“ Simulationswerkzeuges (Expertensoftware), sondern vielmehr die Realisierung einer hochgradig verfügbaren Lösung, welche hinreichend zuverlässige Auslegungsergebnisse im Tagesgeschäft des Projektierers liefert.

Im Rahmen dieser Arbeit entstand also eine Methodik, mit der existierende Ansätze aus den Wirkungsfeldern der Simulationstechnologie und des „Change Managements“ zusammengeführt wurden. Durch ihren präskriptiven Charakter wird die Methodik zu einer Art Wegweiser durch anspruchsvolle Entwicklungs- und Einführungsprojekte. Hervorzuheben ist die Betonung soziotechnischer Aspekte, die den Nutzer der entwickelten Ansätze zu der Erkenntnis führt, dass es sich bei der Gestaltung und Einführung eines Werkzeuges eben nicht nur um eine rein technische Herausforderung handelt.

Bei vergleichbaren Aufgaben, also bei Einführungsfragestellungen mit vorheriger Adaption des Einführungsobjektes, bietet das erarbeitete Vorgehensmodell einen Leitfaden. Mit der Methodik ist es möglich, auch Werkzeuge anderen Ursprungs effizienter als bisher einzuführen. Besonders bei Themenstellungen, bei denen die Adaption abhängig vom Umfeld ist und Anpassungen in organisatorischer, prozessualer oder nutzerbezogener Hinsicht notwendig sind, kann die vorgeschlagene Methodik ihre Vorteile in vollem Umfang zeigen.

Garching, im September 2011

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

DANKSAGUNG

Diese Dissertation entstand in den Jahren 2004 bis 2010 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München und als Doktorand bei der Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Udo Lindemann für die Betreuung der Dissertation, für seine wertvolle inhaltliche Führung in der gemeinsamen Forschungsarbeit und für die geduldige Unterstützung während der Fertigstellung dieser Arbeit. Prof. Hartmut Hoffmann danke ich sehr herzlich für die Mitberichterstattung, Prof. Tim Lüth für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dr. Jörg Wach und Marc-Oliver Herden danke ich für die Möglichkeit, während meiner Tätigkeit bei Knorr-Bremse promovieren zu können, und dafür, dass sie mir stets ihre Unterstützung gewährt haben.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Thomas Rasel und Dr. Andreas Gaag für die überaus gute und fruchtbare Zusammenarbeit im Forschungsprojekt.

Meine Forschungsarbeit wäre nicht möglich gewesen ohne meine studentischen Hilfskräfte, Semestranen und Diplomanden. Stellvertretend danke ich Philipp Weidner, der mir half, meine Ideen im Rahmen der Fallstudie umzusetzen.

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Michael Amft und Dr. Matthias Kreimeyer, die sich intensiv mit dem Thema meiner Arbeit auseinandergesetzt haben und mir durch wertvolle Hinweise und Anregungen sehr geholfen haben.

Leider kann ich an dieser Stelle nicht jede Kollegin und jeden Kollegen des Lehrstuhls namentlich nennen, aber ich bedanke mich bei allen für die gute Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen und die schöne Zeit am Institut. Dr. Jöran Grieb danke ich für viele interessante Diskussionen in unserer langjährigen harmonischen Bürogemeinschaft.

Fürs Korrekturlesen gilt mein lieber Dank meiner Schwester Ulrike Schmid, sowie Jessica Tilly, Heiner Schneider und Dr. Thomas Heßling.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, die immer für mich da sind und mir alle Möglichkeiten im Leben eröffnet haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner wundervollen Frau Julia dafür, dass Sie mich immer unterstützt und mir die für die Promotion notwendigen Freiräume geschaffen hat.

Eglharting, im September 2011

Thomas Anton

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1 Fokus	3
1.1.1 Defizite im Engineering von Schienenfahrzeugen	4
1.1.2 Status Quo der Systemauslegung während der Projektierung	6
1.1.3 Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug	7
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	9
1.3 Thematische Abgrenzung	11
1.4 Wissenschaftlicher Ansatz	13
1.5 Erfahrungsgrundlage	15
1.6 Aufbau der Arbeit	16
2. Stand der Forschung und der Technik	19
2.1 Einführung von Werkzeugen	19
2.1.1 Werkzeugeinführung und ähnliche Fragestellungen	19
2.1.2 Allgemeine Aspekte zu Einführungsaufgaben in Unternehmen	21
2.1.3 Prozess- und Vorgehensmodelle zur Bewältigung von Einführungsaufgaben	31
2.1.4 Das Münchner Vorgehensmodell	39
2.1.5 Zusammenfassung zur Einführung von Werkzeugen	41
2.2 Projektierung komplexer Systeme	41
2.2.1 Komplexe technische Systeme	41
2.2.2 Projektierung technischer Systeme	45
2.2.3 Projektierung im Maschinen- und Anlagenbau	53
2.2.4 Zusammenfassung zur Projektierung komplexer Systeme	58
2.3 Simulation in der Pneumatik	59
2.3.1 Grundlagen der Simulation	59
2.3.2 Vielseitigkeit von Modellbildung und numerischer Simulation	63
2.3.3 Simulation in der Pneumatik	65
2.3.4 Individual- und Standardsoftware	69
2.3.5 Beispiel für eine Software zur Pneumatik-Systemsimulation – AMESim	71

2.3.6	Entwicklung pneumatischer Bauteile mit Hilfe von Strömungssimulation	73
2.3.7	Zusammenfassung zur Simulation in der Pneumatik	74
2.4	Ableitung des Handlungsbedarfes zur Definition einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik	75
3.	Anforderungen & Vorgehensweise zur Definition einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik	79
3.1	Definition der Entwicklungs- und Einführungsmethodik	79
3.2	Anforderungen an die Entwicklungs- und Einführungsmethodik	80
3.3	Konzept für die Entwicklungs- und Einführungsmethodik	82
4.	Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation	85
4.1	Kurzvorstellung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik	85
4.1.1	Überblick über das 4-Phasenmodell	85
4.1.2	Projektmanagement – Steuerung über <i>gates</i>	87
4.1.3	Zusammenhang zwischen MVM und 4-Phasenmodell	88
4.2	Phase I – Analyse	92
4.2.1	Analyse im Bereich Technik	92
4.2.2	Der Bereich Organisation	95
4.2.3	gate B - Potentialbewertung	98
4.3	Phase II – Konzept	98
4.3.1	Technik und Organisation als Rahmen der Konzeptphase	99
4.3.2	Konzeptentwicklung und Auswahl als Kern der Konzeptphase	100
4.3.3	gate C - Konzeptfreigabe	102
4.4	Phase III – Realisierung	102
4.4.1	Technik und Organisation als Rahmen der Realisierungsphase	103
4.4.2	Realisierung des Projektierungswerkzeuges	103
4.5	Phase IV – Reflexion	108
4.6	Zusammenfassung	109
5.	Evaluation	111
5.1	Phase I - Analyse	112
5.1.1	Analyse Technik	112

5.1.2	Analyse Organisation	119
5.1.3	Ergebnisse der Analysephase	123
5.1.4	gate B – Potentialbewertung	124
5.2	Phase II - Konzept	124
5.2.1	Randbedingungen und Anforderungen	124
5.2.2	Formulierung konkreter Anforderungen zur Konzeptauswahl	125
5.2.3	Konzepterstellung	128
5.2.4	Konzeptbewertung und -auswahl	131
5.2.5	gate C – Konzeptfreigabe	132
5.3	Phase III – Realisierung	132
5.3.1	Ausarbeitung des Werkzeuges und Validierung	132
5.3.2	Planung der Einführung	136
5.3.3	Adaption / Entwicklung Technik	137
5.3.4	Adaption / Entwicklung Organisation	140
5.3.5	Einführung des Projektierungswerkzeuges	141
5.4	Phase IV – Reflexion	145
5.5	Fazit der Anwendung des 4-Phasenmodells	147
6.	Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick	149
6.1	Anforderungserfüllung durch die Entwicklungs- und Einführungsmethodik	150
6.2	Reflexion der entwickelten Ansätze	153
6.3	Diskussion der Allgemeingültigkeit	154
6.4	Ausblick	155
7.	Abbildungsverzeichnis	157
8.	Abkürzungsverzeichnis	161
9.	Literatur	163
10.	Anhang	179
	Gegenüberstellung 4-Phasenmodell und Anwendung während der Fallstudie	179
11.	Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung	183

1. Einleitung

„Das Problem besteht darin, dass wir in ganz kurzer Zeit von einer Wachstumsphase ohne Vergleich in den letzten Jahrzehnten in eine totale Depression gefallen sind.“ (H.-H. THIELE 2009, S. 20)

Die durch einen Bankenkollaps im Jahr 2008 ausgelöste Weltwirtschaftskrise hat alle Bereiche der Wirtschaft erfasst. Auch der Maschinen- und Anlagenbau ist schwer betroffen und kämpft mit Auftragsrückgängen von durchschnittlich ca. 46% im ersten Halbjahr 2009 im Vergleich zum Vorjahreszeitraum (GILLMANN 2009). Angesichts solch dramatischer Zahlen ist es einsichtig, dass ein *einfach unverändertes Weitermachen* an dieser Stelle nicht möglich ist. Das liegt weniger an dieser erdrutschartigen Rezession als an den Entwicklungen, welche schon davor zu Veränderungen mahnten und nun durch die aktuelle Entwicklung in den Vordergrund treten.

Schon vor mehr als 25 Jahren haben BAUMANN & LOOSCHELDERS (1982) aufgezeigt, dass besondere Gegebenheiten (siehe Abbildung 1-1) in den Branchen des Maschinen- und Anlagenbaus dazu führen, dass sich diese Unternehmen stetig weiterentwickeln müssen. Dabei verwiesen sie auf diverse Effekte wie die schnelle Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse, steigende Komplexität und verkürzte Lebensdauer der Produkte, höhere Durchsatzmengen und Produktgüte, steigende Automatisierungsraten sowie steigende Erwartungen auf Kunden- bzw. Auftraggeberseite. Schon damals wurden die schwindende Bedeutung der Marktgrenzen und die Verschärfung der Wettbewerbssituation hervorgehoben, wenn Konsequenzen wie der Zwang nach kürzeren Entwicklungszeiten, Kräftebündelung, Rationalisierung und der Einsatz von Hilfsmitteln genannt wurden.

Folgendes Zitat zeigt 25 Jahre später, also noch vor der aktuell prägenden Krise, die weiterhin starke Präsenz dieses Phänomens: „[...] die Auswirkungen der in aller Munde befindlichen Globalisierung, wie etwa ein verschärfter weltweiter Wettbewerbsdruck, stellen immer anspruchsvollere Anforderungen an Unternehmen, deren Produkte und Dienstleistungen“ (BRAUN 2005). Weiter wird dort darauf hingewiesen, dass diese Entwicklung in Deutschland verschlafen worden zu sein scheint, wenn man bedenkt, dass nach einer Aufstellung des Instituts für Wirtschaftsforschung an der Technischen Universität München das Bruttoinlandsprodukt von 1995 bis 2004 im EU-Durchschnitt um 21%, in der BRD dagegen nur um 11,9% angestiegen ist (SINN 2005, S. 18). Damit rangierte die Bundesrepublik, im Hinblick auf das Wachstum, bereits vor der Finanz- und Wirtschaftskrise vor Moldawien am Ende der Europäischen Nationen. Daraus lässt sich ableiten, dass versäumt wurde, mit ausreichenden Maßnahmen den verschärften Randbedingungen zu begegnen. GRIEVES (2006, S. 244) hat als möglichen Grund dafür festgestellt, dass viele Unternehmen überzeugt sind, der Erfolg in ihrem jeweiligen Handeln habe ihnen bis heute Recht gegeben. Er prägt hierzu den Begriff „*Que sera, sera* Strategie“¹. Einem derartigen Verhalten steht die Überzeugung entgegen,

¹ Que sera, sera (Spanisch) heißt sinngemäß übersetzt: „Es kommt, wie es kommt.“

dass Unternehmen zwingend die Fähigkeit entwickeln müssen, flexibel zu reagieren (BUNGARD 2005)². Die aktuelle Finanz- und Wirtschaftskrise scheint dies zu bestätigen.

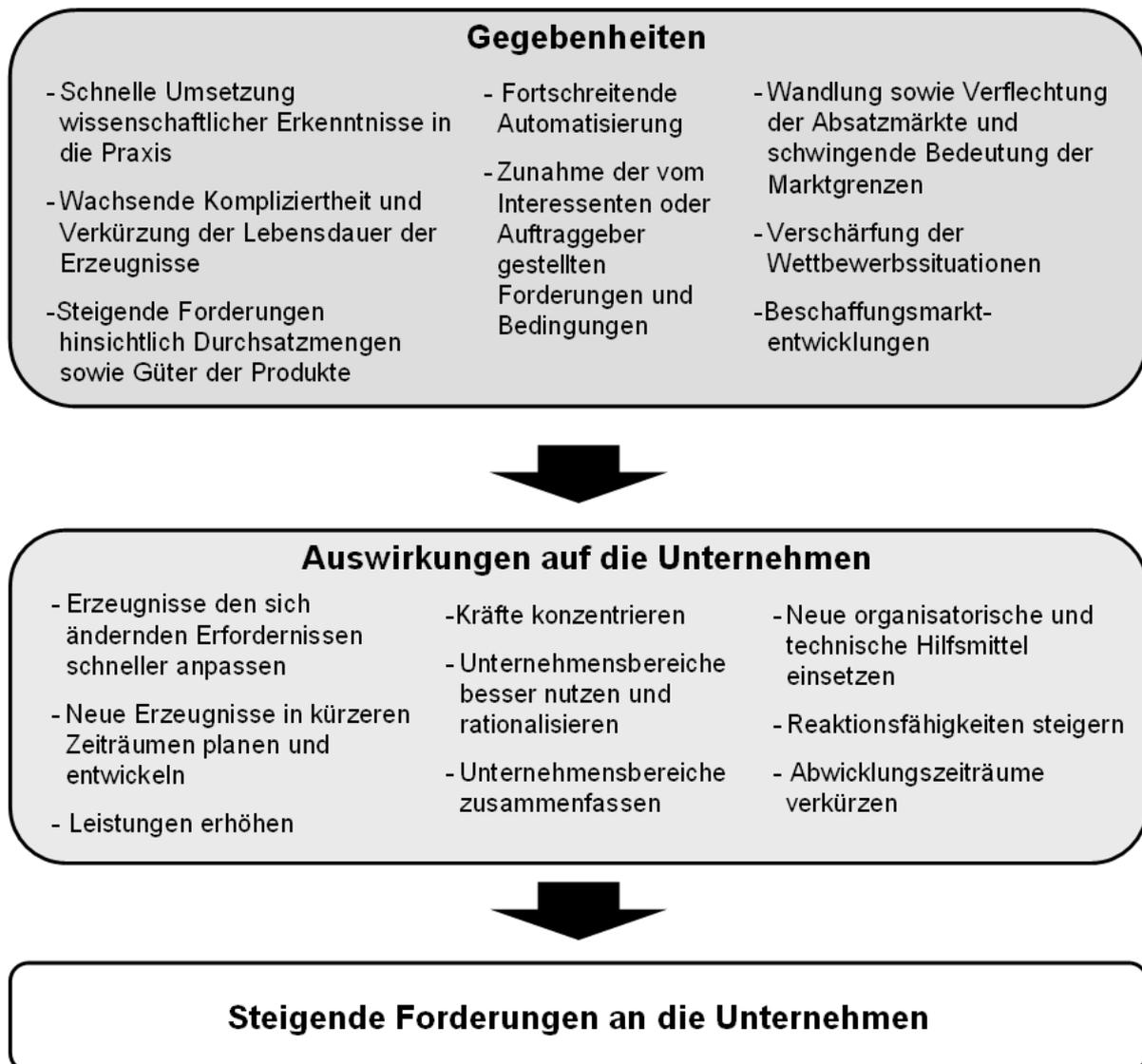


Abbildung 1-1: Gegebenheiten bei den Anlagen-, Maschinen-, Geräte- sowie Apparatebauunternehmen und deren Auswirkungen auf diese Unternehmen. (nach BAUMANN & LOOSCHELDERS 1982)

Der Industriezweig des Maschinen- und Anlagenbau zeichnet sich seit Jahren durch eine schwierige globale Wettbewerbssituation aus, welche durch einige, extrem erfolgreiche Jahre der jüngeren Vergangenheit überdeckt wurde und nun durch die Weltwirtschaftskrise besonders deutlich hervortritt. Es erscheint heute wichtiger denn je, ungenutztes Potenzial zur Verbesserung von Produkten und Prozessen aufzudecken und zu nutzen. Hier gilt es insbesondere

² „In der von hoher Dynamik, Fusionen, Globalisierung, kurzen Innovationszyklen und damit insgesamt raschen Veränderungsprozessen geprägten Geschäftswelt ist hohe Flexibilität überlebensnotwendig.“ (BUNGARD 2005)

für deutsche Unternehmen, die Vorteile in vielen Bereichen wie z.B. die Beherrschung komplexer Prozesse oder auch die Sicherstellung hoher Produktqualität zu erhalten, um die vergleichsweise hohen Lohnkosten auszugleichen. Dies gilt mit großer Wahrscheinlichkeit für alle Bereiche und Prozesse des Maschinen- und Anlagenbaus.

1.1 Fokus

Ein Blick in den Infrastruktursektor, speziell in den Bahnbereich, bestätigen die oben beschriebenen Eindrücke. Hier haben sich die Märkte und deren Abläufe in den letzten Jahren deutlich verändert. Neue private, übernational agierende Betreiberfirmen setzen die staatlichen Bahnbetreiber unter Druck. Die ehemaligen Monopolisten sind im Zuge von Privatisierungen, bzw. Teilprivatisierungen zu großen Veränderungen gezwungen. ANDERHEIDEN (2006) beschreibt die Situation in Deutschland wie folgt: „Als Teil der Daseinsvorsorge waren Post, Bahnen und Energieversorgungsunternehmen lange Zeit Teil der staatlichen Leistungsverwaltung. Seit 1994 hat sich der Staat jedoch aus diesen Bereichen zurückgezogen.“ (ANDERHEIDEN 2006, S. 374). Dies stellte sich wie folgt dar: „Die dann 1994 in Angriff genommene Bahnreform löste das bis dahin bestehende Sondervermögen ‚Deutsche Bundesbahn‘ (Art. 87 I 1 GG a.F.) auf und organisierte die Deutsche Bahn AG als privatwirtschaftliche Aktiengesellschaft in der Hand des Bundes. [...] Wettbewerbern sollten durch die Möglichkeit der Mitbenutzung fremder Schienenwege (§ 14 AEG), sowie durch Ausschreibungswettbewerb und Subventionierung (§ 14 AEG) auf die Schiene geholfen werden.“ (ANDERHEIDEN 2006, S. 376). Gleichwohl weist der Autor darauf hin, dass der Wettbewerb nicht den erwarteten Umfang erreicht hat. Dennoch kann man daraus eine grundlegende Veränderung im Bahnbereich ableiten, welche zu großen Umwälzungen in den Institutionen und Unternehmen geführt hat und weiter führen wird.

Derartige Veränderungen bleiben nicht ohne Konsequenzen für die Fahrzeugbauer. Galten früher Länder oder Regionen für diese Firmen als ausreichende Märkte, so sind sie im Zuge der Globalisierung weltweit tätig und müssen sich auch auf ihren ursprünglich sicheren Heimatmärkten der weltweiten Konkurrenz stellen. Der früher eher träge und sich langsam verändernde Markt der Eisenbahn hat dadurch einen gewaltigen Umbruch mit folgenden Effekten hinter sich:

- zunehmende Konkurrenzsituation
- Kostendruck und höhere Qualitätsanforderung
- kürzere Projektierungs- und Entwicklungszeiten³

Darüber hinaus wurden die Fahrzeugbauer in einem grundlegenden Wandel durch die Betreiber gezwungen, die Systemführerschaft zu übernehmen. Dies führte in Kombination mit der starken Wettbewerbssituation und dem rapidem Preisverfall in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts zu einer sehr starken Verdichtung auf Seiten der Fahrzeugbauer. Am Ende blieben wenige marktbeherrschende Systemhäuser übrig. (ZWICKE 2003, S. 53f)

³ Projektierung: vgl. Definition Kapitel 2.2.2.

Kleinere Unternehmen der Bahnindustrie sind zwischenzeitlich wieder neu in die Märkte eingetreten und verstärken den Wettbewerb auf diesem Markt zusätzlich zu der bereits bestehenden internationalen Konkurrenz (KRUMMHEUER 2008).

In diesem Umfeld werden alle konkurrierenden Hersteller seit den Bahnbetreiberprivatisierungen mit einer Vielzahl zusätzlicher Aufgaben konfrontiert.

1.1.1 Defizite im Engineering von Schienenfahrzeugen

Die Fahrzeugbauer müssen im Rahmen der oben beschriebenen Rollenänderung ihr Engineering von Schienenfahrzeugen und damit den technischen Bereich um folgende Aufgaben erweitern:

- Definition und Verifizierung der Anforderungen an das Produkt
- Technische Konzeption und Projektierung von neuen Fahrzeugen und ganzen Fahrzeugfamilien
- Durchführung von Vorentwicklungen und Vorerprobungen
- Absicherung der Erfüllung von systemübergreifenden Anforderungen und Funktionalitäten
- Technische und kommerzielle Führung der Lieferanten von Schlüsselkomponenten wie z.B. Drehgestell, Traktion, Bremse, Klimatisierung oder Türen
- Inbetriebsetzung
- Vollständige Validierung des Produktes
- Nachweisführung zur Erlangung der Zulassung
- Führung von Sicherheitsnachweisen, umfangreichen Dokumentation
- Produktbetreuung in der Gewährleistungs- und Betriebsphase

Zur Bewältigung dieser neuen Aufgaben wurden die dazu notwendigen technischen Kompetenzen zumeist in den ehemaligen Konstruktionsabteilungen aufgebaut, die heute deshalb unter dem Begriff Engineering geführt werden. Die Mitarbeiter dieser Abteilungen müssen sich dazu von eher bauraumorientierten Konstrukteuren zu funktional systemverantwortlichen Ingenieuren entwickeln. (ZWICKE 2003, S. 54f)

Aus der allgemein gültigen Feststellung, dass für den Erfolg von Unternehmen die richtigen Methoden, Werkzeuge und Technologien entscheidend sind (KIBNER & STÜRING 2005), ergibt sich für die Fahrzeugbauer die Suche nach geeigneter Unterstützung für die Bewältigung insbesondere der neuen Aufgaben.

Konkret erkannten die Fahrzeugbauer die problematische Situation, die sich aus den oben genannten neuen Aufgaben und den durch die verstärkte Wettbewerbssituation einhergehenden Zusatzaufwand, der durch die Anzahl an parallel zu bearbeitenden Angebotsvarianten, Projekten, Neu- und Altaufträgen deutlich steigt, ergibt (KRUMMHEUER 2008). Daraus abgeleitet wurden neue Entwicklungs-, Controlling-, Projektmanagement- und Personalführungswerkzeuge eingeführt. Diese konnten aber bislang noch nicht ihre volle Leistungsfähigkeit

erreichen (ZWICKE 2003, S. 55f). Folglich ergibt sich zum einen, dass die Akzeptanz für neue Hilfsmittel besonders gering ist, wenn Mitarbeiter sich vielen neuen Herausforderungen gleichzeitig stellen müssen. Zum anderen folgt daraus, dass Einführungsaufgaben hohe Aufmerksamkeit erfordern und im Idealfall visionär angebahnt, geplant und durchgeführt werden müssen.

Bei aktuellen Schienenfahrzeugprojekten handelt es sich durchschnittlich um Aufträge mit einem Volumen von 150 Fahrzeugen, bzw. ca. 250 Mio. €, die von der Angebotslegung bis zum Ende der Gewährleistung fünf bis sieben Jahre dauern. Auf Seiten der Fahrzeugbauer sind im Engineering ca. 150 Mitarbeiter beteiligt. Ohne die Lieferanten zu berücksichtigen ergibt sich in derartigen Projekten ein Aufwand von etwa 200.000 Stunden im Bereich Engineering (ZWICKE 2003, S. 57).

Obwohl derartige Systementwicklungen niemals komplette Neuentwicklungen sind (PAHL ET AL. 2007), ergeben sich mit dem Beginn der Fahrzeugprojektierung allein auf Grund der Projektdimensionen (Umsatz und Entwicklungsaufwand) und den projektspezifischen Anforderungen technische und kommerzielle Risiken (BROWNING ET AL, 2002). Dies gilt für alle Beteiligten, sowohl für Betreiber, als auch für Fahrzeugbauer und deren Lieferanten. Denn bereits im Rahmen der Auftragsvergabe wird zwischen Betreiber und Fahrzeugbauer, bzw. zwischen Fahrzeugbauer und Systemlieferant eine Vielzahl von grundsätzlichen Systemeigenschaften festgelegt. Dieses, für Projekte im Schienenfahrzeugbereich ebenso wie für andere Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus, übliche Prozedere führt dazu, dass die Weichen für den späteren Erfolg oder Misserfolg eines Projektes bereits während der Projektierung gelegt werden (LINDEMANN 2007, S. 196). Aus diesem Anlass soll sich diese Arbeit auf die frühen Phasen dieser Schienenfahrzeugprojekte fokussieren.

Die frühe Phase *Projektierung* beginnt mit den Ausschreibungen durch den Betreiber, welche die wesentlichen Anforderungen an das Fahrzeug definieren. Die potentiellen Fahrzeugbauer arbeiten systemtechnische Angebote mit dem Ziel der Auftragserringung aus, welche die technischen und kommerziellen Anforderungen der Ausschreibung so weit wie möglich erfüllen. Hierzu sind wesentliche Systemeigenschaften sowohl auf Fahrzeug- als auch auf Subsystem- bzw. Komponentenebene bereits festzulegen.⁴ Die Fahrzeugbauer müssen somit bereits für das Angebot ein technisches System vorauslegen.

Früher vorhandenes Expertenwissen ist mit der nicht verlustfreien Verlagerung der Systemführerschaft auf die Fahrzeugbauer verloren gegangen. Die Vielfalt in den Fahrzeugen, welche in sich komplexe Systeme darstellen, ist durch den Strukturwandel in der Bahnindustrie und den Versuch der Überwindung bisher bestehender Systemgrenzen deutlich gestiegen (ZWICKE 2003, S. 53f). Dadurch ergibt sich eine sehr große Varianz von komplexen technischen Systemen. Diese Erkenntnisse und das Wissen über einen direkten Zusammenhang zwischen Unternehmenserfolg und eingesetzten Methoden und Werkzeugen (KIBNER & STÜRING 2005) führen zu der Schlussfolgerung und dem dringenden Bedarf, die technische Auslegung noch stärker, eventuell sogar mit neu zu entwickelnden Werkzeugen, in ihrer Effektivität und Effizienz zu unterstützen.

⁴ Vgl. Systemdefinition in Kapitel 2.2.1.

1.1.2 Status Quo der Systemauslegung während der Projektierung

In gut strukturierten Unternehmen im Anlagenbau werden die Projektierungsingenieure bei der Projektanalyse im Wesentlichen durch folgende Stützpfiler unterstützt: (ABMANN 1996, S. 8ff; FÖRSTER 2003, S. 17ff; SCHWANKL 2002, S. 39ff):

- Projektierungsrichtlinien
- Musterprojektierungen
- Vorgängerprojektierungen und deren Systembeschreibungen
- Gerätebeschreibungen
- Berechnungsprogramme/-tools zur Systemauslegung
- Berechnungsprogramme/-tools zur Auswahl einzelner Gerätearten oder Gerätedimensionierungen
- Systemversuche im Rahmen der Projektierungsarbeit
- Erfahrungsrückfluss aus dem Systemeinsatz im Betrieb (Lessons Learned)

Die Zuverlässigkeit und Qualität der Projektierung hängt stark vom Know-how der handelnden Experten ab, besonders wenn die wichtigste Informationsquelle die langjährige Betriebs Erfahrung und die dabei entstandenen Rückmeldungen zu dem realen Einsatz der ausgelegten Systeme ist.

Die Systemingenieure passen vorhandene Lösungen geprägt durch variierendes Expertenwissen und verschiedene Interpretation der Kundenspezifikation sehr unterschiedlich an (PONN 2007, S. 138). Bei Systemen mit an sich identischen Anforderungen führt dieses zu einer mutationsgleichen Varianz, die besonders im speziellen Fall von Wissensverlust langfristig nur wenig zielgerichtet verläuft. Die seit 1982 von BAUMANN & LOOSCHELDERS beschriebene zufallsartige und erfahrungsbedingte Projektierung und Konstruktion hat sich zumindest auf den ersten Blick bis in die Gegenwart nicht viel verändert.

Die Systeme bestehen in der Regel aus bekannten Komponenten, welche für die projektspezifischen Anwendungen zusammengestellt werden. Die Konfiguration des Gesamtsystems Fahrzeug und seiner Subsysteme sowie deren leittechnische Einbindung ins Fahrzeug stellen dabei häufig ein Novum dar. Die Systemvarianz wird durch die steigende Individualisierung im Bahnsektor zusätzlich erhöht (ANDERHEIDEN 2006; ZWICKE 2003). Für ein Projekt ist davon auszugehen, dass nahezu kein Fahrzeug und kein Einsatzort identisch zum letzten oder nächsten sind. Selbst Teilsysteme und Komponenten sind neu auszulegen. Ziel muss es sein, die technische und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen, indem Überdimensionierungen vermieden werden, die über die erforderlichen Sicherheitsaufschläge hinausgehen. Das zu projektierende Fahrzeugsystem ist daher detailliert auf seinen Einsatzzweck anzupassen und zu optimieren.

Die Felderfahrung greift aber nicht bei Neuentwicklungen von Komponenten und Teilsystemen. Verschiedene Konfigurationen können zwar grundsätzlich per Systemversuch vorab untersucht werden (SCHWANKL 2002, S. 39ff), aber mangelnde Zeit, Ressourcen und Kundenbudget lassen ausgeprägte projektierungsbegleitende Systemanalysen nur im Einzelfall zu.

Es verbleibt keine wirtschaftlich vertretbare Möglichkeit mit den bislang vorhandenen Projektierungswerkzeugen das Optimum der Auslegung zu erreichen. Mit zusätzlichen Sicherheitsaufschlägen muss verbleibendem Restrisiko während der Auslegung begegnet werden.

Eines der wichtigsten Teilsysteme eines Schienenfahrzeuges ist das Bremssystem. Moderne pneumatische⁵ Bremssysteme für Schienenfahrzeuge sind komplexe mechatronische Systeme mit einer hohen Anzahl zusammenwirkender Elemente. Es handelt sich um stark individualisierte Anlagen, die fahrzeug-, betreiber-, landes- und auch projektspezifisch eine hohe Varianz aufweisen. Ihre große Bedeutung wird Bremssystemen und ihrer Entwicklung vor allem aus zwei Gründen zugemessen. So sind Bremssysteme durch ihre Funktion maßgeblich für den zuverlässigen Betrieb von Schienenfahrzeugen und damit direkt für die Sicherheit von Leib und Leben von Menschen, sowie den Schutz der Umwelt verantwortlich. Darüber hinaus ist dieses System sehr umfangreich und kostenintensiv⁶.

Auf Grund ihrer Bedeutung und dem Aufwand für die Projektierung eignen sich Bremssysteme besonders gut als Beispielszenario für die Entwicklung und Einführung eines modernen Werkzeuges zur Unterstützung der Projektierung.

1.1.3 Pneumatiksimulation⁷ als Projektierungswerkzeug

Modellbildung und Simulation werden in vielen sehr unterschiedlichen Bereichen unter anderem auch zur Eigenschaftsfrüherkennung und Optimierung eingesetzt (vgl. Kapitel 2.3.2). Das Verhalten komplexer Systeme kann damit bereits vorab prognostiziert werden. Dies führt zu der These, dass diese Methoden und Werkzeuge auch zur Systemauslegung in der frühen Phase geeignet sind und die beschriebenen Randbedingungen für die Projektierenden verbessern. Am Beispiel der Auslegung von pneumatischen Systemen als repräsentative Auslegungsaufgabe im Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus soll dies untersucht und validiert werden.

Der oben beschriebene Status Quo der Auslegung technischer Systeme für die Angebotserstellung führt auch zu der Annahme, dass die projektierten Systeme häufig ungewollt überdimensioniert sind und bedeutendes Optimierungspotenzial vorhanden ist.

RICHTER & IBERLE (1992) postulieren, dass Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Kosten einer komplexen Anlage nicht nur von der Qualität der Einzelkomponenten abhängig sind, sondern, dass sie in besonderem Maße durch deren Zusammenwirken bestimmt werden. Dies ist ein generelles Kennzeichen komplexer Systeme (BOARDMAN & SAUSER 2006) und führt zu der Überlegung, mit welchen Möglichkeiten eine effizientere Auslegung von Systemen erfol-

⁵ In der Regel werden Trambahnen mit hydraulischen Bremssystemen ausgestattet. Darüber hinaus gibt es nur sehr wenige, meist Nahverkehrszüge, die nicht mit pneumatischen Bremssystemen ausgestattet sind.

⁶ Expertenschätzungen zufolge entfallen ca. 10% der Kosten eines Schienenfahrzeuges auf das Bremssystem

⁷ Numerische Simulation pneumatischer Systeme: Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die „numerische Simulation pneumatischer Systeme“ meist auf „Pneumatiksimulation“ reduziert. Beide Ausdrücke finden in dieser Arbeit gleichbedeutend Verwendung. Eine ausführliche Definition des Begriffes erfolgt in Kapitel 2.3.

gen und unterstützt werden kann. Die Effizienz ist hierbei zu betonen, da die weitläufig niedrige Auftragswahrscheinlichkeit nur geringen Aufwand für die Initialprojektierung zulässt.

Systeme werden an vielen Stellen aus Unkenntnis der detaillierten Leistungszusammenhänge überdimensioniert ausgelegt. Mit Hilfe des Einsatzes der numerischen Simulation pneumatischer Systeme kann es gelingen, einerseits die pneumatischen Nadellöcher gezielt zu lokalisieren und an die Leistungsanforderungen anzupassen, sowie andererseits die pneumatisch unwirksamen Überdimensionierungen an pneumatisch unkritischen Stellen zu vermeiden. Hierdurch lassen sich spürbare Kosteneffekte erzielen.

Die numerischen Simulationen können jedoch grundlegende Versuche bei der Komponenteneentwicklung auf absehbare Zeit nicht ersetzen. Der Aufwand notwendiger Variationen des Gesamtsystems lässt sich aber durch den Einsatz moderner Werkzeuge, wie der Simulation pneumatischer Systeme mit absichernden Grundlagenversuchen, erheblich reduzieren.

Neben diesem Ansatz der Systemoptimierung gibt es weiteres Potenzial für den Einsatz der Pneumatiksimulation in der Projektierung. Auslegungswerkzeuge⁸ können verwendet werden, um die negativen Folgen von zu großer Variantenvielfalt durch ein sinnvolles Variantenmanagement⁹, mit seinen wesentlichen Maßnahmenbereichen, *Varianten reduzieren*, *Varianten beherrschen* und *Varianten vermeiden*, zu bekämpfen (WILDEMANN 2009). Z.B. steigen die Stückkosten bei sinkenden Stückzahlen und gleichbleibenden bzw. steigenden Verwaltungskosten.

Die beiden, durch den Einsatz der Pneumatiksimulation, verfolgten Ziele „Systemoptimierung“ und „Unterstützung des Variantenmanagements“, können sich widersprechen und so zu einem Konflikt führen. Produkte und Systeme können in der Individualisierung auf spezifische Kundenanforderungen hin gezielt optimiert werden. Die Variantenvielfalt steigt jedoch in den Systemen und ihren Elementen durch eine derartige Individualisierung. Ein funktional auf die Systemanforderungen optimal ausgelegtes System kann wegen den geringeren Stückzahlen einer Kostensenkung im Weg stehen. Dieser Widerspruch zwischen den beiden Zielrichtungen *Kosten* und *Qualität*¹⁰ beim Einsatz der numerischen Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug gilt es, wie in der Abbildung 1-2 dargestellt, zu lösen. Das Problem der hohen Variantenvielfalt führt zum Einsatz von Projektierungswerkzeugen, welche die Standardisierung unterstützen. Gleichzeitig wird das Ziel optimierter Systeme

⁸ FÖRSTER (2003) erwähnt als Beispiele für Werkzeuge des Variantenmanagements bezogen auf Systeme und Subsysteme unter anderem Zusatzfunktionen in den bereits verwendeten CAD-Systemen. Solche Funktionen zur Variantenvermeidung können auch in den Auslegungswerkzeugen implementiert werden.

⁹ Definition Variantenmanagement nach SCHUH (2001): „Das Variantenmanagement umfasst die Entwicklung, Gestaltung und Strukturierung von Produkten und Dienstleistungen, bzw. Produktsortimenten im Unternehmen. Dadurch wird angestrebt, die vom Produkt ausgehende Komplexität (Anzahl Teile, Komponenten, Varianten, usw.) wie auch die auf das Produkt einwirkende Komplexität (Marktdiversifikation, Produktionsabläufe, usw.) mittels geeigneter Instrumente zu bewältigen.“

¹⁰ Qualität wird laut der Norm DIN EN ISO 9000 (2005) als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“, definiert.

(Steigerung der System-Qualität) über Projektierungswerkzeuge verfolgt. Ziel dieser Arbeit soll es daher sein, den dadurch entstehenden Konflikt mittels eines geeigneten Kompromisses in einem integrierenden Projektierungswerkzeug aufzulösen.

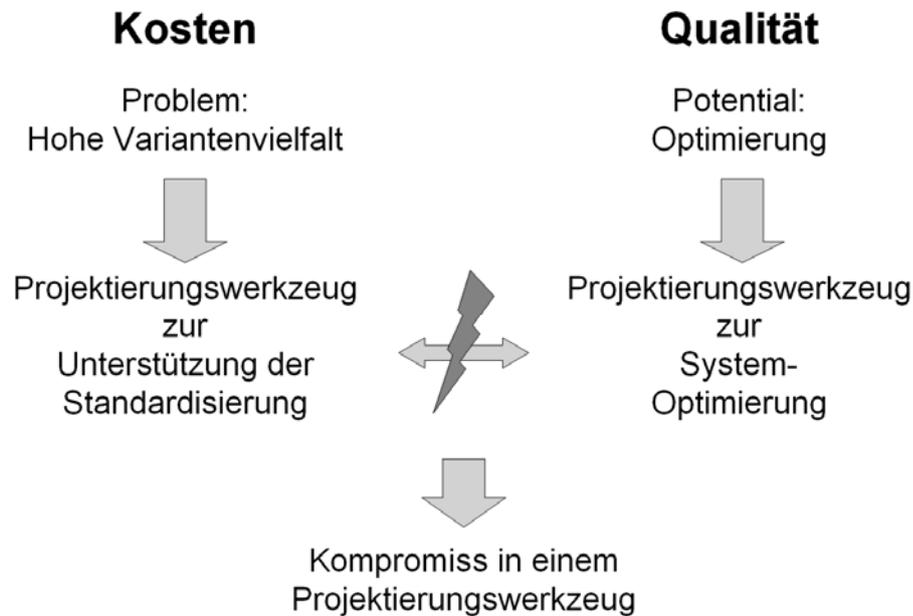


Abbildung 1-2: Widerspruch zwischen Systemoptimierung und Systemstandardisierung

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

In der Auftragsakquise zeigt sich die aus der Globalisierung resultierende und oben beschriebene Verschärfung der Konkurrenzsituation im Maschinen- und Anlagenbau besonders. Um Markteintrittsgrenzen zu überwinden, verschärfen neue potentielle Marktteilnehmer durch sogenannte Kampfangebote die Situation für die etablierten Parteien (KRUMMHEUER 2008). Die etablierten Anbieter verhalten sich wiederum ähnlich auf für sie neuen Märkten. Daraus resultiert für sie der Zwang zur Optimierung sämtlicher Prozesse der Kundenprojektierung, um kosteneffizient präzise Angebote erstellen zu können.

Bei neu zu projektierenden Systemen führt ein hohes Projektvolumen per se zu einem hohem kommerziellen Risiko (ABMANN 1996, S. 7). Die Systemausgestaltung in Kombination mit den dafür erzielbaren Preisen und gegebenenfalls die Erstattung des Entwicklungsaufwandes entscheiden über die Wirtschaftlichkeit eines Auftrages bzw. eines Projektes. Dieses verdeutlicht die Notwendigkeit zur Präzision in der Projektierung der Systeme. Bislang angewendete Werkzeuge scheinen ihre Leistungsgrenze erreicht zu haben, da sie sich auf einen sehr unterschiedlichen Detaillierungsgrad der zur Verfügung stehenden Informationen stützen müssen. In der Folge sind zur Zielerreichung moderne und leistungsfähigere Werkzeuge zur Unterstützung heranzuziehen.

Gerade im speziellen Fall der Angebotslegung kommt hinzu, dass der wirtschaftlich vertretbare Aufwand zur Auslegung während der Projektierung aufgrund von geringen Umwandlungs-

raten¹¹ im Maschinen- und Anlagenbau stark eingeschränkt ist und damit ein möglichst effizientes Vorgehen mit nachhaltiger Zielabsicherung erzwungen wird.

Eine vollständige Absicherung ist nicht möglich. Als Ziel sollen diejenigen Unsicherheiten anteilig reduziert werden, welche die technischen Risiken begründen. (LORENZ 2008, S. 27f)

Moderne Projektierungswerkzeuge müssen die komplexe Aufgabe der Systemauslegung im Rahmen der Projektierungsprozesse optimieren und gleichzeitig mögliche Zielkonflikte mit den Standardisierungsbemühungen des Variantenmanagements lösen.

Das Werkzeug numerische Simulation besitzt ein großes Potential zur Erfüllung der oben beschriebenen Anforderungen. Es wird in Bezug auf das genannte Beispielszenario pneumatischer Bremssysteme bislang nicht durchgängig eingesetzt und bietet die Möglichkeiten, den Projektierungsprozess in der erforderlichen Weise zu unterstützen.

Auf Grund der eingangs erwähnten Erkenntnis, dass es sich bei der Projektierung von derartigen Systemen nie um vollständige Neuentwicklungen handelt (PAHL ET AL. 2007), ergibt sich als Zwischenziel, die gewonnenen Erfahrungen, wie z. B. identifizierte Kostentreiber etc., als Bausteine in ein System zu überführen. Gute Projektierung bedeutet dabei zentrale Prinzipien bewusst bzw. explizit zu machen (HERBIG ET AL. 2006).

Werkzeuge wie die numerische Simulation pneumatischer Systeme können wegen ihrer hohen Komplexität nicht ohne weiteres in Projektierungswerkzeuge umgewandelt werden. Auch die Einführung selbst bedeutet erheblichen Aufwand. Es muss dabei z.B. berücksichtigt werden, dass erfahrene Projektierer grundsätzlich eher ihrem Bauchgefühl vertrauen, scheinbar einsatzbewährte Systeme lieber nicht antasten und im ungünstigsten Fall gegen neu eingeführte Verfahren zur Auslegung erhebliche Widerstände leisten. Daher ist ein strukturiertes Vorgehen für eine erfolgreiche Einführung erforderlich, welches beide Seiten der Herausforderung berücksichtigt.

Der wesentliche Kern ergibt sich damit aus der Beschreibung der Problemstellung: Abbildung 1-3 stellt ihn als die Kombination der beiden Wirkungsfelder der Dissertation, zum einen die *Simulationstechnologie* und zum anderen das *Change Management* dar. Jedes einzelne Feld bietet Themen für viele eigenständige wissenschaftliche Arbeiten. Aber gerade die Verbindung beider Wirkungsfelder wirft eine Vielzahl von Fragestellungen auf, die bei einer Einzelbetrachtung unbeachtet bleiben. Fokus der Arbeit ist daher das Aufzeigen einer allgemeingültigen Methodik, zum erfolgreichen Verbinden beider hochkomplexen Themengebiete. Ein erfolgreiches Change Management für ein unwirksames technisches Werkzeug ist ebenso erfolglos wie ein an der Einführung scheiterndes wirksames technisches Werkzeug. Erst das Zusammenspiel von prozessualer Methodik (Change Management) und technischer Methodik (Simulation pneumatischer Systeme) lässt die Projektierungsarbeit gewinnbringend verändern.

Die Dissertation muss daher folgende Frage beantworten: Wie ist ein reproduzierbarer Einführungsprozess für unternehmensspezifischen Randbedingungen zu gestalten, der parallel

¹¹ Umwandlungsrate = Verhältnis zwischen abgegebenen Angeboten und erhaltenen Aufträgen (vgl. Trefferquote Kapitel 2.2.3)

die Entwicklung eines komplexen Projektierungswerkzeuges vortreibt sowie gleichzeitig seine Einführung und die damit verbundenen Änderungen unter Berücksichtigung sämtlicher soziotechnischer Aspekte im Change Management plant und durchführt?

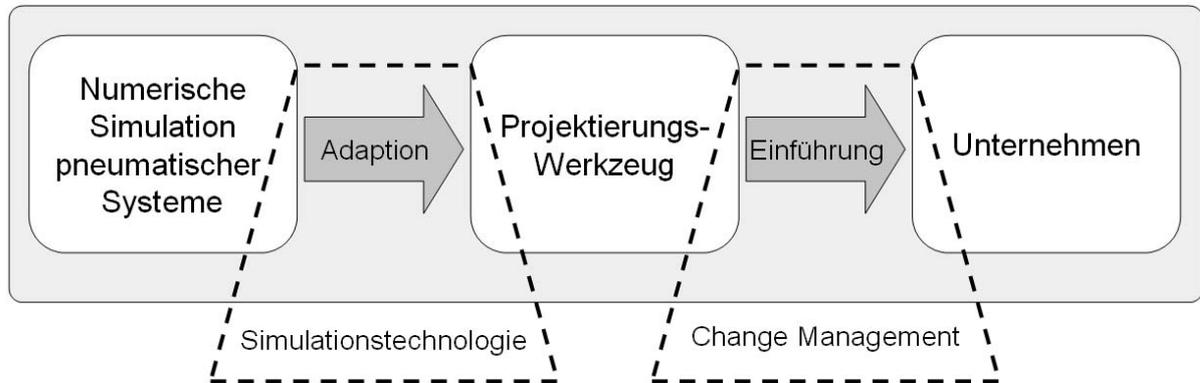


Abbildung 1-3: Die Wirkungsfelder der Dissertation

1.3 Thematische Abgrenzung

Mit den nachfolgenden Ausführungen wird der Gegenstand der Arbeit thematisch in den relevanten theoretischen Kontext eingeordnet. Abbildung 1-4 zeigt die involvierten Themenbereiche Einführung, Projektierung und Pneumatiksimulation entsprechend des Titels der Arbeit auf. Sie sind die relevanten Ansatzpunkte für die durchzuführenden Analysen insbesondere zum Stand der Technik. Die drei Schwerpunkte werden nachfolgend in der Reihenfolge des Kapitels zum Stand der Technik betrachtet und abgegrenzt.

Entwicklungs- und Einführungsmethodik¹²: Das zu analysierende Gebiet der Wissenschaft zu Change Management im Zusammenhang mit der Einführung von Werkzeugen ist zu groß, um im Rahmen dieser Arbeit einen vollständigen Überblick zu geben. Aus diesem Grund sind vorrangig Bereiche mit dem Fokus auf komplexe Werkzeuge zu untersuchen. Bereits bestehende Einführungsansätze für die im Kern dieser Arbeit stehenden Simulationswerkzeuge sind von besonderer Bedeutung. Dabei ist es sekundär, ob sie sich auf Individual- oder Standardsoftware beziehen. Die Analyse zu diesen Ansätzen verdeutlichte aber sehr schnell, dass der Einführungsprozess bei den meisten derartigen wissenschaftlichen Untersuchungen zugunsten der technischen Betrachtung des Werkzeuges vollständig vernachlässigt wird. Daher ist das Recherchefeld weiter zu fassen. Gleiches gilt für die untersuchte Einführung von CAX-Systemen in der erweiterten Betrachtung. Die erneute Ausweitung der Untersuchung ergibt, dass der Fokus auf einen Einführungsprozess insbesondere in der Methodenforschung zur Produktentwicklung gerichtet wird. Diese weitreichenden Untersuchungen zur Methoden- und Werkzeugintegration bieten für diese Arbeit wichtige Ansätze. Eine wesentliche Erkenntnis aus diesen Forschungsergebnissen ist die Bedeutung der Integration in Organisation

¹² Nach LINDEMANN (2007) ergibt das „Zusammenwirken verschiedener Einzelmethoden“ eine Methodik. Die Definition von Methoden findet sich in Kapitel 2.1.1.

und Prozesse im Unternehmen (KLEEDÖRFER 1998, S. 55ff). Dies gibt einen Hinweis auf weitere Ansätze aus dem Feld der Planungs- und Steuerungssysteme. Diese weisen meist eine hohe Komplexität auf und sind nur mit hohem Integrationsaufwand erfolgreich einzuführen. Hinweise auf die hier diskutierte Aufgabe der Einführung eines Projektierungswerkzeuges sind auf jeden Fall zu suchen.

Projektierungswerkzeug: Der Begriff der Projektierung wird sehr vielfältig interpretiert und daher gilt es im Stand der Technik eine Definition herzuleiten. Auf dieser Basis können unterschiedliche Projektierungsprozesse und Beispiele für Werkzeuge zu deren Unterstützung untersucht werden. Es ist zu klären, welche Eigenschaften Projektierungswerkzeuge auszeichnen oder welche Anforderungen sie erfüllen müssen. Auch das Angebot als Ergebnis eines Projektierungsprozesses lässt sich zum besseren Verständnis allgemein beschreiben. Mit diesen Grundlagen ist ein Blick auf komplexe Systeme als das Objekt der Projektierung zu werfen. Eine Einschätzung der Komplexität und die daraus resultierenden Probleme während der Auslegung in Kombination mit den Besonderheiten des Umfeldes Maschinen- und Anlagenbau, wie z.B. der geringen Umwandlungsraten, können zur Ermittlung der Anforderungen an den Projektierungsprozess und die ihn unterstützenden Werkzeuge dienen. Hierbei stehen Themen wie Robustheit oder einfache Anwendung im Fokus.

Pneumatiksimulation: Das Wissen zum aktuellen Entwicklungsstand der technischen Seite dieser Fragestellung ist neben der Kenntnis der Projektierung und des Umfeldes auch von entscheidender Bedeutung für die Entwicklungs- und Einführungsmethodik einer Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug. Es ist wichtig, die technischen Möglichkeiten und damit die Anpassbarkeit zu kennen, um Werkzeuge auf ihren Anwendungszweck hin adaptieren zu können, wie es in vielen Ausführungen zum Change Management gefordert wird. Über die theoretischen Grundlagen lassen sich die gängigen Ausprägungen beschreiben. An dem in dieser Arbeit verwendeten Systemsimulationswerkzeug wird der aktuelle Stand der Technik der Programme erläutert. Im Kontext der aktuell verfügbaren Softwarelösungen können Standard- und Individuallösungen anhand ihrer Vorteile verglichen werden. Die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Modellbildung und Simulation und der dazu gehörenden Verifizierung und Validierung sind zu ermitteln, um eine Integration in Unternehmensprozesse und die Verwendbarkeit der Simulationsergebnisse beurteilen zu können. Ein Überblick über die Einsatzvielfalt der Modellbildung und Simulation ist sinnvoll für die Beurteilung der Allgemeingültigkeit der Ansätze dieser Arbeit. Es geht im Rahmen dieser Untersuchungen nicht um eine Weiterentwicklung der Simulation pneumatischer Systeme. Vielmehr ist es das Ziel ausreichend genaue Ergebnisse für die Projektierung zur Verfügung zu stellen.

Die Arbeit lässt sich durch diese drei Schwerpunkte thematisch abgrenzen. Aus ihrer Kombination ergibt sich der dringende und notwendige Handlungsbedarf der Arbeit, welcher in wesentlichen Teilen die Anforderungen an die zu generierende Entwicklungs- und Einführungsmethodik definiert.

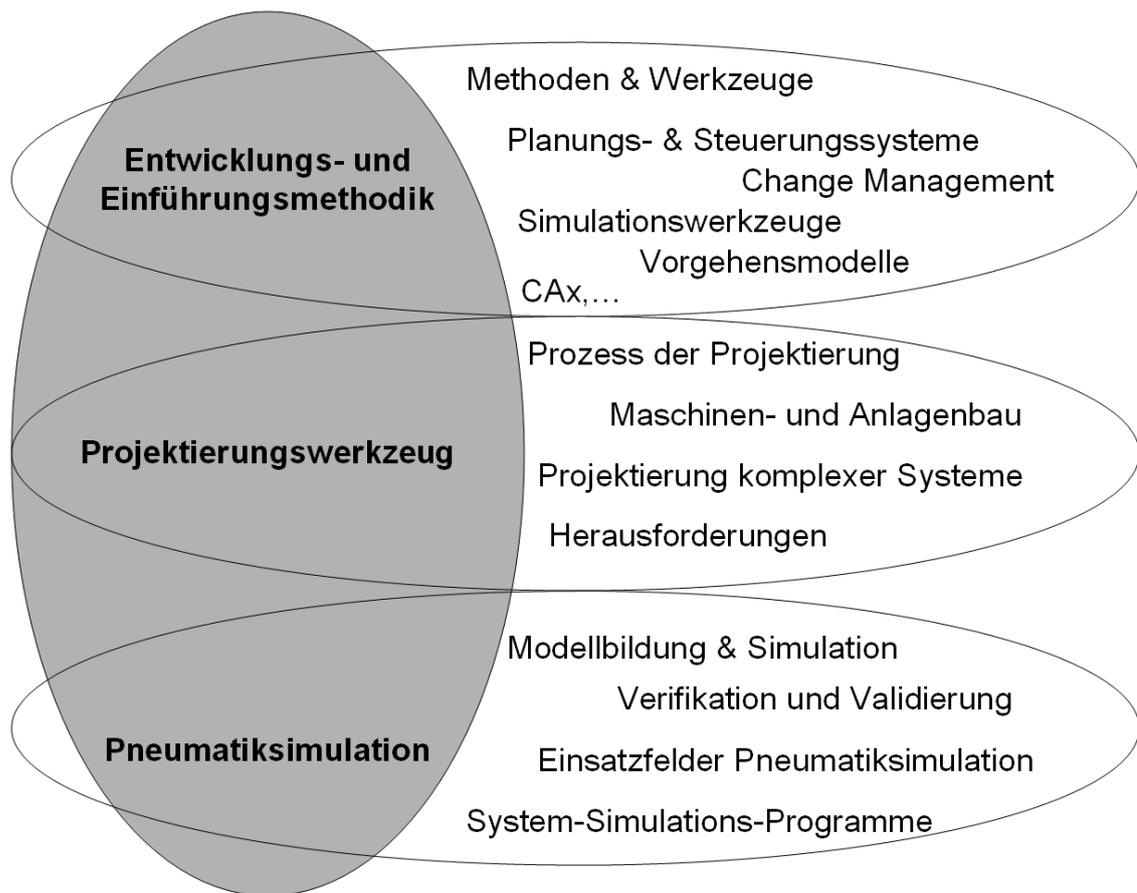


Abbildung 1-4: Thematische Abgrenzung der wesentlichen Schwerpunkte für die Arbeit

1.4 Wissenschaftlicher Ansatz

Das wissenschaftliche Vorgehen dieser Arbeit orientiert sich an den Ausführungen von BRAUN (2005). Er bezieht sich dabei auf BLESSING ET AL., die für den Bereich der Produktentwicklung erklärt haben, dass es das übergeordnete Ziel des ‚Engineering Design Research‘ ist, Wissen, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die der Industrie verbesserte Möglichkeiten eröffnen, erfolgreiche Produkte zu generieren (BLESSING ET AL. 1998, S. 42). Wie BRAUN (2005) für die Entwicklung handlungsleitender Lösungsansätze zur Unterstützung der strategischen Produktplanung soll in dieser Arbeit deren Modell zur Strukturierung des eigenen Vorgehens zur Entwicklung einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation verwendet werden.

Zur Charakterisierung des wissenschaftlichen Vorgehens dieser Arbeit lässt sie sich in das von BLESSING und CHAKRABARTI vorgeschlagene ‚Design Research Methodology Framework‘ einordnen (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 29). Obwohl dieses Modell ursprünglich für den Produktentwicklungsbereich vorgestellt wurde, lässt es sich auch auf die hier diskutierte Problemstellung anwenden. Das liegt vor allem daran, dass es auch hier das Ziel ist, eine Methodik zu erarbeiten mit deren Hilfe Projektierungswerkzeuge entwickelt und eingeführt werden, um in der industriellen Praxis zu besseren Systemen zu führen.

Criteria: Durch das Festlegen von Erfolgskriterien soll in dieser Phase das grundlegende Ziel der Arbeit abgesteckt werden. Diese Kriterien können im Folgenden zur Bewertung der Ergebnisse verwendet werden, indem sie als Anforderungen genau definieren, was die Lösung leisten muss. Das grundlegende Ziel in der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methodik zur Entwicklung und Einführung der numerischen Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug zu definieren. Daraus ergeben sich z.B. als messbare Kriterien nach der Anwendung der Methodik, die Integration des Werkzeuges in den betroffenen Prozess, bzw. die Organisation oder die Leistungsfähigkeit des Werkzeuges im Praxiseinsatz der Projektierung. Die Bewertungskriterien zur Beurteilung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik finden sich im Anschluss an den Stand der Technik (Kapitel 2).

Description I: Die erste Beschreibungsphase dient dazu, aus den beobachteten Einflüssen auf den Betrachtungsgegenstand einen Handlungsbedarf abzuleiten. Anhand der persönlichen Erfahrungen des Autors zur oben erwähnten Problemstellung der Arbeit und der weiterführenden Diskussion mit Interessierten aus dem wissenschaftlichen Umfeld ergaben sich die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Betrachtungsbereich. Auf Basis der Analyse dieser thematischen Schwerpunkte, Projektierung, Werkzeugeinführung und Pneumatiksimulation im Stand der Technik (Kapitel 2), wird der Handlungsbedarf ermittelt und wesentliche Anforderungen an die Entwicklungs- und Einführungsmethodik abgeleitet (Kapitel 3).

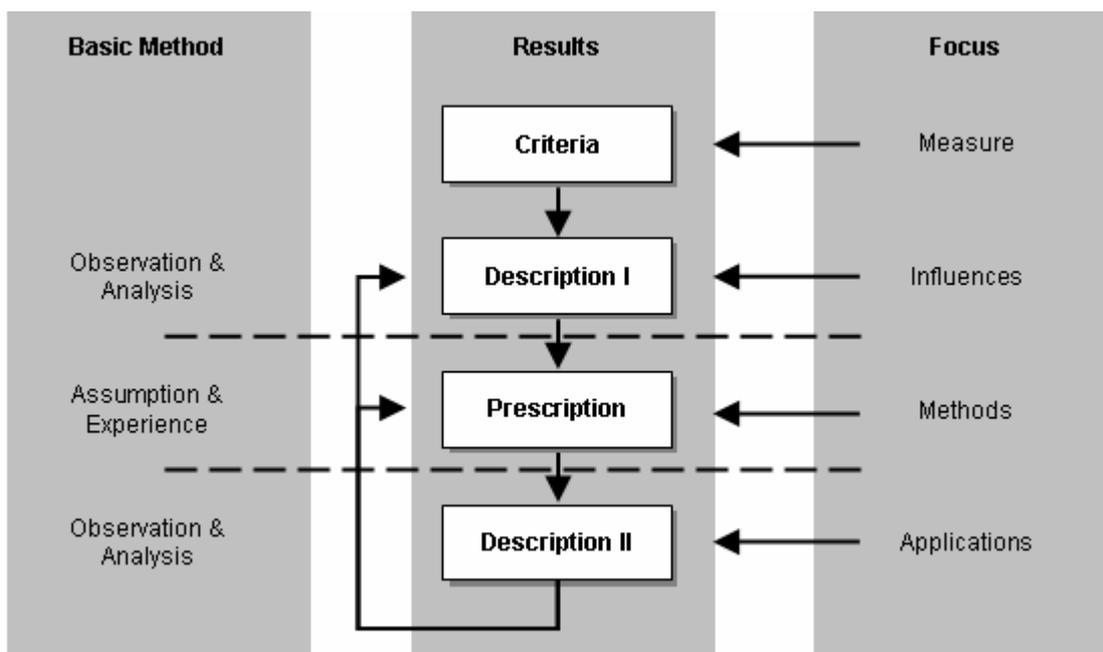


Abbildung 1-5: Design Research Methodology Framework (BLESSING & CHAKRABARTI 2009)

Prescription: Während der Phase „Prescription“ werden Lösungsansätze in Form von Modellen, Methoden oder Werkzeugen erarbeitet. Dazu werden die Erkenntnisse aus der vorangegangenen Phase verwendet und durch eigene Annahmen, Ansätze und hinzugewonnene Erfahrungen erweitert. Bezogen auf die vorliegende Arbeit bedeutet das Folgendes: Die Definition der Entwicklungs- und Einführungsmethodik (= zu entwickelnder Lösungsansatz) entstand auf Basis der Ergebnisse der Analysephase (Stand der Forschung und der Technik - Kapitel 2), dem daraus entwickelten Handlungsbedarf und den abgeleiteten Anforderungen

(Kapitel 3). Als Kern der Methodik wird ein Phasenmodell erarbeitet, welches sich am Münchner Vorgehensmodell (LINDEMANN 2007 – vgl. Kapitel 2.1.4) orientiert und für den Einsatz im industriellen Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus optimiert wird.

Description II: Anwendung und Evaluation der im Vorfeld entwickelten Ansätze stehen im Zentrum der zweiten Beschreibungsphase. Auch hier wird die Erreichung der eingangs aufgestellten Zielsetzung mittels Analyse und Beobachtung geprüft. Es wird gegen die Anforderungen gespiegelt um die „Prescription“ auf ihre Zielerreichung zu untersuchen. Die Anwendung und Evaluierung der im Rahmen dieser Untersuchungen erarbeiteten Entwicklungs- und Einführungsmethodik erfolgt durch ein Forschungsprojekt in der Industrie (siehe das folgende Kapitel 1.5).

Das beschriebene Modell bietet die Möglichkeit einer groben Strukturierung des Vorgehens dieser Arbeit. Während der Erarbeitung wurde das im Modell beschriebene sequentielle Verfahren teilweise auf Grund von Projektzwingen verlassen, um später dahin zurückzukehren. Dabei wurden in solchen Iterationen einzelne Lösungsbausteine erarbeitet, wie es auch die *Action Research* postuliert (MINNEMANN 1991).

1.5 Erfahrungsgrundlage

Die Erfahrungsgrundlage dieser Arbeit ist neben der Recherche wissenschaftlicher Fachliteratur in erster Linie ein Forschungsprojekt¹³ mit dem Schwerpunkt Simulation pneumatischer Systeme. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Einführung numerischer Simulation pneumatischer Systeme in einem Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus systematisch aus wissenschaftlicher Sicht betrachtet.

Ziel des Projektes war die Optimierung von pneumatischen Bremssystemen hin zu einer höheren technischen und wirtschaftlichen Leistungsdichte. Ein Gesamtbremssystem hat dabei viele Leistungsparameter. Beispiele hierfür sind Bremszeiten, Lösezeiten, Luftverbrauch, Geräuschentwicklung, Gewicht, Verschleiß, Lebenszykluskosten, Lebensdauer, Bedienaufwand, Verfügbarkeit etc. Die einzelnen Parameter sollen im harmonischen Gesamtzusammenhang optimiert werden, d. h. bei der Optimierung einzelner Parameter sollte immer das Gesamtsystem und dessen beschreibende Größen im Auge behalten werden. Treibende Elemente sind bei allen Betrachtungen die Kosten und der technische Fortschritt.

Die daraus abgeleiteten operativen Projektziele waren

- Projektierungsrichtlinie für einzelne Subsysteme als Nahziel.
- Projektierungstool für Subsysteme und Systeme als Fernziel.

¹³ Das Projekt KSS (Kno^rr-Bremse System-Simulation) war eine Kooperation des Lehrstuhls für Produktentwicklung der Technischen Universität München mit der Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH. (ANTON & GAAG 2008; SCHNEIDER & ANTON 2006; LINDEMANN ET AL. 2006A; LINDEMANN ET AL 2006B)

Weiter wurden folgende Teilziele festgelegt:

- Einsatz und Entwicklung eines modularen Simulations-Baukastens auf Basis käuflicher Softwarelösungen.
- Optimierung von Systemen und Subsystemen hinsichtlich Dimensionierung und Funktionalität; einfache Berechnung von Kenngrößen der Bremssysteme (Brems- und Lösezeiten, Einfluss und Querschnittsbedarf der Verrohrung und der Funktionsgeräte).
- Hilfsmittel zur Systemauslegung in frühen Phasen (Zeit- & Kostenreduktion durch Senkung des Versuchsaufwandes).
- Aufbau von Know-how im Themenbereich „Simulation pneumatischer Systeme“.

Der Autor dieser Arbeit war der verantwortliche Leiter des Forschungsprojektes. Er war während des Projektes neben seiner Tätigkeit als Systemingenieur im beteiligten Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus auch als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität München tätig. Durch die direkte Mitarbeit war ihm der unverstellte Blick auf Probleme und Schwierigkeiten in die industrielle Praxis der Projektierung gegeben. Darüber hinaus stand durch die beratende wissenschaftliche Mitarbeit an weiteren Forschungsprojekten des Lehrstuhls auch der Zugang zur aktuellen Forschung jederzeit offen.

Die Entwicklungs- und Einführungsmethodik wurde im Rahmen des Projektes erarbeitet und als Überbau verwendet, um das operative Fernziel zu verfolgen. Es wurde während des Projektlaufes durch Erfahrungen aus der Praxis fortlaufend verbessert und bis zur endgültigen, in dieser Arbeit vorgestellten, Version weiterentwickelt.

1.6 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in ihrem Hauptteil in die drei Blöcke Analyse, Synthese und Realisierung. Sie werden von Einleitung und Problemstellung sowie Zusammenfassung, der Diskussion der Allgemeingültigkeit der Methodik als Reflexion und Ausblick umrahmt.

Die Analyse stellt den Stand der Technik an Hand der drei in der thematischen Abgrenzung beschriebenen Schwerpunkte dar. Auf Basis dieser Ausführungen zur Einführung von Werkzeugen (Kapitel 2.1), zur Projektierung (Kapitel 2.2) und zur Pneumatiksimulation (Kapitel 2.3) wird der Analyseblock durch die Ableitung des Handlungsbedarfes sowie der Anforderungen an die Entwicklungs- und Einführungsmethodik und der Vorgehensweise zu ihrer Entwicklung abgeschlossen (Kapitel 3).

Die folgende Synthese wird durch die Vorstellung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik dargestellt. Diese besteht im Wesentlichen aus dem 4-Phasenmodell als Vorgehensmodell in Kombination mit vorgeschlagenen Methoden und Werkzeugen sowie einem geeigneten Projektmanagementansatz.

Die Validierung der Methodik folgt in Form einer Fallstudie. So wird mit Hilfe des 4-Phasenmodells die Einführung von Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug im Beispielunternehmen durchgeführt. Die zugehörige Reflexion bezüglich der Allgemeingültigkeit rundet die Validierung vor der abschließenden Zusammenfassung und dem Ausblick ab.

Die Abbildung 1-6 stellt den daraus folgenden Aufbau der Arbeit grafisch dar.

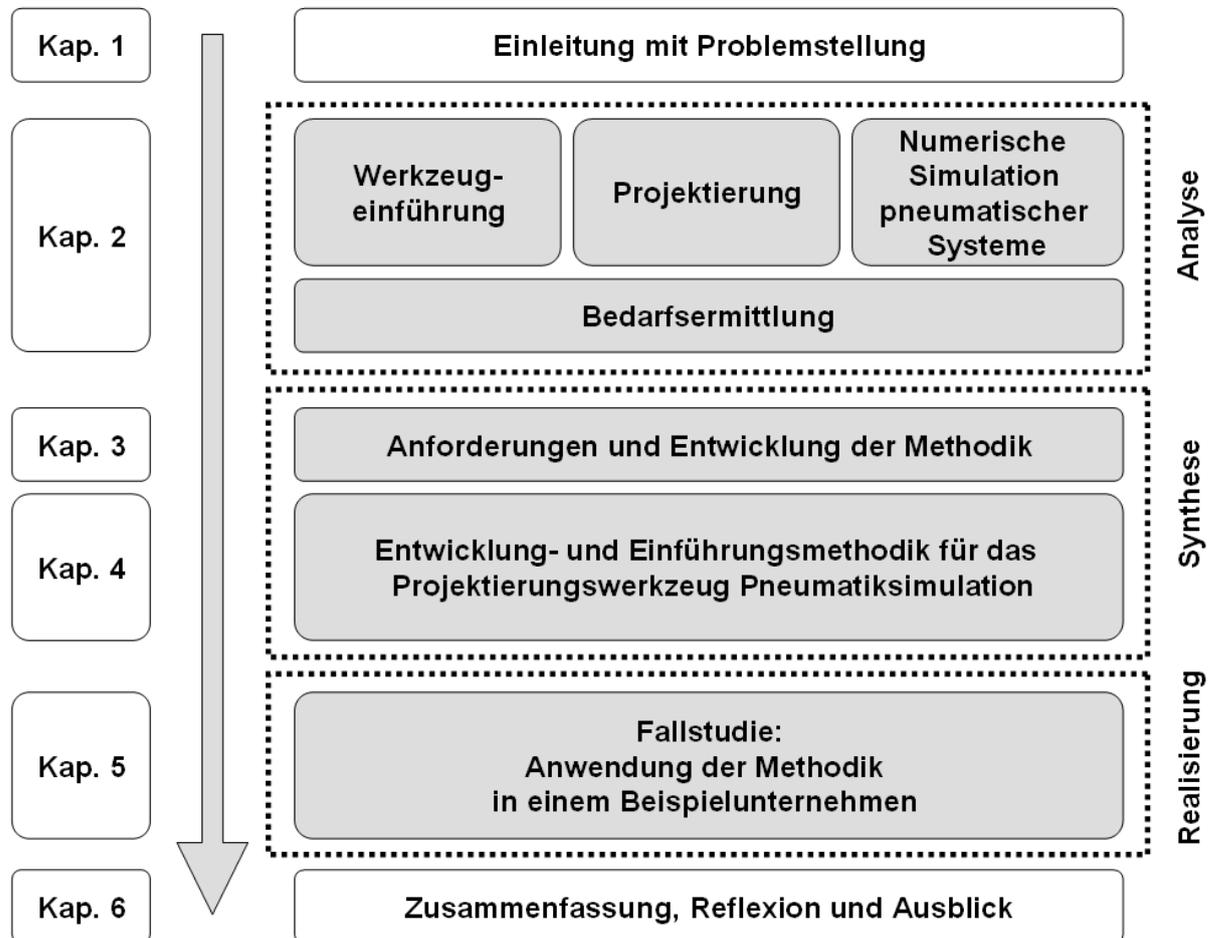


Abbildung 1-6: Aufbau der Arbeit

2. Stand der Forschung und der Technik

Der Stand der Forschung und der Technik teilt sich in die eingangs erwähnten drei Schwerpunkte *Einführung von Werkzeugen*, *Projektierung komplexer Systeme* und *Simulation in der Pneumatik*.

2.1 Einführung von Werkzeugen

Die Einführung von Simulation als ein Werkzeug der Projektierung stellt eine komplexe Implementierungsaufgabe¹⁴ dar. Für die angestrebte Methodik zur Bewältigung dieser Herausforderung ist es wichtig, die vorhandenen Einführungsansätze aus artverwandten Problemstellungen zu kennen. Die Frage, welche diese artverwandten Aufgabenstellungen sind, wird im Zuge der einleitenden Begriffsdefinition geklärt. Anschließend werden allgemeine Aspekte aus den zugehörigen wissenschaftlichen Untersuchungen zusammengetragen, bevor konkrete Vorgehensansätze vorgestellt werden.

2.1.1 Werkzeugeinführung und ähnliche Fragestellungen

In den verschiedenen Industrien befinden sich heute zahlreiche unterschiedliche Methoden und Werkzeuge mehr oder weniger erfolgreich im Einsatz. Darunter finden sich als Werkzeuge u.a. auch Systemmodellierung und Simulation (WENZEL 2000, S. 348). Dies ist ein erster Hinweis, dass bei der im Kern dieser Arbeit stehenden Pneumatiksimulation von einem Werkzeug gesprochen werden kann. Auch die folgenden wissenschaftlichen Begriffsdefinitionen bestätigen dies:

Nach LINDEMANN deckt der Begriff Werkzeug eine große Bandbreite ab und reicht dabei von einfachen Hilfsmitteln, wie z.B. Formblättern oder Checklisten, bis hin zu komplexer Software, beispielsweise zur Simulation oder zu statistischen Auswertungen (2007, S. 61). An anderer Stelle gibt es außerdem die folgende prägnante Definition für den Begriff Werkzeug: „Mittel, das das Handeln effektiver und effizienter gestaltet und den Handelnden bei seiner Arbeit unterstützt“ (LINDEMANN 2007, S. 335). Diese Definition könnte ebenso für Hilfsmittel gelten, die VIERTLBÖCK (2006, S. 6) wie folgt definiert: „Hilfsmittel unterstützen bei der Bearbeitung oder Abarbeitung eines bestimmten Vorgehens. Hilfsmittel können z.B. Rechner-

¹⁴ STEIN 1996 verwendet den Begriff Implementierung als Einführung eines (neuen) PPS-Systems, „wobei dieser Prozess stets mit bewusst vorgenommenen oder latent auftretenden organisatorischen Veränderungen verbunden ist, die das Zusammenwirken von Mensch und Technik neu gestalten“ (STEIN 1996 S. 38). Auf Basis dieser Beschreibung kann der Begriff Implementierung auch bei der Einführung von Pneumatiksimulation verwendet werden. - PPS steht nach ROOS (1990, S. 112) für EDV-gestützte Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung

werkzeuge, Formulare oder Schulungsunterlagen sein. Ihre Komplexität differiert sehr stark.“ (VIERTLBÖCK 2000, S. 6) Im weiteren Verlauf sollen auf Basis dieser Definitionen die Begriffe Werkzeug und Hilfsmittel gleichbedeutend verwendet werden.

An einigen Stellen in der Literatur, welche sich mit Einführung von Werkzeugen beschäftigt, wird dies gleichsam mit der Einführung von Methoden betrachtet (REETZ 1997, HEBLING 2006 & VIERTLBÖCK 2000). Aus diesem Grund ist der Stand der Forschung und der Technik zur Einführung von Methoden wichtig für diese Arbeit und eine Begriffsdefinition hierzu sinnvoll.

So ist nach LINDEMANN (2007) eine Methode „ein planmäßiges, regelbasiertes Vorgehen nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen“. Diese allgemeine Definition kann durch folgende Erweiterung ergänzt werden. Eine Methode „erfordert Eingaben und besteht aus Regeln, einem Vorgehen, Modellen, Hilfsmitteln und Rollen.“ (DOBBERAU 2002, S. 16) Damit sind nach dieser Definition Hilfsmittel, und somit nach obiger Festlegung auch Werkzeuge, Bestandteile von Methoden.

Eine weitere Verknüpfung von Werkzeugen und Methoden liefert Wenzel: „Eine Methode kann allgemein als implizites und explizites Prozesswissen definiert werden, welches die effektive und effiziente Bearbeitung eines Prozesses unterstützt. Dieses Prozesswissen kann sowohl durch Regeln, Anweisungen, Checklisten oder rechnergestützte Algorithmen zu Werkzeugen explizit werden. Methoden und Werkzeuge beschreiben also WIE wir Problemstellungen / Aufgaben angehen.“ (WENZEL 2000, S. 347f)

Beide Verknüpfungen verdeutlichen somit, dass der Stand der Technik zur Einführung von Methoden Relevanz für die in dieser Arbeit zu entwickelnde Entwicklungs- und Einführungsmethodik eines Werkzeuges hat.

Die Ausrichtung allein auf allgemeine Ausführungen zu Methoden und Werkzeugeinführung ist allerdings nicht ausreichend. Darüber hinaus liegt die Annahme nahe, dass konkrete Untersuchungen zur Einführung von Simulationswerkzeugen hilfreich sein können. Es zeigt sich schnell, dass diese Betrachtungen in der Regel speziell die technische Seite fokussieren und schon bei unterschiedlichen Einführungsobjekten nicht generell anwendbar sind. Von daher sind sie hier nicht anwendbar.

Ähnliches gilt für Einführungsprojekte von Softwaresystemen aus dem CAx-Bereich. Zukünftig sollte aber vor allem auch in diesen Bereichen darüber nachgedacht werden, die nicht-technische Seite mehr in den Vordergrund zu heben (HERFELD 2007). Es wird angenommen, dass sich dadurch eine Ergebnisverbesserung bei Einführungsprojekten erreichen lässt.

Interessanterweise finden sich aber im Bereich der Planungs- und Steuerungssysteme Aspekte, die hilfreich sind. Dies liegt vor allem daran, dass die Einführung der Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug nicht allein die technische Ausgestaltung betrachtet, sondern sich vielmehr auch mit der Prozessintegration beschäftigt. Dieser globale Ansatz ist denen ähnlich, die benötigt werden, wenn man PPS, PDM und PLM¹⁵ oder ERP¹⁶-Systeme einführt. Dort ist

¹⁵ Produktdaten-Management (PDM) oder Engineering Data Management (EDM) bezeichnet die ganzheitliche, strukturierte und konsistente Verwaltung aller Daten, Dokumente und Prozesse, die bei der Entwicklung neuer

man sich schon heute bewusst, dass es sich um die vollständige Integration ins Unternehmen - also in die Technik und in die Organisation - handeln muss (HERFELD 2007).

Die Ähnlichkeit zwischen allgemeiner Betrachtung von Methoden- und Werkzeugeinführung sowie den oben genannten Systemeinführungen in die Organisation von Unternehmen wird durch VIERTLBÖCK (2000) bestätigt, wenn er sagt, dass es sich auch bei der Einführung von Methoden und Hilfsmitteln um die Einführung von Neuerungen in eine bestehende Organisation und somit eine Veränderung der Ablauf- und gegebenenfalls Aufbauorganisation handelt.

Daher werden sie nicht getrennt ausgeführt, sondern gemeinsam entsprechend ihrer Relevanz für die hier diskutierte Einführung der Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug vorgestellt.

2.1.2 Allgemeine Aspekte zu Einführungsaufgaben in Unternehmen

Aufgrund des im vorangegangenen Abschnitt festgelegten weiten Feldes der zugrundeliegenden Informationen können die folgenden Ausführungen nur einen groben Überblick geben. Dieser ist ausreichend, um die für diese Arbeit relevanten Informationen darzustellen. Allgemein gilt das Fazit, welches MINOR (1999) in seinem Beitrag zu Einführungen von organisatorischen, methodischen und technischen Neuerungen in bestehende Unternehmensstrukturen zieht: „An der Komplexität von Veränderungsprozessen scheitern viele Unternehmen.“ Es gibt daher vielfältige Gründe bzw. Faktoren, die beachtet werden müssen, um die Erfolgswahrscheinlichkeit einer Einführung zu erhöhen.

Häufig sind sich Unternehmen nicht im Klaren darüber, inwieweit ihre Einführungsprojekte erfolgreich waren. Eine Untersuchung zur Einführung eines ERP-Systems in der Industrie hat gezeigt, dass es meist gar kein Interesse zur Evaluierung von Einführungen gibt. Hauptgrund dafür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass gerade die Entscheider nicht daran interessiert sind, Fehler und Fehlentwicklungen tatsächlich zu untersuchen, da dies negativ auf sie zurückfallen könnte. Dass sich das geringe Interesse an der Evaluierung gerade bei der Einführung eines ERP-Systems zeigte, dürfte vor allem daran liegen, dass hierbei ein sehr großer finanzieller Aufwand zu stemmen ist, was folglich auch große Risiken birgt (BUNGARD 2005).

In anderen Bereichen gibt es Ergebnisse, die es ermöglichen, Lehren für zukünftige Einführungsvorhaben zu ziehen. Welche Aspekte zum Erfolg eines Einführungsprozesses aus Sicht der beteiligten Mitarbeiter führen, betrachtet RITZÉN S. ET AL. (1999) in einer Umfrage. Die Umfrage richtete sich an die Teilnehmer, die im Rahmen von sechs verschiedenen Prozessen

oder der Modifizierung bestehender Produkte generiert werden, benötigt und weitergeleitet werden müssen. (DETTMERING 2005) „PLM-Lösungen haben im Kern identische Funktionen wie PDM-Systeme. Durch die Anwendung über den gesamten Produktlebenszyklus ergaben sich zwangsläufig über die verschiedenen Ausprägungen entlang der Produktlebenszyklusphasen auch zusätzliche Anwendungen, z.B. Anforderungs-, Funktions-, Wartungs-, Service- und Ersatzteilmanagement sowie Erweiterungen des Konfigurationsmanagements.“ (EIGNER & STELZER 2009, S. 27)

¹⁶ ERP = Enterprise Resource Planning. Ein ERP-System ist eine komplexe Anwendungssoftware zur Unterstützung der Ressourcenplanung eines gesamten Unternehmens (BUNGARD 2005).

zur Einführung umfangreicher Methoden und Methodiken in der Industrie beteiligt waren. Den Phasen der Planung, Durchführung und Evaluierung ordnet VIERTLBÖCK (2000) die positiv und negativ wirkenden Aspekte zu (Abbildung 2-1).

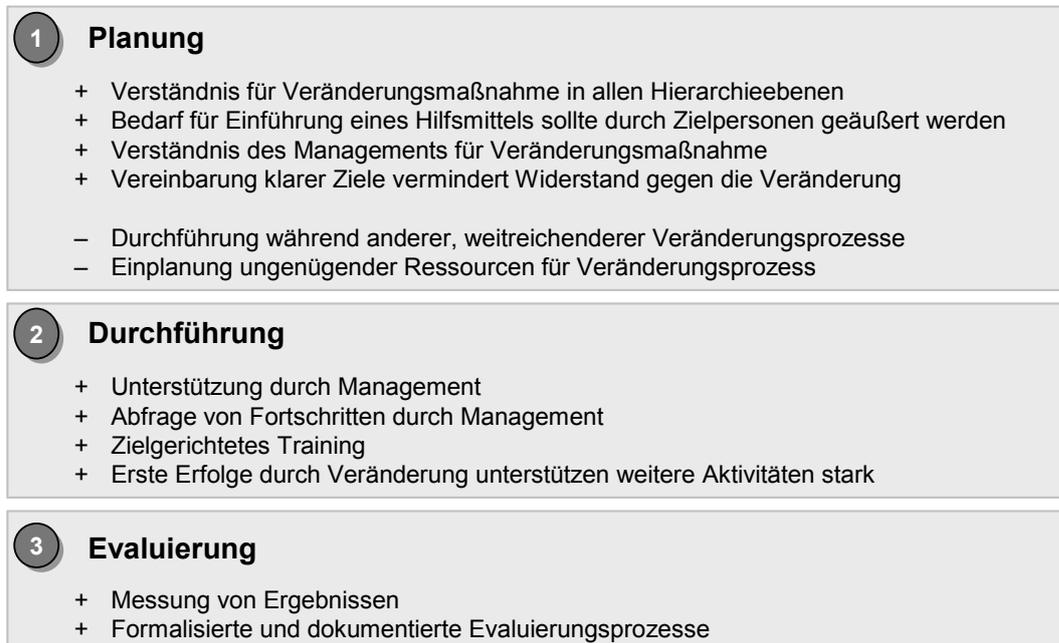


Abbildung 2-1: Wichtige positive und negative Faktoren für einen Einführungsprozess nach VIERTLBÖCK (2000, S. 98), zusammengefasst aus RITZÉN S ET AL. (1999)

Hervorzuheben ist der Punkt Evaluierung, der als besonders wichtig erkannt wurde und, wie oben beschrieben, häufig keinerlei Beachtung findet. Darüber hinaus ist schnell erkennbar, dass im Bereich der Planung vor allem das Thema *Verständnis schaffen* fokussiert wird und bei der eigentlichen Durchführung die Einbeziehung des Management sowie eine strukturierte Planung (formalisierte Prozesse, Messung von Ergebnissen und zielgerichtetes Training) im Vordergrund steht. Gerade die Bedeutung der hier erwähnten Einbeziehung des Managements wird häufig unterschätzt. Für ein erfolgreiches Change Management ist sie aber unverzichtbar (EIGNER & STELZER 2009, S. 386).

NIEDEREICHHOLZ & RESKE (2005, S. 78) haben in einer Studie zur Einführung von ERP-Systemen unter 1000 Unternehmen nach den kritischen Erfolgsfaktoren bei der Einführung gefragt und dabei die oben genannten Punkte bestätigt, indem sie folgende, allgemein für Einführungen relevante Punkte, aufgeführt haben (spezielle ERP-Aspekte werden im Folgenden nicht berücksichtigt): Top Management Unterstützung, Einführungswerkzeuge der Hersteller, fehlendes Customizing, Champion, Endnutzer-Schulung, Nutzererwartungen, Kunden-Hersteller-Beziehung, Softwareauswahl, Projekt-Management, Lenkungsausschuss, Beratungsgüte, Daten-Analyse und Übertragung, Business Process Reengineering, Architekturdefinition, Ressourcen, Projektteamkompetenz, Change Management, Kommunikation der neuen Geschäftsprozesse, Zielvereinbarungen, abteilungsübergreifende Kooperation und Herstellersupport.

In der Literatur finden sich weitere Hinweise darauf, dass die Dauer der Einführungsprojekte große Bedeutung haben kann. So heißt es bei ARNOLD ET AL. (2005, S. 39): „Häufig wird als

Grund für das Scheitern von PLM-Einführungen die Dauer der Einführung und die damit einhergehende langfristige Bindung von Ressourcen insbesondere von Personen angegeben.“ Auf Grund von sich ändernden Randbedingungen kann die erforderliche Kapazität aber nicht ständig bereitgestellt werden. Lange Implementierungsdauern kollidieren außerdem damit, dass sich im industriellen Umfeld innerhalb von wenigen Jahren die Rahmenbedingungen grundlegend verändern können und damit auch die Anforderungen an die Einführung und das einzuführende Objekt. (STEIN 1996, S. 65)

Einen guten, selbstverständlich nicht vollständigen, Überblick zu wichtigen Aspekten für die Einführung von Methoden und Werkzeugen gibt VIERTLBÖCK (2000) mit der Nennung von 22 Aspekten, die er als erfolgsrelevant erkannt hat. Abbildung 2-2 stellt diese gesammelt dar.

Einige dieser Aspekte werden im Folgenden noch ausführlicher diskutiert. Hierfür eignen sich als Überbegriffe die folgenden drei Themenblöcke:

- der Mensch als Anwender und Nutzer des einzuführenden Objektes / Systems
- die Anforderungen an das Einführungsobjekt
- die Vorgehensweise bei der Einführung

Die Erfahrung zeigt, dass es in den meisten Fällen von gescheiterten oder nur bedingt erfolgreichen Einführungen daran lag, dass einer dieser drei Themenblöcke nicht ausreichend bearbeitet wurde.

Der Mensch als Anwender und Nutzer

„Bei Veränderungen in Unternehmen wird häufig übersehen, dass ein großer Teil der bisherigen Abläufe so bleibt, wie er vorher war. Es ist wichtig, das herauszustellen, denn das sind die ‚Felsen in der Brandung‘, an denen sich die Beteiligten festhalten können.“ (BÖHNKE ET AL. 2005, S. 199) Diese Aussage aus dem Kontext der Einführung von SAP gibt einen ersten Hinweis darauf, wie man mit den Empfindungen der Personen, welche von durch Einführungen hervorgerufenen Veränderungen betroffenen sind, umgehen kann. Denn der Einfluss der als Nutzer betroffenen Menschen auf die Erfolgchancen von Einführungsprojekten kann als sehr hoch angesehen werden und muss daher berücksichtigt werden. (EIGNER & STELZER 2009, S. 411)

In der Regel werden Methoden und Werkzeuge zur Steigerung der Leistung eingeführt. Nach REETZ (1997) sinkt diese allerdings während der Implementierung zunächst, bevor sie über die Phasen Optimierung und Stabilisierung auf ein erhöhtes Maß (verglichen mit dem Leistungsniveau vor der Einführung) im Normalbetrieb gelangt. Es ist von entscheidender Bedeutung, sich dieser Leistungsentwicklung bewusst zu werden, um nicht zu früh zusätzliche, gegebenenfalls störende, Zusatzmaßnahmen zur Erfolgsabsicherung einzuleiten.

Eine für die Einführung besonders wichtige Gruppe ist das mittlere Management. In der Regel ist der Aufwand an Ressourcen, den eine Einführung einfordert, durch das mittlere Management bereitzustellen. Allerdings erfolgt die Bewertung dieser Manager anhand relativ tagesaktueller und kurzfristiger Leistungsziele.

Zusammenfassung der erfolgsrelevanten Aspekte

- A1: Sensibilisierung:** Sensibilisierung der Mitarbeiter für Problemstellung. Die Einführung von Methoden darf nicht unvermittelt erfolgen.
- A2: Einbindung der Mitarbeiter:** „Betroffene“ müssen zu „Beteiligten“ werden. Durch die Beteiligung vieler Mitarbeiter in der Analyse- und Anpassungsphase werden Akzeptanzbarrieren gebrochen. Im Idealfall kommen die Mitarbeiter durch ein gezieltes Coaching selbstständig auf die Problemstellen und deren Lösungen („not invented here Problematik“ wird umgangen, Akzeptanz ist maximal).
- A3: Mitarbeiterqualifizierung:** Ressourcen für Qualifizierungsmaßnahmen der beteiligten Mitarbeiter bereitstellen. Mitarbeiter müssen befähigt werden, die Methoden innerhalb eines bestimmten Rahmens an ihre eigenen, sich ständig ändernden Prozesse anzupassen.
- A4: Übergeordnetes Gesamtkonzept/ Planung:** Planung des Veränderungsprozesses und Integration von Veränderungsmaßnahmen in übergeordnetes Gesamtkonzept; Vermeidung von Bereichsoptimierungen.
- A5: Kleine Veränderungsschritte:** Veränderung in kleinen Schritten; Erzielen schneller Erfolge fördert die Mitarbeitermotivation. Ganzheitliche Analysen dauern oft zu lange - besser mit ersten kleinen Maßnahmen beginnen (gute Pilotprojektergebnisse wirken fördernd), als zu versuchen alle Prozessdetails zu ergründen.
- A6: Managementunterstützung:** Managementunterstützung für die Veränderungsmaßnahmen; Vorleben der Gedanken durch das Management (besonders bei hohem Aufwand der Einführungsmaßnahme essentiell).
- A7: Klare Ziele:** Transparente Darstellung von Zielen des Einführungsprozesses.
- A8: Ausreichende Ressourcen:** Ressourcen für die Gestaltung des Einführungsprozesses bereitstellen.
- A9: Externe Berater nutzen:** Externe Berater können Einführungsprozess unterstützen, es ist jedoch stets das spezifische Prozesswissen der beteiligten Mitarbeiter notwendig.
- A10: Ist-Analyse:** Genaue Ist-Analyse für die Schaffung eines umfangreichen Prozessverständnisses und Problembewusstseins. Hohe Mitarbeiterqualifikation und fundiertes Wissen über eigene Prozesse sollten genutzt werden. Einbindung daher zur Analyse und Methodenanpassung dringend notwendig.
- A11: Anpassung:** Anpassung von theoretischen Ansätzen an die spezifischen Bedürfnisse des Unternehmens, der Prozesse und der Mitarbeiter für praxisnahe Unterstützung aufgrund der Verschiedenartigkeit der Produktentwicklungsprozesse besonders wichtig.
- A12: Pilotprojekte:** Test der Veränderungsmaßnahmen im Rahmen von Pilotprojekten.
- A13: Zielüberwachung:** Konsequente Überwachung der Zielerreichung (möglichst durch quantifizierbare Ergebnisse).
- A14: Zeit für Veränderungen:** Nicht zu viele Einführungsmaßnahmen in zu kurzer Zeit durchführen; aus externer Sicht klein erscheinende Veränderungen erscheinen den betroffenen Mitarbeitern oftmals enorm. Die Verbreitung einer Denkweise ist nicht durch „Blitzeinführungen“ erreichbar.
- A15: Freiräume gewähren:** Mitarbeitern bei der Gestaltung des Einführungsprozesses und der Hilfsmittel Freiräume gewähren (Subsidiaritätsprinzip). Im Bereich der Produktentwicklung besonders wichtig, da die Mitarbeiter an Freiräume bei der Bearbeitung ihrer Aufgaben und eigenständiges Problemlösen gewöhnt sind und daher nur schwer starre Vorgehensweisen akzeptieren.
- A16: Direkter Nutzen:** Sollte für die beteiligten Mitarbeiter aller Hierarchieebenen gegeben sein und muss klar herausgearbeitet werden. Ist kein direkter Nutzen erkennbar bzw. sehen die Mitarbeiter sogar ihren Arbeitsplatz gefährdet, muss versucht werden Anreize zu schaffen bzw. Ängste abzubauen.
- A17: Mitarbeiterwahl:** Bei der Wahl der Mitarbeiter für die Mitgestaltung von Einführungsmaßnahmen bzw. Durchführung von Pilotprojekten auf deren Verhältnis untereinander achten. Keine „Außenseiter“ zu Schlüsselpersonen in Pilotprojekten machen (informelle Führer wählen). Personalwechsel während der Einführungsmaßnahme vermeiden.
- A18: Schulung:** Vermittlung der Methoden bzw. Hilfsmittel durch „learning by doing“ wesentlich zielführender als auf theoretischer Ebene. Verständnis und Akzeptanz stellen sich erst bei der Nutzung von Methoden und Hilfsmitteln oder Prototypen ein. Umständliche Formalismen wirken abschreckend.
- A19: Reifegrad von Methoden:** Umständliche Formalismen wirken abschreckend. Methoden und Hilfsmittel müssen daher vor der weiteren Verbreitung im Unternehmen einen hohen Reifegrad aufweisen.
- A20: Analyse der Nutzung vorhandener Methoden:** Vorhandene, evtl. falsch genutzte Methoden müssen genau analysiert werden. Eine Verbesserung deren Nutzung muss der Neueinführung einer Methode gegenübergestellt werden.
- A21: Aufbauorganisation:** Umfangreiche Veränderungsmaßnahmen bedingen die Veränderung von Ablauf- und Aufbauorganisation.
- A22: Engagement der Führungskräfte/ des Managements:** Direktes Engagement der Führungskräfte im Einführungsprojekt und Verständnis der Führungskräfte für die Einführungsmaßnahmen sind unabdingbar.

Abbildung 2-2: Erfolgsrelevante Aspekte für die Methoden- und Hilfsmiteleinführung (VIERTLBÖCK 2000, S. 94)

Diese können unter der Ressourcenknappheit infolge der Übernahme zusätzlicher Einführungsaufgaben leiden, was dazu führt, dass die mittlere Managementebene sich gegen die Übertragung dieser Zusatzaufgaben zur Wehr setzt. (ARNOLD ET AL. 2005, S. 39). Eine Möglichkeit dem entgegen zu wirken ist es, zusätzliche Anreize zu schaffen, die über messbare Kennzahlen vergeben werden.

Selbst wenn eine Verbesserung durch das einzuführende Werkzeug nachgewiesen werden kann, sind Vorbehalte nicht auszuschließen. Dies liegt meist daran, dass es negativ empfunden wird, wenn es zu Veränderungen des gewohnten, bekannten und deshalb geschätzten Arbeitsablaufes oder Umfeldes kommt. Wenn zusätzlich als Motivation für die Einführung des Werkzeuges Rationalisierungseffekte zu Felde geführt werden, kann dies zu Ängsten und dadurch hervorgerufenen Widerständen¹⁷ bei den betroffenen Mitarbeitern führen (BUNGARD 2005, S. 32). Diese auszuräumen stellt eine aufreibende Aufgabe dar, die aber zwingend erforderlich ist, um den Erfolg der Einführungsbemühungen sicherzustellen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie das erreicht werden kann. Nach BUNGARD (2005, S. 32) sind dabei Mitsprache und Gestaltungsmöglichkeit motivationspsychologische Trivialität. Auch die Art und Weise der Einführung und der Stil der Durchführung sind entscheidende Einflussgrößen auf die Akzeptanz. Hierzu folgen später weitere wichtige Aspekte.

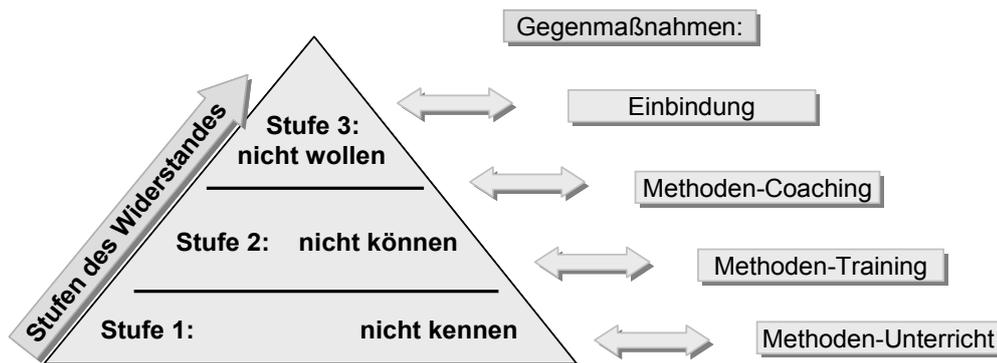


Abbildung 2-3: Widerstandspyramide nach GALPIN (1996) und Maßnahmen den Widerstand zu überwinden nach STETTER (2000, S. 116)

Nach der Widerstandspyramide nach GALPIN (1996) müssen während einer Methodeneinführung zunächst die Stufen „nicht kennen“, „nicht können“ und „nicht wollen“ in dieser Reihenfolge überwunden werden. „Diese Stufen fallen mit den Phasen der Sorglosigkeit und des Bewusstwerdens des transtheoretischen Modells zusammen.“ (HEBLING 2006) Hierzu lassen sich nach STETTER (2000, S. 116) Gegenmaßnahmen, wie in Abbildung 2-3 dargestellt, zuordnen.

¹⁷ „Von Widerstand kann immer dann gesprochen werden, wenn vorgesehene Entscheidungen oder getroffene Maßnahmen, die auch bei sorgfältiger Prüfung als sinnvoll, „logisch“ oder sogar dringend notwendig erscheinen, aus zunächst nicht ersichtlichen Gründen bei einzelnen Individuen, bei einzelnen Gruppen oder bei der ganzen Belegschaft auf diffuse Ablehnung stoßen, nicht unmittelbar nachvollziehbare Bedenken erzeugen oder durch passives Verhalten unterlaufen werden.“ Dieser Widerstand kann dabei verbal oder nonverbal, aktiv (Angriff) oder passiv (Flucht) erfolgen. (DOPPLER UND LAUTERBURG 2002, S. 324)

Neben der Einbindung zum Überwinden des „nicht wollen“ betonen BESKOW ET AL (1999, S. 439), dass gerade bei dieser Stufe die Unterstützung durch das Management erheblichen Einfluss auf den Erfolg des Einführungsprojektes hat.

Die von STETTER (2000) genannten Themen Unterricht, Training und Coaching sind ebenfalls von großer Bedeutung. Gerade in diesem Themenfeld sind viele Fallstricke, die dazu führen können, dass Einführungsvorhaben scheitern. So wurde bei einer Untersuchung über Anwenderschulungen bei der Einführung von PPS-Systemen eine Vielzahl an Problemen ermittelt, die allgemein bei der Planung von Schulung und Ausbildung für die Nutzung neuer Werkzeuge wichtig sind. Die über Unternehmensbefragungen ermittelten Probleme bei den Anwenderschulungen waren folgende (STEIN 1996, S. 41):

- unterschiedlich ausgeprägte Grundbereitschaft mit neuem System zu arbeiten
- geringe Akzeptanz gegenüber einzelnen Bestandteilen oder Eigenschaften des Systems (Funktionen, Datenauswertung, Bedienoberflächen, Antwortzeiten)
- fehlender Freiraum zur Schulung und Einarbeitung gegenüber der Priorität „Tagesgeschäft“
- fehlendes Hintergrundwissen
- zu langer Zeitraum zwischen Schulung und Programmaktivierung
- mangelnde Weitergabe der gewonnenen Kenntnisse im Unternehmen (keine Multiplikatoren)
- Verständnisprobleme zwischen IT und Fachbereichen (Anwendern)
- Überforderung der Anwender
- zögernde Nutzung des Systems
- Arbeit am System vorbei
- unzureichende Schulungsunterlagen und Handbücher

Die Gründe für derartige Probleme sind vielfältig. GERLACH & SQUARR (2004, S. 4 und S. 16f) weisen dazu darauf hin, dass die Lernsituation je nach Teilnehmer sehr unterschiedlich ausfallen kann. Dabei nennen sie folgende Faktoren, die bei der Vorbereitung und Durchführung, bezogen auf die zu schulenden Inhalte, berücksichtigt werden sollten: Ängste nicht mitzukommen, Zeitdruck, Zwang, neue Lernbedingung und Generationsunterschiede. Unter anderem empfehlen sie einen hohen Übungsanteil (ca. 80%) der möglichst Inhalte aus dem Tagesgeschäft enthält, Erläuterung von grundlegenden Zusammenhängen und Integration von Lernerfolgen.

Vor allem bei der Einführung von Methoden oder Werkzeugen, die mit großen Veränderungen für Anwender, Nutzer und sonstige Betroffene einhergehen, ist es wichtig mit Hilfe einer Vision grundsätzliche Bereitschaft zu schaffen. Ziel muss es sein, mit der Vision eine Art Vorfreude auf Veränderungen zum Positiven und andere Verbesserungen zu erreichen (GRIEVES 2006).

„Je einfacher, sinnvoller, anregender und herausfordernder die Vision ist, desto größere Veränderungen bewirkt sie. Je mehr sie das Herz und den Verstand der Führungskräfte anspricht

und in der Unternehmenskultur verankert ist, desto wirksamer findet sie ihren Niederschlag in der Unternehmenspolitik, in den Strategien und Direktiven und desto effizienter wird deren Umsetzung.“ (ARNOLD ET AL. 2005, S. 203)

Vision ist auch ein Baustein der sogenannten „Formula for Change“, welche im Zusammenhang mit Veränderungen häufig erwähnt wird. Die genannte Ungleichung wurde erstmalig von Richard Beckhard und David Gleicher aufgestellt und soll als Modell dienen, den erwarteten Erfolg von Change-Programmen zu ermitteln (GREEN 2007). Die Formel lautet wie folgt:

$$D \cdot V \cdot F > R$$

Formel 2-1: Formula for Change

Die Größen dieser Ungleichung sind:

D (Dissatisfaction): Unzufriedenheit mit der gegenwärtigen Situation

V (Vision): Vision von dem, was möglich ist

F (First steps): Erste konkrete Schritte, die in Richtung der Vision führen

R (Resistance): Widerstand gegen die Veränderung

Demnach müssen die drei erstgenannten Faktoren in ausreichendem Maß vorhanden sein, um eine Veränderung in einem Unternehmen durchführen zu können.

Diese Formel stellt ein sehr einfaches Werkzeug dar, um während einer Einführungsaufgabe die Ausrichtung auf die beteiligten Personen beizubehalten. Um einen Wechsel zu erreichen ist es notwendig, dass das Produkt der drei Faktoren (D, V und F) größer ist als der Widerstand, etwas zu ändern. Ist einer der Faktoren nicht oder nur in geringem Maße vorhanden, führt das über die Multiplikation dazu, dass die Einführung nicht erfolgreich sein kann (GREEN 2007).

Konkrete Schritte können helfen, den Veränderungs-Prozess einer Einführung positiv zu gestalten. Die dafür erforderlichen Schritte zur Lösung dieser schwierigen und risikoreichen Aufgabe lauten wie folgt (ROSENSTIEL & COMELLI 2003):

- „Mitarbeiter für den Wandel gewinnen,
- rechtzeitig informieren,
- die Notwendigkeit des Wandels erklären,
- Zuhören und Diskutieren,
- Stabilität im Wandel betonen,
- zur Veränderung motivieren,
- für neue Anforderungen qualifizieren,
- Betroffene einbeziehen,
- menschlich mit Verlierern umgehen,

- Veränderungsbereitschaft vorleben
- und Erfolge auf dem Weg zu Neuem feiern!“

Die Einführung eines Unterstützungswerkzeuges wirkt deutlich weniger komplex als das hier beschriebene Change Management, bei dem eine Vielzahl von Personen, Prozessen und Abläufen betroffen ist. Da aber schon durch die Bereitstellung eines freiwillig zu nutzenden Werkzeuges eine kleine Veränderung eintritt, die in Kontakt mit menschlichen Individuen zu Argwohn bis hin zu offenem Widerstand führen kann, sind die hier geführten Hinweise auch für die vorliegende Arbeit relevant.

Im Zusammenhang mit dem Thema Mensch im Rahmen der Einführung kann noch ein Aspekt erwähnt werden, der von GIAPOULIS (1999B) „Human factor“ genannt wurde. Dieser ist entscheidend für die erfolgreiche Einführung und Nutzung einer Methode. Im Kern geht es darum, dass Personen, die an derartigen Projekten beteiligt sind, das richtige Verständnis der Methode haben sollen, die Fähigkeit zum Kompromiss besitzen müssen und üblicherweise ihre Entscheidungen auf Basis objektiver Fakten treffen (GIAPOULIS 1999B, S. 1531ff).

Anforderungen an das Objekt der Einführung

Im Rahmen der Forschung über Change Management wurden einige Anforderungen an das einzuführende Objekt herausgearbeitet.

Als übergeordnete Voraussetzung wird häufig erwähnt, dass die Methoden und Werkzeuge vor ihrer Einführung auf den Einsatzfall und dessen Randbedingungen angepasst werden müssen. Unter diesen Randbedingungen sind die Unternehmensprozesse, die Organisation und die Aufgabenstellung zu verstehen (GIAPOULIS 2000, VIERTLBÖCK 2000). GOUVINAS & CORBETT (1999) haben hierzu erwähnt, dass Entwicklungsmethoden vor allem aus drei Gründen nicht genutzt werden. Diese sind Mangel an Training, die Methode wird als zu arbeits- und zeitaufwändig beurteilt und das Management des Unternehmens steht nicht hinter dem Einsatz. Weiter lässt sich bezogen auf das einzuführende Objekt erkennen, dass Methoden auf das Umfeld maßgeschneidert, und dadurch schnell verwendbar, sowie effektiv einsetzbar sein müssen.

Von besonderer Bedeutung ist außerdem, dass Methoden und Werkzeuge auf das Produkt, welches mit ihrer Hilfe projektiert oder entwickelt wird, angepasst sein müssen. Häufig wird bei Lösungen und Ansätzen aus Forschung und Technik der Fehler gemacht, dass sie lediglich auf einfache Produkte konzipiert werden, die nicht die Komplexität der tatsächlichen Anwendung umfassen (HERFELD 2007 und DEUBZER ET AL. 2005). Dies ist zu vermeiden, da sonst die Einführung weniger erfolgreich verläuft.

Nach REINICKE führt vor allem die Nutzerintegration zu verbessertem Methodeneinsatz. Dort heißt es: „Es bedarf deshalb einer Anpassung von Methoden an die neuen Anforderungen, die durch die Nutzerintegration gestellt werden. Diese Anpassung sollte in den meisten Fällen situativ erfolgen, d.h. abgestimmt auf die Gegebenheiten im Unternehmen einerseits- Aspekte wie Qualifikation, Unternehmensorganisation und IT-Umgebung sind einige der zu beachtenden Parameter [...] – und angepasst an die Bedürfnisse der Methodennutzer andererseits“ (REINICKE 2004, S. 13). An dieser Stelle wird somit zusätzlich zur Fähigkeit der Anpassung

an die oben genannten Randbedingungen die Anforderung nach der Möglichkeit, den Nutzer zu integrieren genannt.

Weiter lässt sich feststellen, dass die Nichtanwendung von Methoden mit hoher Wahrscheinlichkeit daran scheitert, dass eine benutzerfreundliche Darstellung der Methode, bestehend aus verständlicher Beschreibung und Visualisierung, fehlt (WACH 1994, S. 56). Daraus ergibt sich für die Einführung von Methoden und Werkzeugen, dass aussagekräftige Visualisierung und umfassende Dokumentation zwingend erforderlich sind, um derartige Aufgabenstellungen erfolgreich zu meistern.

Vorgehen bei der Einführung

Der Erfolg einer Einführung hängt maßgeblich davon ab, wie Sie „gemanaged“ wird. (GOUVINAS & CORBETT 1999). Darunter können sehr vielfältige Ausprägungen von Herangehensweisen verstanden werden. Diese unterscheiden sich in grundsätzlichen Eigenschaften, wie z.B. dem Stil, oder auch der organisatorischen Abwicklung. Im Wesentlichen entscheiden vor allem die Randbedingungen im Unternehmen und das einzuführende Werkzeug über die ideale Art und Weise der Einführung.

Als übergeordnete Unterscheidung gilt die Grundausrichtung bei der Einführung. BUNGARD unterscheidet bei seinen Untersuchungen zur Einführung eines ERP-Systems dabei zwei Ansätze:

- „Implizite Determinismusthese [...] Technik steht im Vordergrund, Organisation und Menschen müssen sich dem unterwerfen.“ Die Gefahr inhumaner Arbeitsplätze und daraus folgendes Scheitern der Einführung sollte zum Ablehnen dieses Ansatzes führen (BUNGARD 2005, S. 22). Außerdem wird bei einer derartigen Betrachtungsweise nicht berücksichtigt, dass der technische Aufwand häufig wesentlich geringer ist, als der organisatorische (RANGEN ET AL. 2005).
- „Anthropozentrisches Modell [...] Der Kerngedanke besteht darin, dass bei der Einführung einer neuen Technologie grundsätzlich die technischen und sozialen Systeme gemeinsam optimiert werden müssen („joint optimization“).“ (BUNGARD 2005, S. 23)

Als problematisch stellt sich bei seinen weiteren Untersuchungen heraus, dass im oberen Management in Deutschland vorwiegend Ingenieure und Juristen vertreten sind. Vor allem auf Seiten der Techniker ist eine klare Präferenz für die technikbezogene Ausrichtung zu erkennen. Implementierungsspezialisten, die man vor allem im Personalwesen findet, sind in oberen Führungsebenen dagegen unterrepräsentiert. Dieses Phänomen führt zu einer Koalition der Determinismusförderer und kann mit Sicherheit auch als ein allgemeines Problem (außerhalb der ERP-Welt) bei Einführungsprojekten angesehen werden (BUNGARD 2005, S. 24).

Zu den beiden oben genannten Grundausrichtungen kann noch eine weitere hinzukommen. Das passiert dann, wenn die Ausrichtung sich jeweils über die Beurteilung des bei der Einführung zugrunde liegenden Problems definiert. So werden die beiden oben genannten Ansätze berücksichtigt, wenn zum einen die Einführung als „technisches“ und zum anderen als „sozio-technisches“ Problem betrachtet wird. Darüber hinaus ist zwischen diesen beiden nach HAMACHER & PAPE (1991) auch denkbar, dass das Problem einerseits als technisches eingestuft wird, aber andererseits der Bezug auf den Anwender zumindest erkannt und berücksichtigt

wird. In der letzten Konsequenz empfehlen sie diesen soziotechnischen Ansatz zur Einführung von PPS-Systemen.

Aus dieser Einteilung resultiert in vielen Fällen die Auswahl der Einführungsstrategie. Hierbei können im Wesentlichen zwei Formen unterschieden werden, die SCHMITZ (1999) im Bezug auf die Einführung von PPS-Systemen „Bottom-Up“ (auch „Lern-“ oder „Evolutionstrategie“ genannt) und „Top-Down“ (auch als „Umbruch-“ oder „Bombenwurfstrategie“ bezeichnet) nennt:

„Die Bottom-Up Strategie basiert auf der Überlegung, dass die Mitarbeiter an der Basis die eigenen Prozesse im Detail am besten kennen und eine Optimierung immer von der Basis ausgehen muss. Bei der Bottom-up Strategie wird daher das Grobkonzept von den Mitarbeitern mit erarbeitet.“ (SCHMITZ 1999, S. 27)

„Die Top-Down Strategie lässt sich dadurch charakterisieren, dass Veränderungen vom Top-Management initiiert werden.“ (SCHMITZ 1999, S. 29)

In seinem Modell des Wandels (siehe Abbildung 2-4) hat SCHMITZ weiter beschrieben, wodurch sich diese beiden Strategien auszeichnen. Dabei sind vor allem die Chancen und Risiken interessant und sollten vor einer Entscheidung für eine Strategie herangezogen werden. Letztlich lassen sich für beide Strategien gute Argumente anführen, so dass offen ist, unter welchen Bedingungen welche Strategie vorzuziehen ist. Es sei auch erwähnt, dass das Management fallweise beide Entwicklungsformen in einer Mischform praktizieren kann (SCHMITZ 1999, S. 29).

Zur Beschreibung der Vorgehensweise bei einer Einführung kann darüber hinaus der Implementierungsstil verwendet werden. Dieser lässt sich zwischen autoritär oder kooperativ einordnen: „Die Ausprägung des Implementierungsstils wird dabei nachhaltig vom Grad der Partizipation bestimmt.“ Partizipation steht hierbei für die Beteiligung der Mitarbeiter an der Willensbildung einer hierarchisch höheren Schicht (SCHMITZ 1999, S. 35).

Es lassen sich aber auch konkrete Unterschiede zwischen der Lösung von Einführungsaufgaben treffen. So ist ein wichtiges Unterscheidungskriterium bei der Einteilung dieser die Verfügung über den zukünftigen Einsatz des Werkzeuges. Dabei werden von GIAPOULIS (1999A) bezogen auf Entwicklungsmethoden drei Hauptausrichtungen unterschieden:

- Optionale Einführung von Methoden: Die Methoden mit ihren Zielen werden den einzelnen Entwicklern vermittelt. Ihnen bleibt es dann überlassen ob, und inwieweit, sie die Methoden in ihrer täglichen Arbeit anwenden.
- Methodeneinführung in einem Pilotprojekt: Die Methoden werden einmal in einem unabhängigen, kleinen Projekt mit einer Form von begleitendem Coaching eingeführt. Die Teilnahme der Mitglieder ist i. d. R. nicht freiwillig. Die Teilnehmer sollen praktische Methodenerfahrung sammeln, die sie später im Berufsalltag anwenden können.
- Verpflichtende Anwendung von Methoden: Methoden werden als Integraler Bestandteil des Entwicklungsprozesses eingeführt. Deren Anwendung ist für die Beteiligten verpflichtend. GIAPOULIS (1999A, S. 241f)

Diese Verfügung lässt sich als Unterscheidungsmerkmal auch auf die Einführung anderer Werkzeuge verwenden.

	Umbruchsmodell (Top Down)	Evolutionsmodell (Bottom up)
Grundidee:	- erheblicher Druck erforderlich um Wandlungsbarrieren zu überwinden	- zu viel Wandel auf einmal kann vom System nicht verkraftet werden
Charakteristik des Wandels:	- tiefgreifender und unfassender Wandel ("Quantensprung") - begrenzte Zeitdauer - diskontinuierlicher Prozess - "Revolution"	- Entwicklung in kleinen Schritten ("piecemeal engineering") - dauerhafter Lernprozeß - kontinuierlicher Prozess - "Evolution"
Transformationslogik:	- synoptische Vorgehensweise - einheitliche Fremdregelung - Vorgehen nach Plan	- inkrementelles Vorgehen - vielfältige Selbstregelung - erfahrungsgestütztes Lernen
Rolle des Managements:	- Architekt des Wandels - rationales Planer	- Prozeßmoderator - Coach
Chancen:	- klare Trennung von "Ruhe-" und "Wandlungsphasen" - hohe Änderungsbereitschaft in Krisensituationen - Wandel aus einem Guß	- Entwicklungsrythmus korrespondiert mit Entwicklungsfähigkeit - kleine Veränderungen wirken "natürlich" - Erwerb von Selbstentwicklungsfähigkeiten
Risiken:	- begrenzte Planbarkeit - hohe Instabilität in der Wandlungsphase - schwere Einbuße bei zu später Reaktion - hoher Handlungsdruck begünstigt kurzfristige Verbesserungen zu Lasten langfristiger Entwicklungen	- ständige Unruhe ("Herumexperimentieren") - bei hoher Umweltdynamik zu langsam - fraglich, ob Diskontinuität zu verkraften ist - begrenzte Fähigkeit sich selbst in Frage zu stellen

Abbildung 2-4: Modell des Wandels nach SCHMITZ (1999)

„Einen weiteren wichtigen Aspekt [für eine erfolgreiche Einführung] stellt in der Regel ein unbedingt zu betreibendes Projektmanagement dar.“ (HAMACHER & PAPE 1991, S. 120)

Diese Aussage kann dadurch bestätigt werden, dass dies bei Einführungsaufgaben aus unterschiedlichen Bereichen (z.B. Produktentwicklung, Projektmanagement, Qualitätswesen oder IT-Bereich) uni sono gefordert wird. Die gemeinsame Empfehlung ist es, Einführungen im Rahmen eines Projektes mit den entsprechenden organisatorischen Randbedingungen durchzuführen. Besonders wichtig sind dabei der eindeutige Projektbeginn und die fortlaufende Zielverfolgung (bezogen auf Termin, Kosten und Qualität). (KÖHLER 2003; SCHEURING 2002; SCHMITZ 1999)

Das Thema Zielverfolgung wird teilweise mit einer Forderung nach strengem Controlling noch konkreter. Durch formative Evaluation wird frühzeitiges Erkennen von Fehlentwicklungen und resultierendes Gegensteuern ermöglicht. Hierbei stellt der Vorschlag zur Prozesskontrolle durch die „Anwender“ in Form von qualitativen und quantitativen Befragungen den Bezug zu den Ausführungen über den Werkzeug nutzenden Menschen im vorangegangenen Kapitel her. (BUNGARD 2005, S. 33; EIGNER & STELZER 2009, S. 387)

2.1.3 Prozess- und Vorgehensmodelle zur Bewältigung von Einführungsaufgaben

In allen untersuchten Bereichen, also neben der Werkzeug- und Methodeneinführung auch bei den Implementierungsansätzen von PS-, PPS-, PLM- oder auch ERP-Systemen finden sich wertvolle Hilfestellungen für die Strukturierung des Vorgehens im Change Management.

Gerade im Bereich der Methodeneinführung sind in den letzten Jahren einige Ansätze und konkrete Vorgehensmodelle entwickelt worden: So beschreiben BESKOW ET AL. (1999) ein generelles Modell für Änderungsprozesse (Abbildung 2-5). Dieses wurde zur Einführung der Methode QFD in ein Unternehmen entwickelt. Auf Basis von Fallbeispielen soll nach einer Planungsphase die Implementierung erfolgen bevor die Evaluierung den Einführungsprozess abschließt. Daraus lässt sich die für BESKOW ET AL. hohe Bedeutung der Planung und die an die Implementierung anschließende Evaluation ableiten.

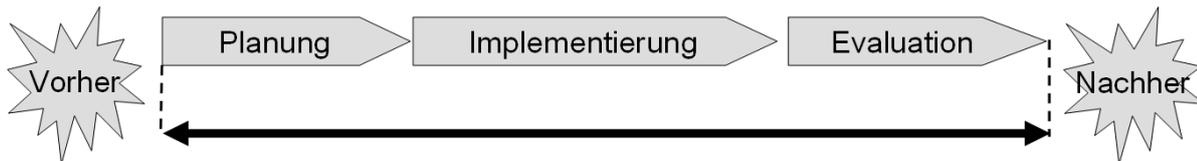


Abbildung 2-5: Darstellung des generellen Modells eines Änderungsprozesses nach BESKOW ET AL. (1999, S. 438)

Im Gegensatz zu dieser abstrakten Vorgehensbeschreibung, die im Bezug auf die eigentliche Implementierung unkonkret bleibt, hat VIERTLBÖCK (2000) einen umfassenden Leitfaden zur Methodenimplementierung entwickelt. Dieser ist auf zwei Planungsebenen, strategisch und operativ, ausgerichtet. Hierzu gibt es jeweils ein Modell, welches die erforderlichen Schritte beinhaltet. Zur Unterstützung der strategischen Planung wird das kontinuierliche Bearbeiten der eng verzahnten Schritte „Analyse der Produktentwicklungsumgebung“, „Erarbeitung einer Langfriststrategie“, „Zentrale Sammlung des Erfahrungswissens“ und „Zentrale Koordination der Methoden- und Hilfsmiteleinführungen“ empfohlen (Abbildung 2-6).

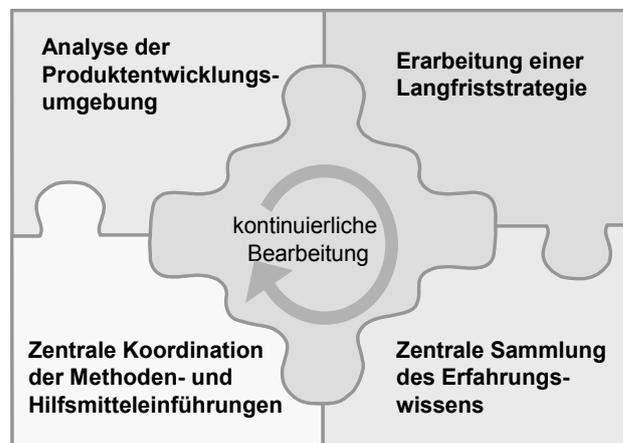


Abbildung 2-6: Modell zur Unterstützung der strategischen Planung der Methodeneinführung nach VIERTLBÖCK (2000, S. 107)

Diesem kontinuierlichen Modell ist ein sequentielles Modell zur Unterstützung der operativen Planung untergeordnet, welches aus acht Schritten besteht. Dabei sind an vorgegebenen Stellen Iterationen durchzuführen. Die Methodeneinführung soll nach diesem Modell mit der Projektvorbereitung im Schritt 1 als organisatorische Einleitung der Einführungsaufgabe beginnen. Die Schritte 2-5 orientieren sich dann am Vorgehenszyklus zur Problemlösung von EHRLENSPIEL (2007). Aufbauend auf Problemklärung und gemeinsamer Zieldefinition werden im

Rahmen dieser Schritte geeignete Methoden und Werkzeuge ermittelt, analysiert, bewertet und ausgewählt. Ergebnisse sind somit die Planung der Einführung und die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen. Zur Ermittlung dieser Anpassungen, sowohl an den Methoden als auch am Umfeld, wird der Einsatz in Pilotprojekten vorgeschlagen. Es folgen die Umsetzung dieser Anpassungen im Schritt 6 und die Verbreitung im Schritt 7. Abgeschlossen wird der operative Teil der Einführung mit der Zielkontrolle und gegebenenfalls daraus abgeleiteten Verbesserungen.



Abbildung 2-7: Modell zur Unterstützung der operativen Planung nach VIERTLBÖCK (2000, S. 117)

USHER (1996) hat mit Hilfe der Methode SADT¹⁸ ein Prozessmodell zur Einführung von Concurrent Engineering in KMUs¹⁹ erarbeitet. Er verbindet darin die beiden Ebenen (strategisch und operativ) in einem von ständigen Rekursionen geprägten umfassenden Ansatz. Diese dadurch entstandene iterative Implementierungsstrategie beginnt mit der Motivationsbildung zur angestrebten Veränderung, bevor die Analyse des aktuellen Systems die Basis für die Einführung bildet. Im Rahmen der nächsten beiden Schritte folgt die Planung der Einführung in Form von Ermittlung der notwendigen Schritte und der Ausführungsplanung. Nach der eigentlichen Einführung folgt die Dokumentation der Ergebnisse. Wichtig zum Verständ-

¹⁸ SADT = Structured Analysis and Design Technique, ist eine grafische Modellierungssprache (MARCA & MCGOWEN 1988).

¹⁹ KMU = Kleine und mittlere Unternehmen.

nis des Modells ist die Empfehlung, die Schritte in einer Vielzahl von Iterationen zu durchlaufen. In der folgenden Darstellung des Modells werden die notwendigen Steuerungsinformationen und Ressourcen als Informationsflüsse im Modell dargestellt.

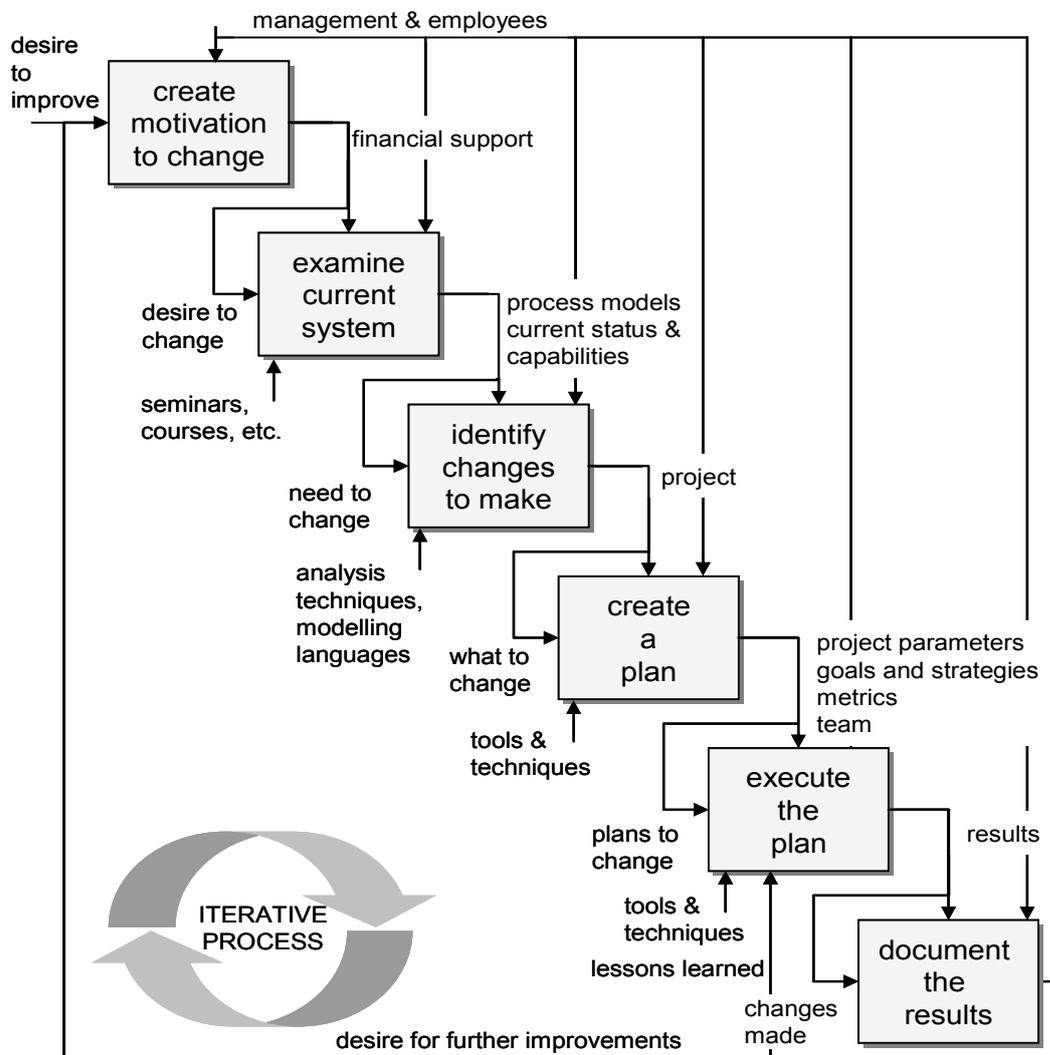


Abbildung 2-8: Iterative Implementierungsstrategie nach USHER (1996)

Bezogen auf die Planung ist das von EHRENSPIEL (2007) erarbeitete Vorgehen zur Einführung einer Konstruktionsmethodik deutlich konkreter (Abbildung 2-9). Allerdings berücksichtigt er die Schritte Implementierung und Evaluation, wie sie eingangs bei Beskow benannt wurden, nahezu gar nicht. Auch bei EHRENSPIEL (2007) steht zunächst in den Schritten 1 und 2 die Schaffung von Motivation für die Veränderung im Vordergrund. Dies sollte nach seiner Ansicht zunächst durch die Ermittlung möglicher Verbesserungen und der daraus abgeleiteten Zielsetzung der Einführung erfolgen, bevor damit die direkt betroffenen Mitarbeiter und das Management überzeugt werden. In Schritt 3 wird die Vorbereitung zur Einführung über Pilotprojekte beschrieben, indem dort Projekte ausgewählt und Abläufe dargestellt werden. Schritt 4 und 5 dienen der Planung der konkreten Schritte zur Implementierung.

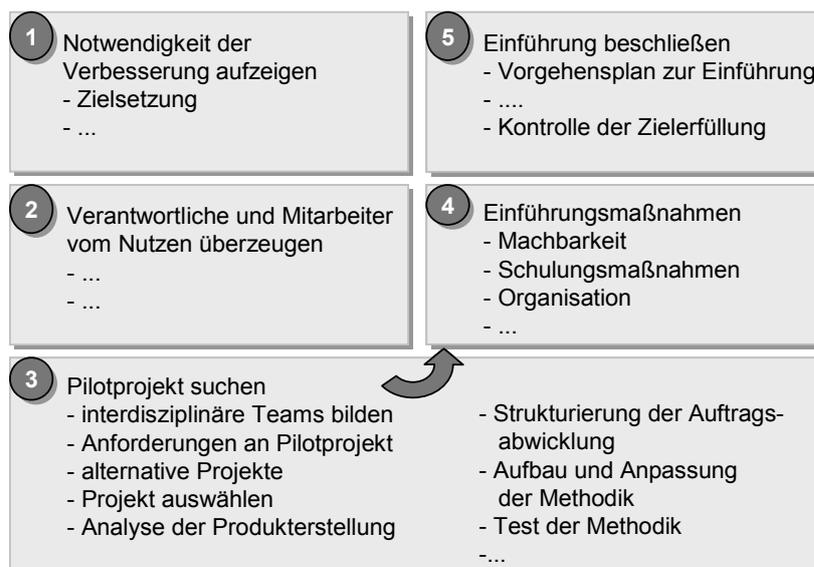


Abbildung 2-9: Vorgehensplan für die Einführung der Konstruktionsmethodik nach EHRENSPIEL (2007, S. 270)

Einen wesentlichen Unterschied zu den anderen dargestellten Modellen bietet STETTER (2000) mit seinen fünf Ebenen zur Methodenimplementierung. Dieses Modell besteht explizit nicht aus sequentiell oder iterativ abgearbeiteten Schritten, sondern vielmehr aus Ebenen, welche die Aktivitäten der Einführung jeweils thematisch zusammenfassen. Damit möchte er zum Ausdruck bringen, dass der zeitliche Ablauf bei derartigen Aufgabenstellungen komplexer und vielschichtiger ist, als dies mit den oben gezeigten Modellen darstellbar ist.

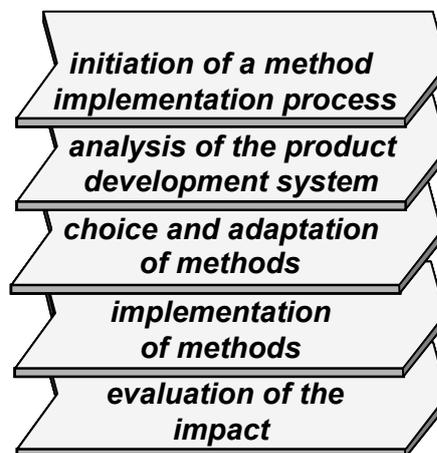


Abbildung 2-10: Modell der fünf Ebenen einer Methodenimplementierung nach STETTER (2000, S. 35)

Im Bereich der Einführung von Planungs- und Steuerungssystemen (PS, ERP, PLM etc.) wird meist einer sequentiellen Darstellung vertraut. Die dadurch nicht dargestellte und möglicherweise erforderliche Flexibilität in Form von Rekursionen oder paralleler Bearbeitung wird, wenn die Notwendigkeit überhaupt erkannt wird, in den Beschreibungen der Modelle aufgenommen. Es folgen beispielhafte Einführungsabläufe aus diesem Umfeld:

HAMACHER & PAPE (1991) schlagen zur Einführung von PS-Systemen fünf sequentielle Schritte vor:

1. Analyse der Ausgangslage, Ermittlung der Anforderungen, Zielfestlegung
2. Konzeptionsphase
3. Umsetzung der Konzeptes in ein EDV-System und Entwicklung der Feinorganisation
4. Qualifizierungsmaßnahmen
5. Schrittweise Einführung

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auch hier keine Evaluation vorgeschlagen wird. Dies zeigt sich ebenso bei anderen Systemeinführungskonzepten.

Ähnlich verhält es sich bei der Einführung von ERP-Systemen. Hier postulieren NIEDEREICHHOLZ & RESKE folgendes: „Eine klassische Einteilung bei der Einführung von Standardsoftware kann in die Phasen Projektvorbereitung, Systemplanung, Prototyping, Realisierung, Systemtest, Produktionsvorbereitung und Stabilisierung erfolgen.“ (NIEDEREICHHOLZ & RESKE 2005, S. 78)

Bezogen auf die Einführung von PLM-Systemen kann die VDI-Norm 2219 herangezogen werden. Dort wird ebenfalls die Projektdefinition vor einer Ist-Analyse an den Anfang des Einführungsprozesses gestellt. Aus der Zieldefinition folgt das einzuführende System, bzw. seine genaue Ausprägung. Die Einführung selbst wird mit dem Betrieb in einer Phase abgehandelt, bevor die Ausweitung des Systemeinsatzes den Prozess abschließt. Evaluation findet auch hier keine entsprechende Erwähnung. Die folgende Abbildung zeigt die zugehörige sequentielle Darstellung.

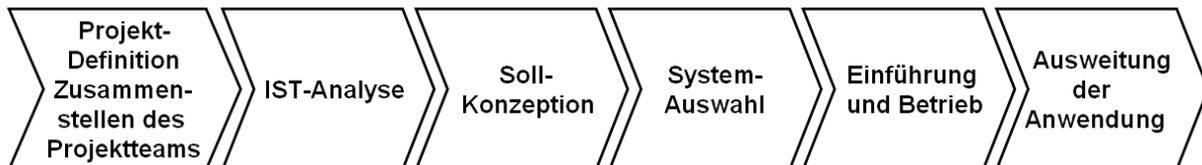


Abbildung 2-11: Schritte zur Einführung eines PDM-Systems nach VDI-Richtlinie 2219

Bezogen auf die Einführung eines PPS-Systems besteht die Möglichkeit diese in fünf Bereiche zu teilen (STEIN 1996 S. 38):

- technische Implementierung
- Grunddatenbereitstellung
- Anwenderschulung
- Systemausgestaltung
- Software-Anpassung

Diese Bereiche werden bei HIRT (1990) in einem 3-Phasen-Konzept zur PPS-Einführung zueinander geführt. Dazu werden die drei Hauptphasen „Vorbereitung“, „Systemauswahl“ und „Einführung“ wiederum dreigeteilt, wie die folgende Darstellung des Modells zeigt.

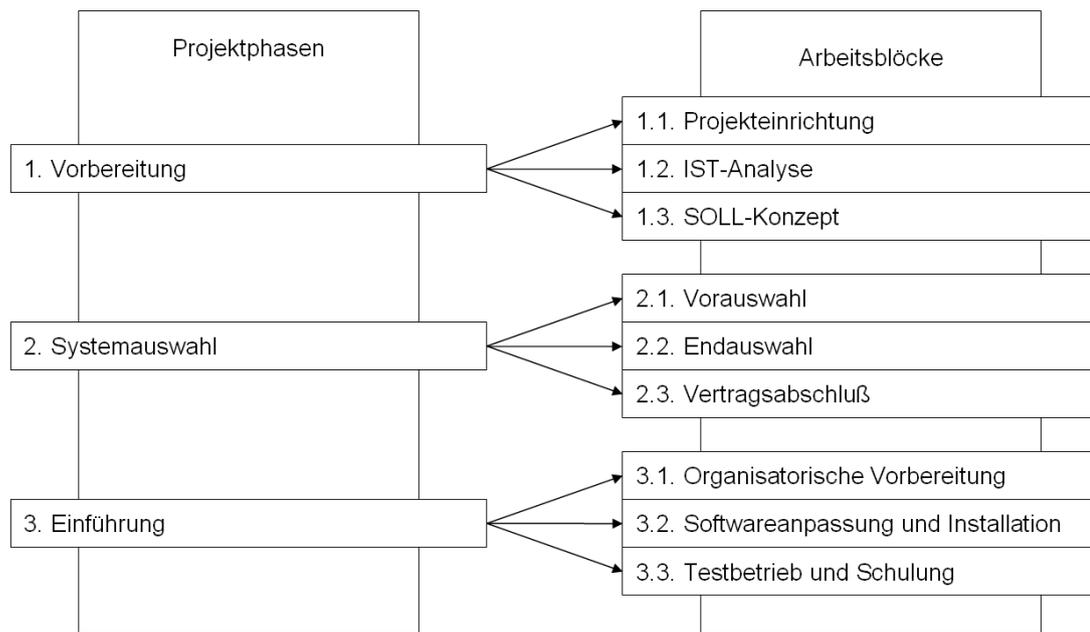


Abbildung 2-12: 3-Phasen-Konzept zur PPS-Einführung nach HIRT (1990)

Allgemeine Bedeutung haben dabei vor allem die Phasen 1 und 3, wohingegen die 2. Phase der Systemauswahl PPS-spezifisch ist. Auf Grund der hohen Relevanz der Inhalte der Teilschritte sollen diese hier kurz vorgestellt werden:

1.1. Projekteinrichtung: „Formulierung von Aufgabenstellung und Zielsetzung“, „Abgrenzung des Untersuchungsbereiches“, „Aufstellung eines Ablauf- und Zeitplans“, „Bildung eines Projektteams aus allen beteiligten Bereichen“

1.2. Ist-Analyse: „Untersuchung der Ablauf- und Aufbauorganisation“, Untersuchung des Beleg- und Informationsflusses“, „Ermittlung des Datengerüsts und der Datenqualität“, „Dokumentation der Schwachstellen“

1.3. SOLL-Konzept: „Entwicklung eines Organisationskonzeptes“, „Erstellung eines Anforderungskataloges“, „Definition der Schnittstellen zu benachbarten Bereichen“, „Abschätzung des Qualifizierungsbedarfs“

3.1. Organisatorische Vorbereitung: „Umsetzung des Organisationskonzeptes“, „Schaltung der systemspezifischen Voraussetzungen“, „Schaffung der technischen Voraussetzungen“, „Abstimmung der Installationstermine“

3.2. Softwareanpassung und Installation: „Konfiguration und Anpassung der Software“, „Installation von Hard- und Software“, „Realisierung der Schnittstellen“, „Einrichtung des Testbetriebes und Abnahme“

3.3. Testbetrieb und Schulung: „Aufstellung des Schulungsplans“, „Besuch von Schulungskursen“, „Einarbeitung in den Testbetrieb“, „Erfahrungsaustausch mit anderen Anwendern“ (HIRT 1990, S. 8ff)

Auch an dieser Stelle fällt erneut auf, dass eine Evaluation nicht im Modell verankert ist.

Unabhängig vom Einführungsobjekt zeigt sich bei nahezu allen Ausführungen, dass der Analyse zu Beginn der Einführungsplanung eine hohe Bedeutung zugeschrieben werden sollte. Dabei wiederum ist ein globaler Blick besonders wichtig. GRIEVES (2006) weist z.B. bei der Einführung von PLM-Software darauf hin, dass es nicht ausreicht, die Technologie zu kennen, sondern dass darüber hinaus auch die beteiligten Personen und die relevanten Abläufe und Prozesse zu analysieren sind. Ein fachspezifischer „Tunnelblick“ birgt die Gefahr, wichtige Aspekte zu übersehen. (vgl. auch Kapitel 2.1.2)

Ein noch nicht erwähnter Ansatzpunkt für die Suche nach geeigneten Einführungsstrategien sind Methodenmodelle. Als Beispiel hierfür kann das Münchner Methodenmodell herangezogen werden. Dieses Modell unterstützt den Einsatz von Methoden, indem es zunächst hilft den Einsatzfall zu untersuchen. Auf dieser Basis folgen die Schritte Auswahl, Adaption und Anwendung (Abbildung 2-13). Parallel sind ständig die Eigenschaften der einzusetzenden Methode zu beachten. Interessant ist auch hier wieder die Bedeutung der Methodenanpassung. (BRAUN 2005)

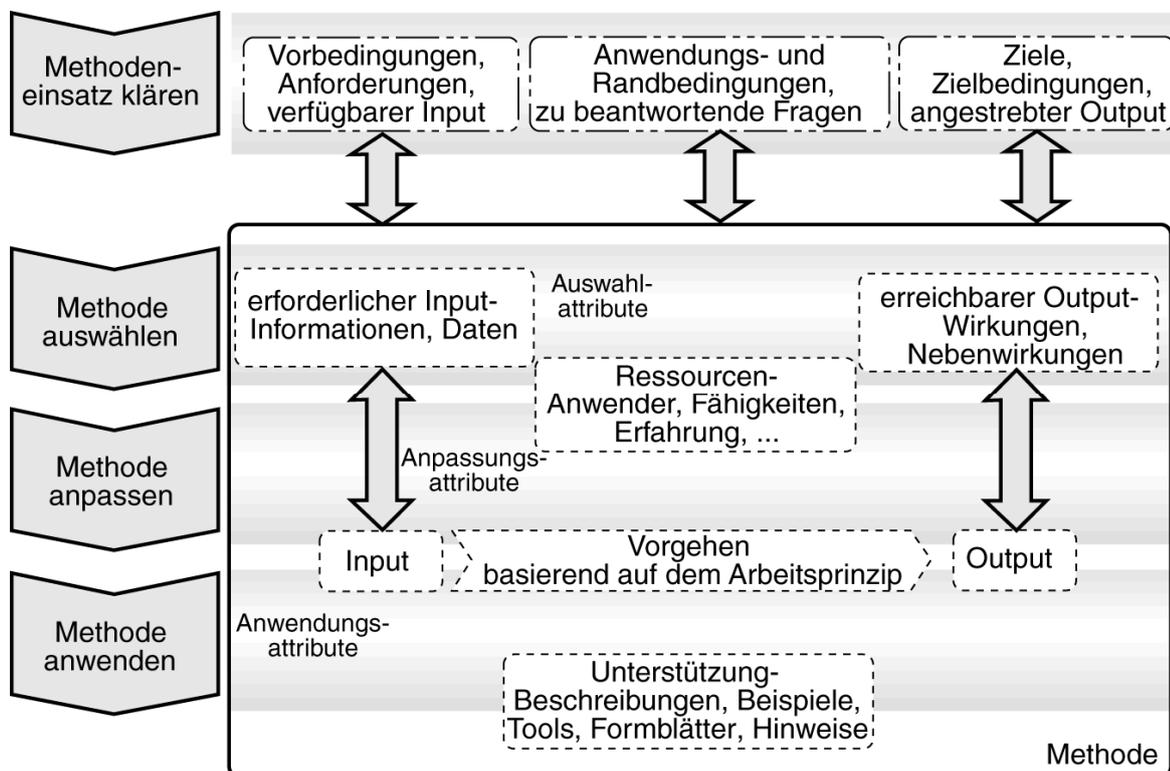


Abbildung 2-13: Das Münchner Methodenmodell (BRAUN 2005)

Für die hier diskutierte Fragestellung haben derartige Modelle den Nachteil, dass sie sich im Wesentlichen mit der Auswahl und Anpassung der geeigneten Methode auseinandersetzen und weniger deren Einführung betrachten. Die Nutzengenerierung durch das Verwenden dieser Modelle bei der Erarbeitung einer Methodik zur Werkzeugeinführung ist daher eher als gering einzuschätzen. Anders verhält es sich mit Vorgehensmodellen zur Entwicklung von Produkten. Auf Grund ihrer Eignung zur Lösung vielfältiger Problemstellungen bieten sie sich auch als allgemeine Vorlage für die Lösung der Aufgabenstellung „Einführung eines Werkzeuges“ an. Als bekannte Beispiele seien der Vorgehenszyklus von EHRENSPIEL (2007)

und das Münchner Vorgehensmodell MVM von LINDEMANN (2007) genannt. Die große Flexibilität und die MVM-Vorschläge zu Methoden und Hilfsmitteln in den einzelnen Vorgehensschritten führten dazu, dass dieses Modell großen Einfluss auf die später vorgestellte, im Rahmen dieser Arbeit entstandene Methodik hatte (siehe Kapitel 4). Aus diesem Grund soll dieses Vorgehensmodell kurz vorgestellt werden.

2.1.4 Das Münchner Vorgehensmodell

Das Münchner Vorgehensmodell MVM wurde auf Basis bekannter Vorgehensmodelle und diverser Forschungsprojekte gemeinsam mit Psychologen unter Einbeziehung der industriellen Anwendung entwickelt. Es bündelt dabei die gemeinsamen Grundgedanken und Vorzüge. Um zu anderen Vorgehensmodellen kompatibel zu sein, baut es auf den folgenden Hauptschritten auf:

- Ziel bzw. Problem klären
- Lösungsalternativen generieren
- Entscheidung herbeiführen

Daraus leitet das Münchner Vorgehensmodell sieben Elemente ab, für welche auch eine Standardabfolge vorgeschlagen wird, welche im Folgenden aufgezeigt werden. Wichtig ist, dass prinzipiell jede beliebige Reihenfolge durchlaufen werden kann.

Ziel Planen:

„Das Element ‚Ziel planen‘ enthält eine Analyse der Situation sowie die Ableitung konkreter Maßnahmen.“ (LINDEMANN 2007, S. 47)

Ziel analysieren:

„Das Element ‚Ziel analysieren‘ umfasst die Klärung und Beschreibung des gewünschten Zielzustandes.“ (LINDEMANN 2007, S. 47)

Problem strukturieren:

„Ist das Ziel einmal bekannt, stellt sich die Frage, auf welchem Wege es am besten zu erreichen ist. Das Element ‚Problem strukturieren‘ dient hierbei der Ermittlung von Handlungsschwerpunkten und ermöglicht eine Fokussierung bei der anschließenden Lösungssuche.“ (LINDEMANN 2007, S. 47)

Lösungsideen ermitteln:

„Das Element ‚Lösungsideen ermitteln‘ beschreibt die Suche nach vorhandenen Lösungen und das Generieren neuer Lösungen.“ (LINDEMANN 2007, S. 48)

Eigenschaften ermitteln:

„Unter ‚Eigenschaften ermitteln‘ ist die Ermittlung der Ausprägungen relevanter Merkmale der betrachteten Systeme durch Eigenschaftsanalysen zu verstehen. Hierbei sind in erster Linie die Eigenschaften der im Rahmen der Lösungssuche erarbeiteten Lösungsideen oder Lösungsalternativen gemeint.“ (LINDEMANN 2007, S. 48)

Entscheidungen herbeiführen:

„Das Element ‚Entscheidungen herbeiführen‘ repräsentiert die Bewertung von Lösungsideen und –alternativen sowie das Treffen einer Auswahl.“ (LINDEMANN 2007, S. 48)

Zielerreichung absichern:

Zur Vermeidung von Risiken bei der Umsetzung der Entscheidung trägt das Element ‚Zielerreichung absichern‘ bei. (LINDEMANN 2007, S. 49)

Die folgende Abbildung zeigt die visuelle Aufbereitung des Modells, welche allein durch die Gestaltung bereits zwei wesentliche Eigenschaften in den Vordergrund rückt. So wurde für die grafische Darstellung als Motiv ein Netzwerk ausgewählt, welches die vielfältige Verwendbarkeit und die flexible Anwendung demonstrieren soll. Die sich überschneidenden Kreise der einzelnen Elemente zeigen darüber hinaus, dass sich die Vorgehenselemente nicht vollständig voneinander abgrenzen lassen und teilweise ineinander übergehen.

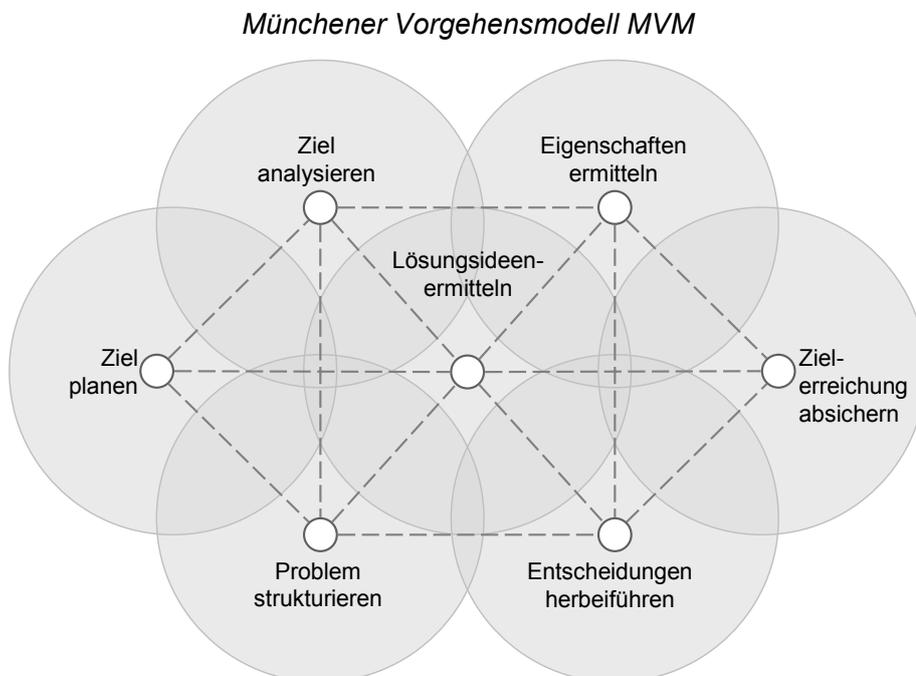


Abbildung 2-14: Münchner Vorgehensmodell nach LINDEMANN (2007)

Dieses Modell lässt sich auf Grund seiner Flexibilität auf nahezu jede Problemstellung anwenden und kann auch rekursiv und ineinander verschachtelt angewendet werden.

Auf Grund dieser Flexibilität eignet es sich auch für andere komplexe Fragestellungen außerhalb der Produktentwicklung. Es wurde für folgende Zwecke entwickelt:

- Als Hilfsmittel zur Planung von Entwicklungsprozessen
- Als Orientierungshilfe innerhalb von Prozessen zur Problemlösung
- Zur Analyse und Reflexion des Vorgehens (auch im Nachhinein)

Damit erscheint es für die hier diskutierte Thematik zur Entwicklung des Vorgehens im Rahmen des Change Management geeignet zu sein.

2.1.5 Zusammenfassung zur Einführung von Werkzeugen

Als Zusammenfassung zur Einführung von Werkzeugen dienen folgende Kernaussagen:

- Einführungsaufgaben in den unterschiedlichen Bereichen Methoden und Werkzeug-einführung und Einführung von Planungs- und Steuerungssystemen haben deutliche Parallelen.
- Evaluation nach Einführungsprojekten findet bis heute nicht ausreichend statt und be-dingt das Auslassen von möglichen Lerneffekten.
- Bekannte erfolgsrelevante Aspekte, wie z.B. die Betonung der Ist-Analyse oder die Einbeziehung des Managements sollten während Einführungsaufgaben berücksichtigt werden.
- Die Berücksichtigung des Menschen als Nutzer des einzuführenden Werkzeuges ist äußerst wichtig für das Vermeiden von Widerständen und das Sicherstellen des Ein-führungserfolges.
- Das Objekt der Einführung muss an sein Einsatzfeld und die Nutzer angepasst werden und darüber hinaus eine geeignete Visualisierung und Dokumentation besitzen.
- Je nach Einführungsaufgabe muss eine geeignete Vorgehensweise (Beteiligung am Entscheidungsprozess, Einführungsstil, Verwendung des Werkzeuges) gefunden wer-den.
- Einführungsmodelle haben in der Regel eine sequentielle Ausrichtung und fokussieren stark die Themen Analyse und Planung. Die Evaluation, wenn auch nicht in allen Mo-dellen berücksichtigt, hat eine hohe Erfolgsrelevanz.
- Allgemeine Problemlösungsmodelle eignen sich als Vorlage oder Hilfsmittel für eine Entwicklungs- und Einführungsmethodik.

2.2 Projektierung komplexer Systeme

Im Kern dieser Arbeit steht die Einführung der numerischen Simulation pneumatischer Sys-teme als Werkzeug zur Unterstützung der Projektierung komplexer technischer Systeme im Maschinen- und Anlagenbau. Dieses Kapitel dient dazu, den Begriff „komplexes technisches System“ zu erläutern, bevor auf den zu unterstützenden Prozess der Projektierung eingegan-gen wird. Dazu erfolgen zunächst eine allgemeine Begriffsdefinition, sowie ein globaler Blick auf Projektierungsprozesse, bevor die Ausprägung dieses Prozesses im Maschinen- und Anla-genbau vor dessen speziellen Herausforderungen erläutert wird.

2.2.1 Komplexe technische Systeme

„Einen Gegenstand unseres Denkens nennen wir System, wenn alle erkannten Elemente und Attribute mit ihren wechselseitigen Beziehungen – auch zur Umgebung – ein einheitliches Ganzes bilden, basierend auf logischen Grundsätzen. Hinzu kommen können Axiome.“ Diese Definition entstand auf Grundlage der vielfältigen umgangssprachlichen Verwendung des

Begriffes System, wie z.B. Sonnensystem, Nervensystem, philosophisches System oder auch Transportsysteme (MÖLLER 1992). Sie ist zur Beschreibung komplexer technischer Systeme noch nicht ausreichend.

AHLBRECHT (2002) verwendet zur Definition der Komplexität zum einen das griechische Wort „πλεκο“ mit der Bedeutung „flechten, stricken“ und zum anderen aus dem Lateinischen den Begriff „complico“ mit der Bedeutung „zusammenfalten“. Daraus leitet er ab, dass Objekte, die als komplex zu bezeichnen sind, in irgendeiner Weise verflochten und zusammengefaltet sind. Nach TOSSAVAINEN (2002) bedeutet Komplexität die Interaktion von vielen verschiedenen Komponenten und die daraus resultierenden Eigenschaften. Bei der allgemeinen Beschreibung von Problemen in der Systemtechnik nennen PAHL ET AL. (2007) als wichtiges Merkmal neben der Unbestimmtheit der Systeme deren Komplexität und beschreiben sie wie folgt: „Es bestehen viele Komponenten mit unterschiedlich starker Verknüpfung, die sich gegenseitig beeinflussen.“

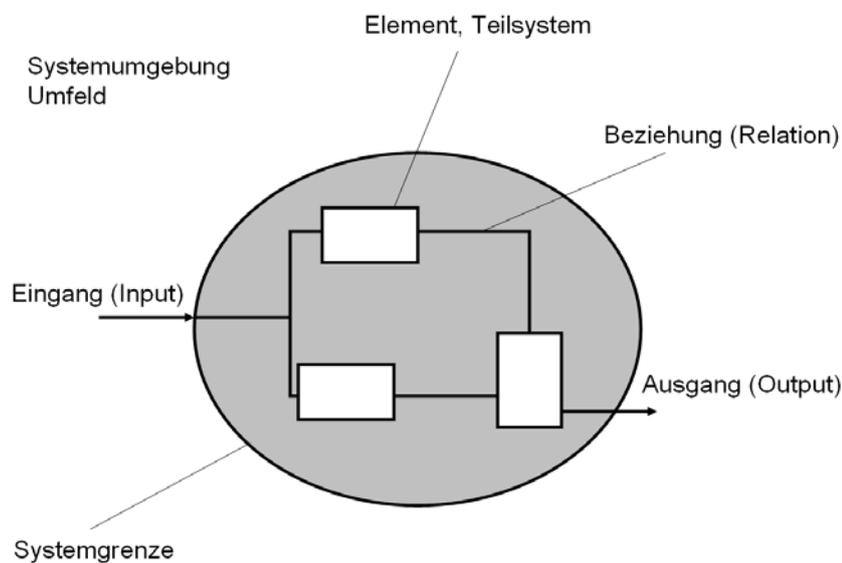


Abbildung 2-15: Modell zur Erläuterung des Systembegriffs nach EHRENSPIEL (2007)

Nicht im Widerspruch dazu steht die Definition von EHRENSPIEL (2007): „Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (Teilsystemen), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Ein System wird durch eine Systemgrenze von der Umgebung abgegrenzt und steht mit ihr durch Ein- und Ausgangsgrößen in Beziehung (offenes System). [...] Nach ihrem Verhalten können statische und dynamische Systeme unterschieden werden.“ Zu dieser Definition hat EHRENSPIEL außerdem ein entsprechendes Modell entwickelt, welches die Abbildung 2-15 zeigt.

Das von BOSSEL 1994 eingeführte Merkmal „Systemzweck“ soll zur Definition von Systemen nicht übernommen werden. Der Systemzweck kann allerdings ein wichtiger Hinweis bei der sinnvollen Festlegung der Systemgrenzen für die Systemanalyse sein.

KREIMEYER (2010, S. 44ff) fasst komplexe Systeme als solche Systeme auf, die aufgrund der Vielzahl von Entitäten, Wechselbeziehungen und Zuständen schwer zu analysieren, zu verstehen oder zu erklären sind. Dabei führt er als besondere Merkmale von komplexen Systeme-

men deren Struktur, ihre variierende Konfiguration, die Wechselbeziehungen der Bestandteile, die (nicht lineare) Abhängigkeit des Systemverhaltens vom Verhalten der Einzelbestandteile, die Reaktion des Verhaltens auf äußere Einwirkungen und das schwierige Systemverständnis auf.

LINDEMANN (2007) präzisiert diese Definition, indem er die Komplexität von Systemen durch folgende Merkmale beschreibt:

- Elemente: Art und Verschiedenheit der Elemente, Anzahl der Elemente, Ungleichmäßigkeit der Aufteilung der Elemente
- Relationen: Art und Verschiedenartigkeit der Relationen, Anzahl der Relationen, Ungleichmäßigkeit der Aufteilung der Relationen
- Dynamik: (Eigen-)Dynamik des Systems
- Zustände: Art und Anzahl der möglichen Zustände

EHRENSPIEL (2007) empfiehlt zur Systemanalyse einen wechselnden Blick auf unterschiedliche Hierarchieebenen des Systems. Vom System als „Ganzes“ über Detaillierungsschritte gelangt man bis hin zu den „Details“. Die entgegen gesetzte Vorgehensweise wird als Abstraktion bezeichnet (Abbildung 2-16). Auf der obersten Hierarchieebene wird für das System der Begriff Black Box verwendet. Zur Beherrschung der Komplexität im Umgang mit Systemen ist es wichtig, über unterschiedliche Systembetrachtungen die Struktur erschließen zu können.

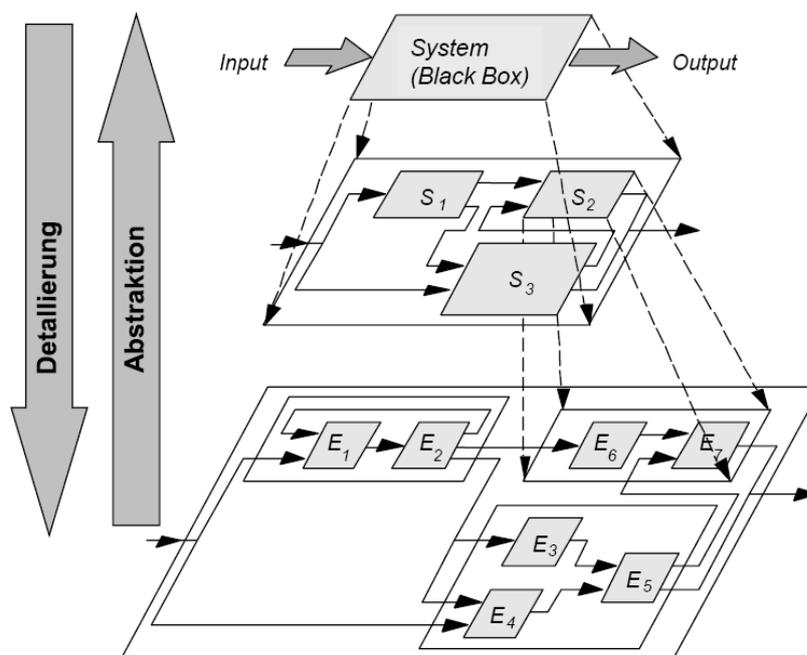


Abbildung 2-16: Systemhierarchie nach EHRENSPIEL (2007)

Der hier verwendete Begriff Black Box beschreibt eine Methode, die sehr häufig zur Analyse von Systemstrukturen verwendet wird. DAENZER ET AL. (2002) verwenden sie im Rahmen des

System Engineering mit dem Ziel, den Sachverhalt eines Systems auf die wesentlichen Aspekte zu reduzieren und die Zusammenhänge zwischen einem System und seiner Umgebung darzustellen. Dazu wird die Systemgrenze derart festgelegt, dass sich das betrachtete System dadurch vom Umfeld trennt. Dies ermöglicht unter anderem ein besseres Verständnis für die Gesamtfunktion. Abbildung 2-17 zeigt diese Methode am Beispiel des Systems Druckmaschine.

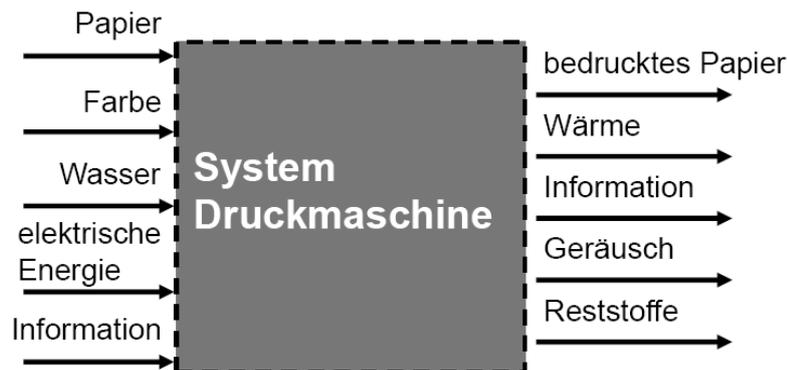


Abbildung 2-17: Black Box am Beispiel des Systems Druckmaschine nach LINDEMANN (2007)

Mit Hilfe der hier aufgeführten Definitionen von Systemen und Komplexität lassen sich Systeme als mehr oder weniger komplex bezeichnen. Es verbleibt aber auf Grund der teilweisen Unschärfe innerhalb der Definition stets eine gewisse Subjektivität bei der Beurteilung.

Begrifflichkeiten und Strukturen in technischen Systemen

Die allgemeinen Erläuterungen zu Systemen reichen in der Regel nicht aus, um die Strukturen technischer Systeme zu erfassen, bzw. darüber im technischen Umfeld zu diskutieren. Aus diesem Grund haben KARNOPP ET AL. (2000 S. 5f) versucht, die bestehende Einteilung in System, Element und Relation zu erweitern und dazu den Begriff des Subsystems mit folgender Erläuterung eingeführt: „[...] große Teile eines Systems werden als Subsysteme und primitive [einfache] Teile von Subsystemen als Komponenten bezeichnet. Natürlich kann die Hierarchie von Komponenten, Subsystemen und Systemen niemals absolut sein, da sogar die einfachsten Teile eines Systems so detailliert modelliert werden können, dass sie ein komplexes Subsystem darstellen.“ Weiter geben sie die Empfehlung, die Einteilung je nach Anwendungsfall vorzunehmen und halten fest, dass ein Subsystem grundsätzlich ein Teil eines Systems ist, der selbst wie ein System aufgebaut ist. Das bedeutet, dass ein Subsystem unterteilt wird in Komponenten, die untereinander agieren. Auf einer derartigen Beschreibung des Begriffes Subsystem aufbauend hat FÖRSTER (2003) die Struktur von Maschinen und Anlagen, also den im Kern dieser Arbeit stehenden technischen Systemen, vorgenommen (Abbildung 2-18):

Eine Anlage oder Maschine wird demnach in einer Produktstruktur dokumentiert, die ihre Unter- und Einzelteilstruktur wiedergibt. Die von FÖRSTER (2003) verwendete Einteilung der Baugruppen als Subsysteme und die Module als Elemente kann diskutiert werden. Dies ist an dieser Stelle aber nicht von entscheidender Bedeutung, wie die oben zitierte Empfehlung zur auf den Anwendungsfall bezogenen Einteilung von KARNOPP ET AL. (2005) richtig vor-

schlägt. Wichtig ist vielmehr das Grundgerüst, welches er für Maschinen und Anlagen vorschlägt.

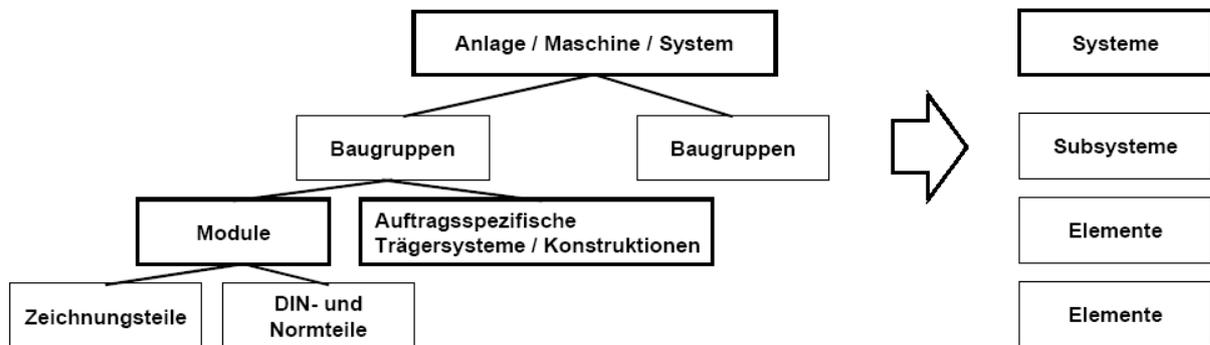


Abbildung 2-18: Strukturen von Maschinen und Anlagen (FÖRSTER 2003)

Für die spätere Anwendung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik sind noch weitere Begriffe aus dem Kontext technischer Anlagen und Maschinen hilfreich. Die zu Systemen kombinierten Produkte lassen sich selbst noch einteilen. LINGAU (1994) definiert dazu den Begriff des Typs, indem er festlegt, dass eine Klasse von ähnlichen Produkten als Typ oder Produkttyp bezeichnet wird. Auf dieser Basis kann wiederum eine Einteilung in Produktfamilie und Produkttyp vorgenommen werden, wie sie FÖRSTER auf die oben genannten Module anwendet. Dabei gilt, dass „... eine Produktfamilie durch die Funktion definiert ist und ein Produkttyp durch seine Bauart. Dies bedeutet, dass in einer Produktfamilie verschiedene Typen zusammengefasst sind.“ (FÖRSTER 2003)

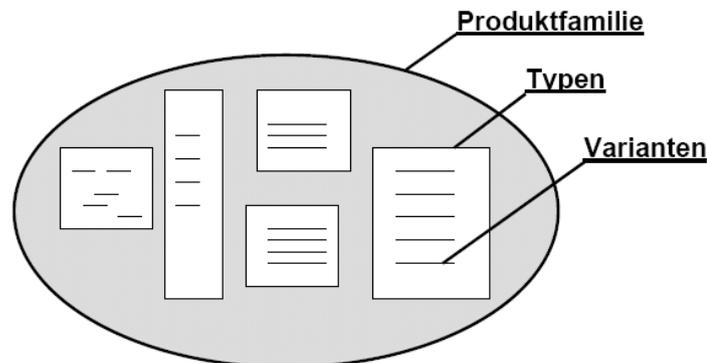


Abbildung 2-19: Produktfamilie, Variante und Typ (FÖRSTER 2003)

2.2.2 Projektierung technischer Systeme

Da Projektierung ein sehr vielfältig gebrauchter Begriff ist, ist es zunächst erforderlich, einige der wichtigsten Verwendungen vorzustellen, um auf dieser Basis eine Definition für diese Arbeit zu erstellen. Im Folgenden können die Prozessbestandteile begutachtet und ein Blick auf mögliche organisatorische Ausprägungen geworfen werden, bevor auf die Projektierung pneumatischer Systeme eingegangen wird.

Definition von Projektierung

Eine einfache, für diese Arbeit aber nicht zielführende, Beschreibung des Begriffes Projektierung liefert BIRK (2004), wenn er damit die Bearbeitung eines Auftrages mit einem Projektteam auf Basis von Kundenanforderungen bezeichnet. Projektierung steht in diesem Zusammenhang für die Anwendung der Grundsätze des Projektmanagements²⁰ für einen Kundenauftrag.

Nach ABMANN (1996) wird der Begriff Projektieren in der Automatisierungstechnik für alle planenden Arbeitsvorgänge von der Angebotsphase bis zur vollständigen Inbetriebnahme verwendet. Dabei erarbeiten und spezifizieren Vertrieb und Konstruktionsabteilungen technische Lösungskonzepte. Auch bei FÖRSTER (2003) wird die Projektierung im Unternehmensbereich Vertrieb beheimatet.

Sehr praxisbezogen ist die Definition nach RICHTER UND IBERLE (1992), die unter der Projektierung hydraulischer Anlagen den Vorgang verstehen, der, ausgehend von einem mechanischen Anforderungsprofil, die konkret erforderlichen hydraulischen Komponenten und deren Verschaltung ermittelt.

SCHUHMANN (2001) spricht von funktionaler Projektierung, wenn er auf Basis der konstruktionsmethodischen Grundlagen nach PAHL ET AL. (2007) den Funktionsgedanken im Sinne einer auftragsbezogenen Produktstrukturierung weiterentwickelt, welche er in der Einzel- und Kleinserienfertigung des Maschinen- und Anlagenbaus anwenden will. Ziel ist es innerhalb kurzer Zeit ein für die Problemstellung relevantes und noch relativ neutrales Gesamtsystem zu erstellen, ohne dass eine vorzeitige Lösungsdiskussion stattfindet. Projektierung ist in diesem Sinne ein Teilschritt der technischen Lösungssuche in der frühen Konzeptphase.

RICHTER (1992) definiert als Ausgangspunkt der Projektierung zum einen den aus einem Planungsvorgang resultierenden Entwicklungsauftrag (angelehnt an VDI2222) innerhalb eines Unternehmens, und zum anderen eine durch den Kunden an das Unternehmen gerichtete Anfrage. Man spricht von einem Angebot, wenn die Projektierung für einen Kunden erfolgt.

BAUMANN & LOOSCHELDERS (1982) erklären, dass systematisches Projektieren eines technischen Systems ebenso wie systematisches Konstruieren eines technischen Systems eine Ingenieurstätigkeit ist, die in planmäßigem Vorgehen schrittweise nach Regeln durchgeführt wird. BAUMANN & LOOSCHELDERS unterscheiden dabei, dass systematisches Projektieren von der Aufgabenstellung bis nach Anfertigung der Angebotsunterlagen reicht und systematisches Konstruieren von der Aufgabenstellung bis nach Anfertigung der Erstellungsunterlagen. Folglich definieren sie die technische Lösungsfindung, sowie den entsprechenden Begriff bei der Angebotserstellung, die technische Angebotsbearbeitung, als Projektierung. In der folgenden Abbildung werden die Teilschritte dieser Projektierung dargestellt.

²⁰ Ein Projekt ist ein Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, wie z.B. Zielvorhaben, zeitliche, finanzielle, personelle oder andere Begrenzungen, Abgrenzung gegenüber anderen Vorhaben, projektspezifische Organisation (DIN 69901:2009-01).

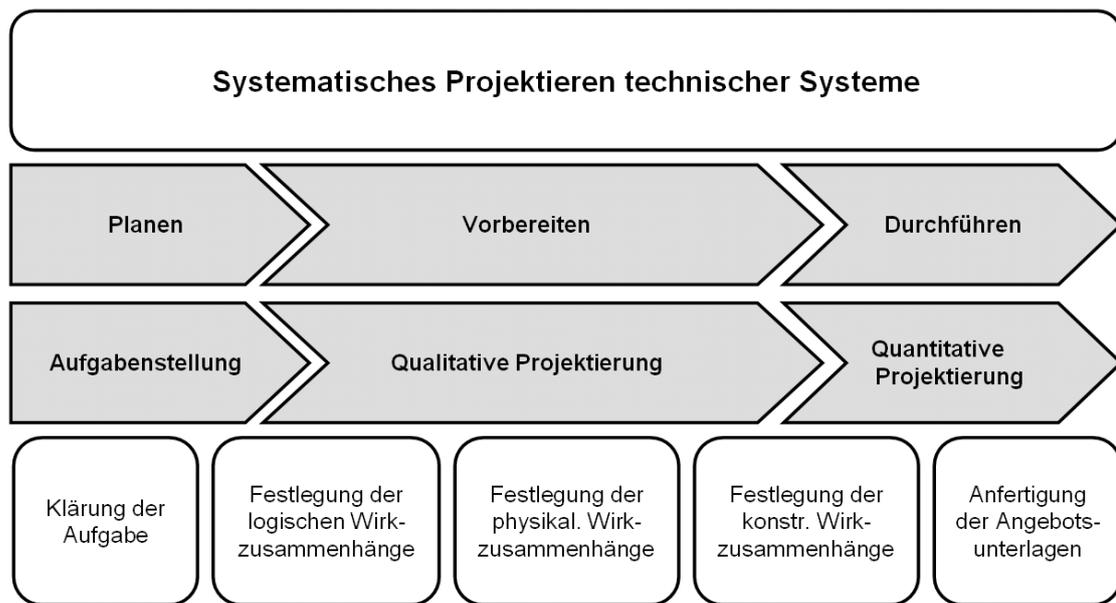


Abbildung 2-20: Systematisches Projektieren technischer Systeme
(nach BAUMANN & LOOSCHELDERS 1982)

Nach TROPSCHUH (1989) handelt es sich beim Begriff Projektieren um einen Begriff der industriellen Praxis, welcher von organisatorischer Seite geprägt wird. Als Ergebnisse des Projektierens werden Projekt- und Angebotszeichnungen geliefert, die im Angebot (Beschreibung und Preise) dargestellt werden. Mit Kundenzuschlag wird aus dem Angebot ein Auftrag. Er nennt als Synonym für Projektieren außerdem „vorläufiges Konstruieren“. Es werden die für den Kunden relevanten Ergebnisse auf zum Teil formlosen Projekt-Zeichnungen detailliert ausgearbeitet, wohingegen systeminterne Details (z.B. Detailkonstruktionen, Maße, Fertigungsraten etc.) offen bleiben.

TROPSCHUH (1989) gibt darüber hinaus auch eine mündliche Definition von EHRENSPIEL wieder, die wie folgt lautet: „Projektieren ist eine (bisher noch nicht ausreichend definierte) konstruktive Tätigkeit wie Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten, die Teile des gesamten Konstruktionsprozesses umfasst. Es werden dabei die Teile des gesamten Konstruktionsprozesses durchlaufen, die nötig sind, um alle für den Nutzer wichtigen Eigenschaften des zu konstruierenden Produkts vorab festzulegen. Man greift dabei auf Erfahrungen mit ähnlichen Produkten zurück.“

Die hier zusammengetragenen Definitionen zu den Begriffen Projektierung und Projektieren zeigen deutlich, dass es kein einheitliches Begriffsverständnis gibt. Aus diesem Grund ist es für die weitere Diskussion erforderlich, folgende Definition festzuschreiben:

Projektierung beschreibt allgemein die Tätigkeiten zwischen Kundenanfrage und Übergabe des Angebotes. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der technischen Lösungssuche, -auswahl und -bewertung, sowie der Dokumentation zur Erfüllung der Kundenanforderungen.

Projektierung steht dabei sowohl für die Tätigkeit als auch für die Organisationseinheit, die diese Tätigkeit ausführt (vergleichbar mit der entwickelnden Entwicklungsabteilung).

Tätigkeiten im Rahmen des Projektierungsprozesses

Nach der vorangegangenen Definition umfasst die Projektierung den Zeitraum zwischen Kundenanfrage und Angebot. Davon ausgehend muss zusammengefasst werden, welche Schritte und Tätigkeiten dies umfasst, bevor auf Vorgehensweisen zum Kern der Projektierung, der technischen Lösungsfindung, eingegangen werden kann. Hierzu sind selbstverständlich auch Erläuterungen zu verwenden, die nicht explizit den Begriff Projektierung aufgreifen. Die Beschreibungen in der Literatur sind unterschiedlich konkret:

KÖRSMEIER (1996) z.B. bleibt bei seiner Definition über den Inhalt der Projektierungstätigkeiten vage: „Welche Arbeiten zur Erstellung eines Angebotes im Einzelfall durchzuführen sind, wie der Ablauf bei der Angebotsbearbeitung organisiert ist und wie die Angebotsdokumente gestaltet sind, hängt von unternehmens- und produktspezifischen Gegebenheiten ab.“ Die wesentliche produktbezogene Einflußgröße ist z.B. die Produktkomplexität, wobei dabei nicht die technische sondern vielmehr die vertriebsbezogene Komplexität gemeint ist (KÖRSMEIER 1996). Diese Ausführungen deuten damit auf die Schwierigkeit, allgemeine Projektierungsinhalte zu definieren, hin.

KOCH (1984) beschreibt den Begriff Projektieren als Synonym für die technische Angebotsbearbeitung inklusive zugehöriger Konstruktion. Er bezeichnet damit die Erarbeitung einer technischen Lösung in der Phase der Angebotserstellung und beschreibt den Begriff weiter, indem er zusätzliche wichtige Tätigkeiten mit aufnimmt. Neben der für ihn zentralen Konzeption und dem Entwurf der technischen Lösung sind folgende Tätigkeiten erwähnt:

- Technisches und wirtschaftliches Bewerten
- Erstellen der Grundlagen für die Vorkalkulation
- Festlegen der Gewährleistungen
- Ausarbeiten des Angebotes

Ausgehend von der oben beschriebenen Definition der Projektierung sind somit die Schritte Grundlagenermittlung bis Vorbereitung der Vergabe Teil der Projektierung.

Konkreter im Bezug auf die technische Lösungsfindung ist die VDI2222, die Tätigkeiten und den Ablauf der Angebotsbearbeitung definiert. Abbildung 2-21 zeigt diese Tätigkeiten und bringt sie in einen zeitlichen Ablauf.

Die technische Lösungsfindung als Schwerpunkt der Projektierung erfolgt direkt nach Planung der Vorgehensweise und bildet damit die Grundlage für alle weiteren Schritte. Dies ist nachvollziehbar, da Schritte wie Preisermittlung oder Definition des Liefertermins erst abschließend möglich sind, wenn der Lieferumfang, also der Inhalt der technischen Lösung bekannt ist.

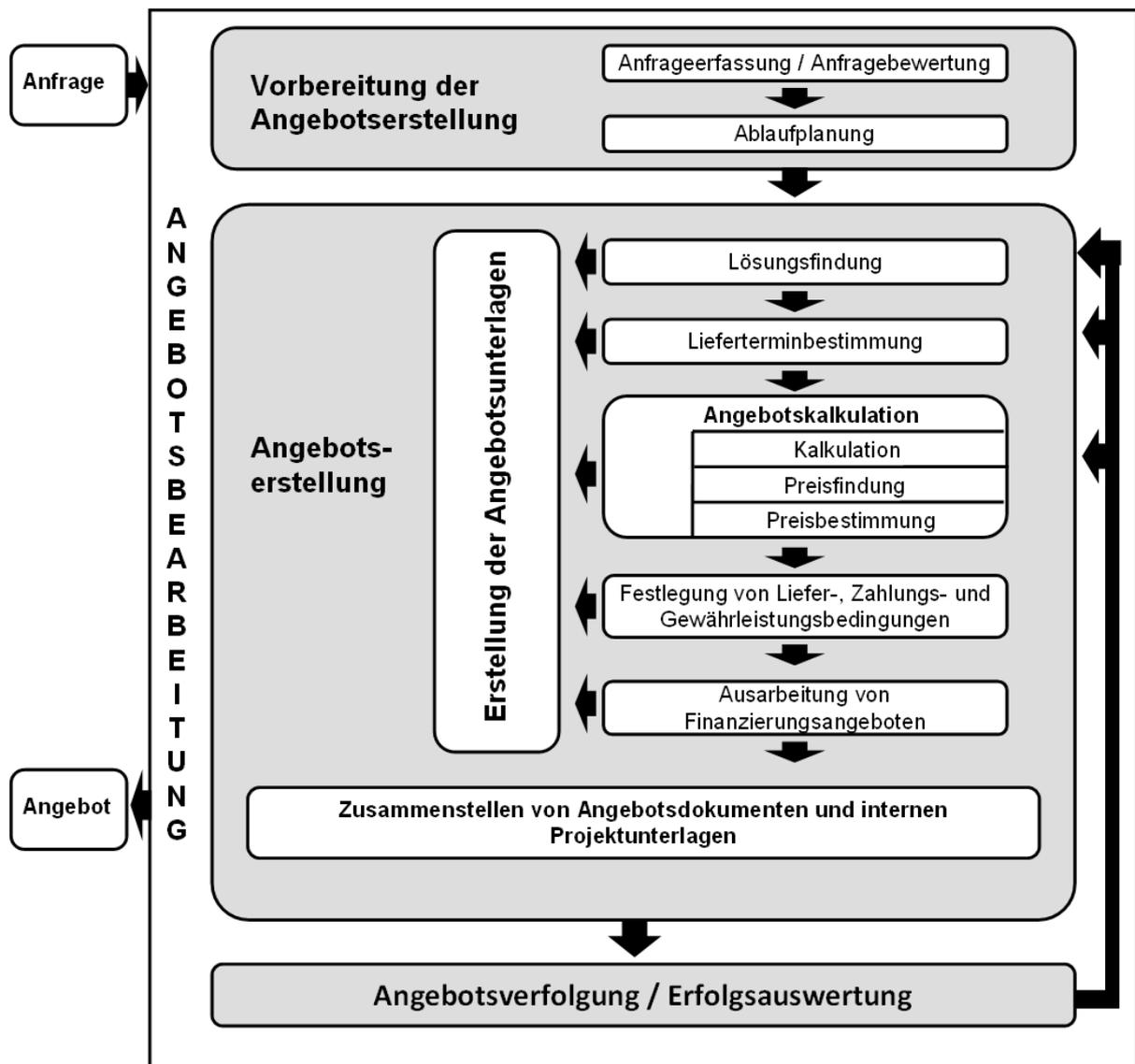


Abbildung 2-21: Tätigkeiten und Ablauf der Angebotsbearbeitung nach VDI2222

ABMANN (1996) kommt bei seiner Analyse zu dem Schluss, dass Projektierungstätigkeiten in vielen Fachabteilungen der Unternehmen anfallen. Die Abbildung 2-22 zeigt sechs Teilaufgaben der Projektierung und die dabei beteiligten Fachabteilungen.

Aus dieser Aufstellung kann abgeleitet werden, dass ein hoher Aufwand in der Projektierung allein für die Koordination zwischen den Bereichen, die sich meist durch diverse Abhängigkeiten untereinander auszeichnen, zu erwarten ist. Wenn davon ausgegangen wird, dass die technische Lösungssuche und -auswahl den Kern der Projektierung darstellt, dann wird hier sehr schnell deutlich, dass dieser Prozess mit besonderer Sorgfalt zu begleiten ist.

WEULE UND LEMBKE (1999) beschreiben die technische Lösungssuche und Lösungsauswahl bei der Projektierung von Aggregaten mit den folgenden Schritten:

- Pflichtenheft als Ausgangsbasis
- Dimensionierung und Auslegung

- Komponentenauswahl
- Lösungsverifikation
- Angebot als Ergebnis

Erweitert man die Komponentenauswahl um gegebenenfalls die Definition erforderlicher Neukonstruktionen, so stellt diese Beschreibung eine allgemein verwendbare Aufstellung für die Projektierung im Anlagenbau dar.

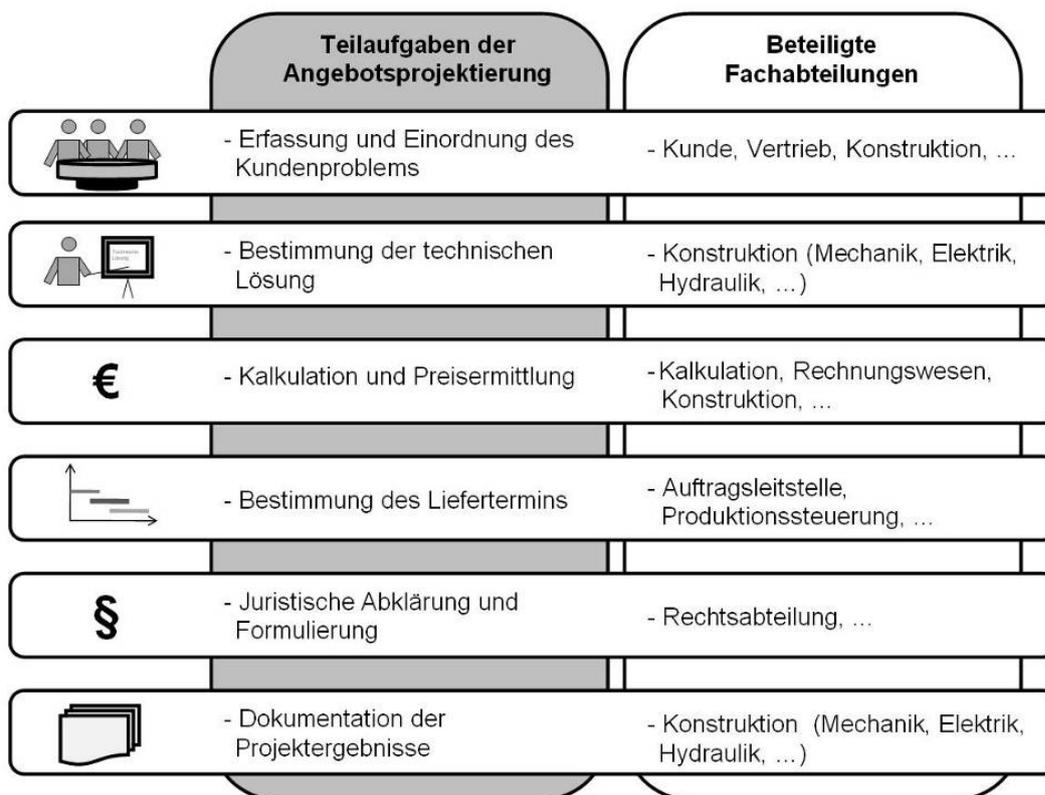


Abbildung 2-22: Teilaufgaben der Projektierung nach ABMANN (1996)

Letztlich fokussieren alle Tätigkeiten der Projektierung ein gemeinsames Ziel: Über die Problem- und Aufgabenstellung eine geeignete technische Lösung zu finden, die in Form eines für den Kunden verwertbaren Angebotes aufbereitet wird, um letztendlich einen profitablen Auftrag zu erhalten.

Angebot als Ergebnis der Projektierung

Ergebnis der Projektierung ist das Angebot. Hierzu haben sich gewisse Standards durchgesetzt, die dazu führen, dass Angebote allgemein verwertbar sind. Dazu müssen verschiedene Grundsatzinformationen enthalten sein. Angebote können in Form und Umfang variieren. EVERSHEIM & SCHUH (1996) definieren vier Hauptelemente eines Angebotes:

- die technische Lösung, zugeschnitten auf die Wünsche und Forderungen des Anfragenden bzw. Ausschreibenden
- den Preis, bestimmt anhand der erwarteten Herstellungskosten und der vom Markt diktierten Preisobergrenze
- den möglichen Liefertermin (unter Berücksichtigung der bestehenden Auslastung und des Kapazitätsbedarfs für die angebotene Leistung)
- den Lieferbedingungen, einschließlich Zahlungsbedingungen, Gewährleistung, Haftung, Eigentumsvorbehalten etc.

In der Abbildung 2-23 finden sich, angelehnt an nach VDI2222, diese Hauptelemente ebenso, wie eine Kurzbeschreibung des Angebotes.

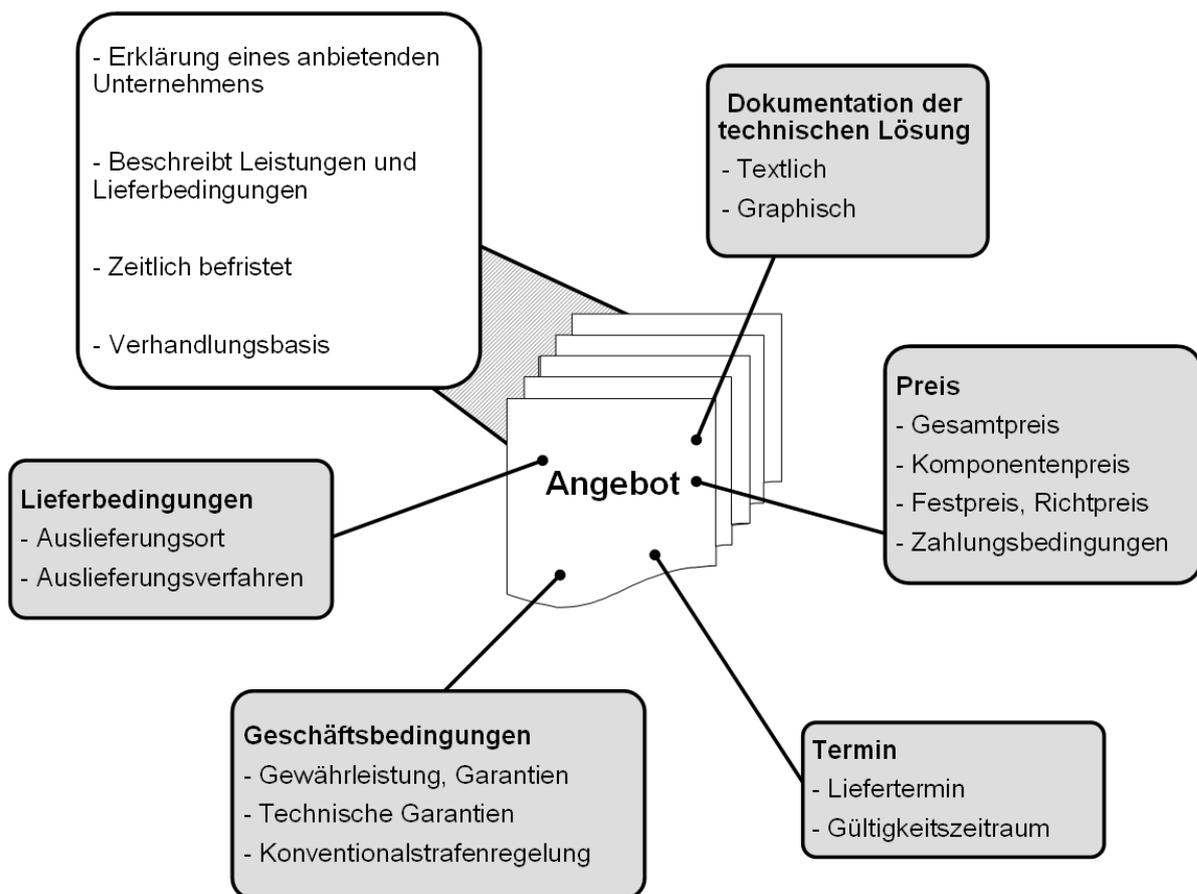


Abbildung 2-23: Bestandteile eines Angebotes nach VDI2222

Demnach ist ein Angebot eine formale Erklärung eines anbietenden Unternehmens. Darüber hinaus definiert das anbietende Unternehmen zeitlich befristet, zu welchen Bedingungen es welche Leistungen zu welchem Preis anbietet. Es wird außerdem darauf hingewiesen, dass Angebote in der Regel die Grundlage von Verhandlungen sind. Diese Eigenschaft macht es für beide Verhandlungsseiten sehr wichtig, dass die Leistungsbeschreibung ausreichend genau ist. Unklare, unvollständige oder beliebig interpretierbare Leistungsbeschreibungen erhöhen

die Gefahr, dass gerichtliche Auseinandersetzungen bezüglich der Leistungserbringung während oder nach der Auftragsphase erforderlich werden.

EVERSHEIM & SCHUH (1996) erklären außerdem, dass „... die Qualität des Angebotes insbesondere bei Investitionsgütern entscheidend zum Erfolg der Verhandlungen [beiträgt].“ Systematisches Vorgehen bei der Angebotserstellung kann die Verkaufsbemühungen wesentlich unterstützen.

Projektierungswerkzeuge

RICHTER (1992) definiert im Rahmen seiner Ausführungen zur rechnergestützten Projektierung hydraulischer Systeme Projektierungshilfsmittel als Werkzeuge die den Projektierer wesentlich bei den Tätigkeiten während der Projektierung hydraulischer Anlagen unterstützen. Diese Definition kann allgemein wie folgt formuliert werden und soll für die weitere Diskussion im Rahmen dieser Arbeit Gültigkeit haben: *Projektierungshilfsmittel und -werkzeuge unterstützen den Projektierer wesentlich bei der Ausführung der Projektierungstätigkeiten.*

WEULE UND LEMBKE (1999) nennt anhand der oben erwähnten Projektierungsschritte verschiedene Beispiele für Projektierungswerkzeuge und hat diese auch grafisch dargestellt (Abbildung 2-24).

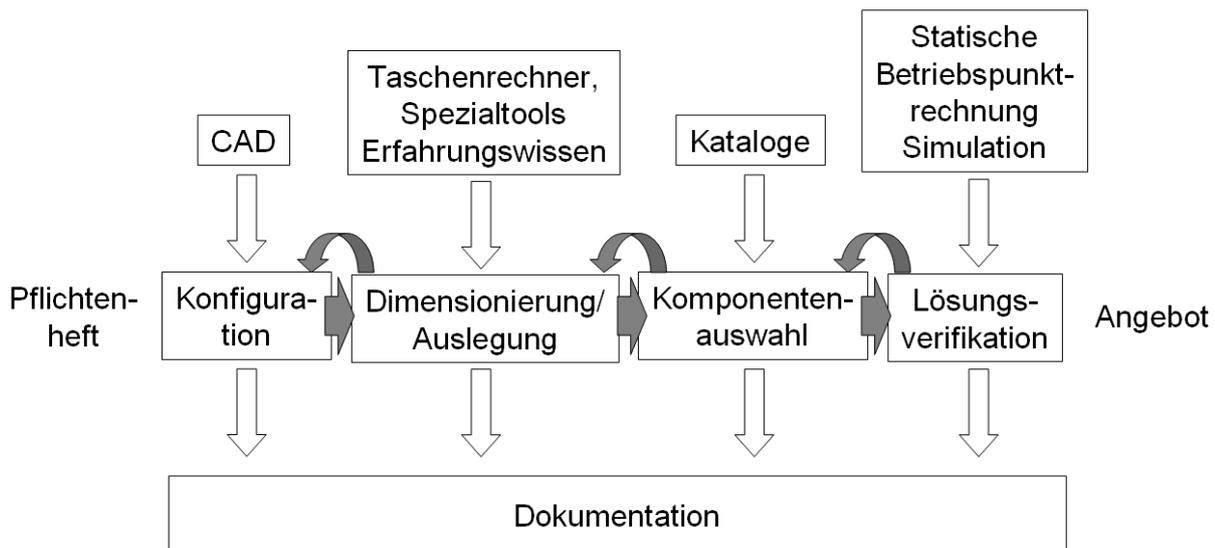


Abbildung 2-24: Rechnerunterstützung bei der Projektierung nach WEULE UND LEMBKE (1999)

Gerade der Punkt Spezialtools lässt dabei vielfältige Ausprägungen und Umsetzungsmöglichkeiten zu. In dieser Arbeit wird z.B. die Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug eingeführt.

In der Literatur finden sich vereinzelt Hinweise zur Ausgestaltung von Projektierungshilfsmitteln. So werden z.B. an einer Stelle neun Grundsätze zum Aufbau rechnergestützter Projektierungssysteme vorgestellt. Hiervon ist gerade der 6. Grundsatz hervorzuheben, da dieser für die späteren Ausführungen zur erarbeiteten Vorgehensweise besondere Relevanz hat. Im 6. Grundsatz wird postuliert, dass Projektierungswerkzeuge für den Projektierer transparent sein

müssen, er sich demzufolge mit den Ergebnissen identifizieren kann (TECHNISCHE UNIVERSITÄT KARL-MARX-STADT 1989).

TROPSCHUH (1989) stellt eine weitere interessante Anforderung an Hilfsmittel. Er fordert ein, dass einem Anfänger durch das Hilfsmittel so zu Hilfe gekommen wird, dass dessen Wissenserwerb und das Sammeln nicht bei „Null“ beginnen muss, sondern er vielmehr auf vorhandenes Wissen, den Stand der Technik, zurückgreifen kann.

Ein gutes Beispiel für konkrete Anforderungen an ein Projektierungshilfsmittel sind nach HÖHNE ET AL. (1998) die beiden zu erfüllenden Funktionen für ein Projektierungshilfsmittel für Investitionsgüter:

- Konzipieren des Produktes auf Grundlage der Kundenanforderungen und des technologischen Know-hows des Anbieters – Produktkonfiguration.
- Bestimmung der zu erwarteten Kosten für das konfigurierte Produkt – Kostenprognose.

Aus diesem Beispiel lässt sich ableiten, dass die Anforderungen grundsätzlich davon abhängen, welches Produkt Gegenstand der Projektierung ist und welche Teilaufgabe der Projektierung unterstützt werden soll.

Allgemein kann gesagt werden, dass es sinnvoll ist die Vertriebsaufgabe Projektierung durch Werkzeuge zu unterstützen, da dies das Ergebnis dieses Prozesses und somit in letzter Konsequenz auch das Geschäftsergebnis verbessert (FÖRSTER 2005, S. 19).

Eine noch nicht diskutierte Frage ist, ob sich Projektierungswerkzeuge automatisieren lassen. Das bedeutet, dass das Werkzeug die Projektierungsaufgabe selbstständig ohne die Unterstützung eines Projektierers oder einer anderen Person durchführt. Vor dem Hintergrund der hohen Komplexität durch Dynamik und Varianz in der Ausgestaltung der Systeme ist dies nur bedingt möglich. Bei der Beurteilung dieser Frage liefert AMFT eine gute Hilfestellung. Er hat im Zuge seiner Untersuchung zur Integration von Gestalt und Berechnung Folgendes festgestellt: „In Ermangelung der realen Existenz und Realisierbarkeit von künstlicher Intelligenz im Sinne der primären Intelligenz²¹, der der Konstrukteur bzw. Entwickler in ähnlicher Weise blind vertrauen könnte wie einem menschlichen Mitarbeiter, muss sich ein System zur Integration von Gestalt und Berechnung auf die Übernahme von Wiederhol- und Fleißarbeit beschränken und eine vollständige Prozesstransparenz sicherstellen.“ (AMFT 2002, S. 30f)

2.2.3 Projektierung im Maschinen- und Anlagenbau

Der Begriff „Anlage“ weckt unterschiedlichste Assoziationen. So nennen z.B. BURKHARDT & KRAUS (2006) als ein typisches Beispiel Heizanlagen. Sie beschreiben dabei eine Anlage als eine Kombination von handelsüblichen Bauelementen wie Wärmeerzeugern, Regelung, Rohrleitungen und Heizkörpern. Ähnliche Beispiele finden sich zahlreich in der Literatur. Für den

²¹ Primäre Intelligenz ist allein dem Menschen mit seinen interpretativen Fähigkeiten vorbehalten. Oft lassen sich Handlungen primärer Intelligenz in spezifischem Kontext nachbilden, sie sind also automatisierbar und damit in sekundäre Prozesse auf Basis sekundärer Intelligenz überführbar. (KOLLER 1991)

Kontext dieser Arbeit ist eine allgemeinere Definition erforderlich, welche der VDMA²² liefern kann. Anlage ist danach „eine Kombination von einzelnen, in ihrer Funktion nicht selbstständigen Bauelementen wie Maschinen, Apparaten, elektrischen Antrieben, Steuerungen und den verbindenden Elementen wie elektrische Verbindungsleitungen, die zusammen einen bestimmten Produktions- oder Arbeitsprozess bewirken.“ (VDMA 1976)

Einteilung von Unternehmen

Eine Möglichkeit zur Definition des Begriffes „Maschinen- und Anlagenbau“ ist die Verwendung einer Klassifizierung von Produktionsunternehmen. Aus verschiedenen Ansätzen in der Literatur lässt sich z.B. die grundsätzliche Einteilung nach EHRENSPIEL ET AL. (1998) hinsichtlich der Produktart, des Produktprogramms und folglich der Produktionsart vornehmen. Dies ergibt eine Einteilung in einfache und komplexe Erzeugnisse, Konsumgüter oder Investitionsgüter sowie Einzelkunden oder anonyme Abnehmer.

GAUSEMEIER ET AL. (2000) verwenden eine für diese Arbeit besser geeignete Klassifikation von Produktionsunternehmen in 6 Unternehmensgruppen:

- Hersteller von Aggregaten
- Hersteller von Elektrogeräten
- Hersteller von Maschinen und Anlagen
- Hersteller von Produktionsmaschinen
- Hersteller von Kraftfahrzeugen
- Zulieferer von Komponenten und Einzelteilen

Bei den in dieser Arbeit fokussierten Unternehmen handelt es sich um Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle noch eine allgemein kurze Beschreibung zu dieser Unternehmensgruppe bzw. dieser Branche geliefert werden:

Das BROCKHAUS LEXIKON (2000) führt unter den Begriffen „Maschinenbau, Maschinenbauindustrie, Maschinen- und Anlagenbau“ folgende Erläuterung: „[...] innerhalb des verarbeitenden Gewerbes zum Investitionsgüter produzierenden Gewerbe zählender Wirtschaftszweig“. Diese Arbeit bezieht sich vor allem auf Unternehmen, die im VDMA zusammengeschlossen werden.

Eigenschaften, Besonderheiten und Herausforderungen

Nach PAHL ET AL. (2007) gilt: „Technische Gebilde, also auch Erzeugnisse des Maschinen-, Geräte- und Apparatebaus, sind künstliche, konkrete und meistens dynamische Systeme, die aus einer Gesamtheit geordneter Elemente bestehen und aufgrund ihrer Eigenschaften miteinander durch Relationen verknüpft sind.“ Auf dieser Basis kann hergeleitet werden, dass es sich bei den Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus um Systeme im oben definierten Sinne handelt.

²² VDMA = Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer.

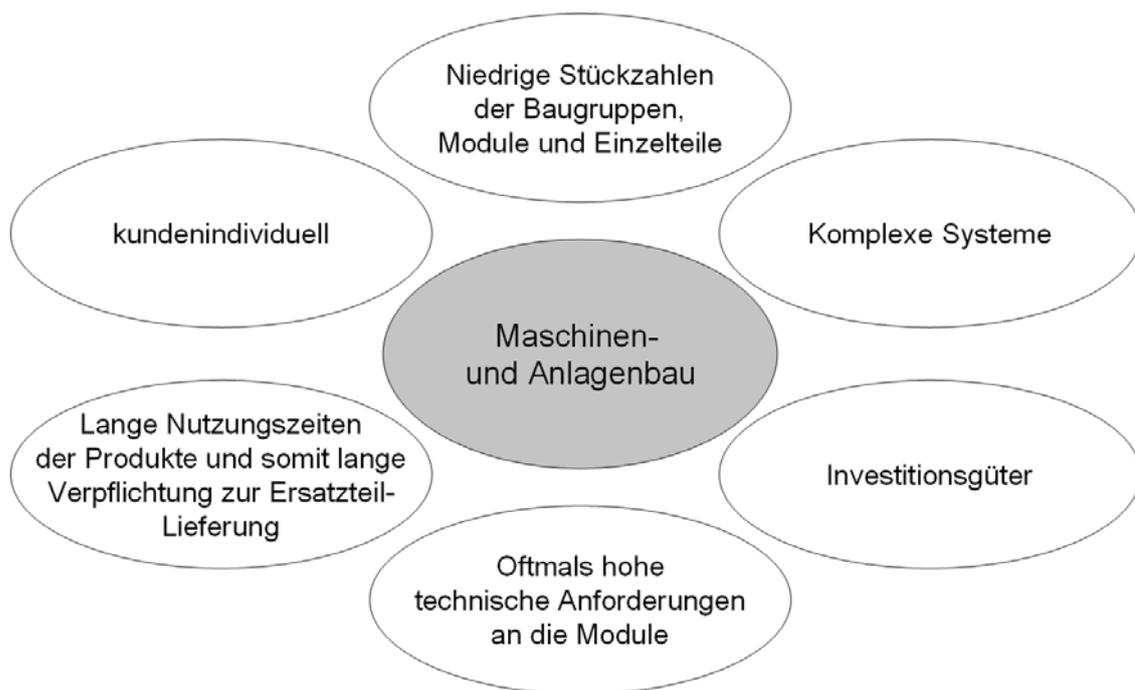


Abbildung 2-25: Eigenschaften und Besonderheiten der Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus nach FÖRSTER (2003)

FÖRSTER (2003) nennt sechs Eigenschaften und Besonderheiten, mit denen er die Produkte im Maschinen- und Anlagenbau beschreibt. Diese sind in Abbildung 2-25 dargestellt. Demnach sind die Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus auf Grund ihrer hohen Anzahl an Einzelteilen und Relationen, im Vergleich zu anderen Produkten, als komplexe Systeme zu bezeichnen. Es werden Kundenwünsche in erhöhtem Maße berücksichtigt, wodurch es häufig zu einer hohen Variantenvielfalt kommt. Im Maschinen und Anlagenbau werden meist nur niedrige Stückzahlen produziert. Dies gilt sowohl für die Maschinen- und Anlagen als auch für Ihre Module, Baugruppen und Einzelteile. In der Regel handelt es sich dabei jedoch um Aufträge mit einem großen Wert, weshalb jeder Kundenauftrag neben den technischen auch mit wirtschaftlichen Risiken verbunden ist. Die Entwicklungskapazität für eine Anlage ist auf Grund der niedrigen Stückzahl wesentlich geringer als bei einem Serienprodukt. Ferner möchte der Kunde ein System, das eine definierte Funktion nach seinen Wünschen ausführt. Diese Funktion muss unter den gegebenen Randbedingungen gewährleistet sein, wobei oftmals sehr hohe Anforderungen an die Module des Systems gestellt werden. Die Notwendigkeit, neue Varianten zu generieren, wird deshalb, im Gegensatz zu anderen Branchen, durch die zu realisierenden Funktionen und Anforderungen aus den Kundenprojekten bestimmt.

Ein weiteres Merkmal des Maschinen- und Anlagenbaus ist die lange Nutzungszeit der Produkte. Da es sich bei den Systemen meist um Investitionsgüter handelt, werden diese so lange wie möglich genutzt, um damit möglichst viel Gewinn zu erwirtschaften. Verkehrsunternehmen beispielsweise erwarten, dass sie ihre Züge 30 bis 40 Jahre wirtschaftlich betreiben können (STEIMEL 2005). Für die Hersteller bedeutet dies, dass sie für die Zeit der Nutzung der Maschine meist die Lieferung von Ersatzteilen garantieren müssen.

Letztlich ergeben sich aus diesen Brancheneigenschaften auch deutliche Auswirkungen auf den Prozess der Maschinen- und Anlagenprojektierung. Nach LINNHOFF (1993) resultieren daraus 6 entscheidende Merkmale, die in Abbildung 2-26 zusammengefasst sind.



Abbildung 2-26: Merkmale der kundenspezifischen Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen nach LINNHOFF (1993)

Die komplexe Produktstruktur bestätigt dabei die Ausführungen von FÖRSTER (2003). Daraus abgeleitet ergeben sich hohe technische Risiken bei der Auswahl der technischen Lösung, welche Grundlage des Angebotes ist.

Dies wird dadurch erschwert, dass darüber hinaus oft Änderungen nach Auftragseingang gewünscht werden. Es betrifft zwar nicht direkt die Projektierung, wie sie zuvor definiert wurde, gibt aber einen Hinweis darauf, dass auch während dieser Phase vermutlich Änderungswünsche keine Seltenheit darstellen. Die organisatorische und technische Beherrschung von Produktänderungen ist deshalb für den Maschinen- und Anlagenhersteller eine unbedingte Notwendigkeit. Die Fähigkeit zur schnellen Beurteilung der Auswirkungen dieser Kundenwünsche ist daher Grundlage für den wirtschaftlichen Erfolg.

Die Komplexität der Produkte, die gegebenenfalls vorhandene Variantenvielfalt und der möglichen bedeutenden Anteil an Neukonstruktionen führen zu einem hohen Aufwand für die Erstellung von Angeboten. Dies ist wirtschaftlich betrachtet kritisch, da die Umwandlungsraten von Angeboten im Maschinen- und Anlagenbau sehr unterschiedlich sind. Als sogenannte Trefferquote definiert der VDMA das Verhältnis zwischen errungenen Aufträgen und abgegebenen Angeboten. Dies erfolgt volumen- bzw. mengenbezogen.

$$\text{Trefferquote, volumenbez.} = \frac{\text{Auftragseingangsvolumen}}{\text{Angebotsvolumen}} * 100$$

Formel 2-2: Trefferquote, volumenbezogen nach VDMA (2007)

$$\text{Trefferquote, mengenbez.} = \frac{\text{Anzahl_Aufträge_ (angebotsbezogen)}}{\text{Anzahl_Angebote}} * 100$$

Formel 2-3: Trefferquote, mengenbezogen nach VDMA (2007)

Der VDMA ermittelt diese Trefferquoten seit einigen Jahren im Rahmen regelmäßiger Mitgliederbefragungen. Abbildung 2-27 zeigt das Ergebnis für die Jahre 1999-2006:

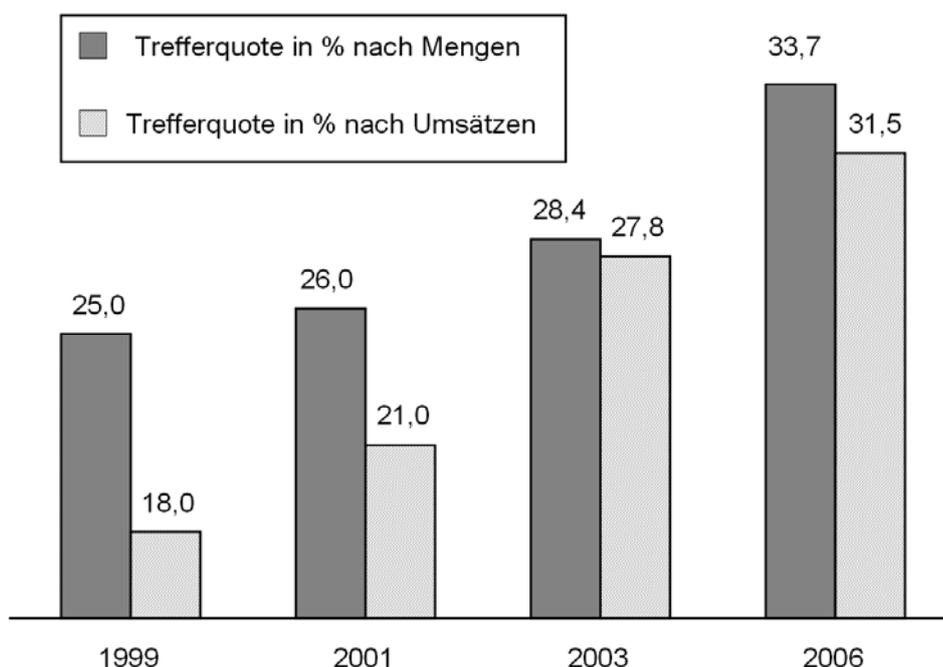


Abbildung 2-27: Trefferquote im Maschinen- und Anlagenbau 1999-2006 nach VDMA (2007)

Zwar zeigt der Trend eindeutig in Richtung sich verbessernder Angebotsbemühungen in dieser wichtigen Exportbranche, doch bei genauer Betrachtung der Zahlen zeigt sich, dass dies nicht durchgängig gilt. So wurde vom VDMA 2007 weiter ermittelt, dass vor allem im klassischen Anlagenbau die Trefferquote teilweise unter 15% auf sehr niedrigem Niveau liegt. Hohe Werte erzielen vor allem die Spezialanbieter unter den VDMA-Mitgliedern. Außerdem ist unbedingt zu berücksichtigen, dass die letzten Jahre im Maschinen- und Anlagenbau als sogenannte Boomjahre in die Geschichte eingehen werden. Auf Grund der sehr guten Auslastung der Betriebe ist davon auszugehen, dass diese sich auf die erfolversprechenderen Ausschreibungen ausgerichtet haben. Die Zahlen der nächsten Jahre werden zeigen, dass die Trefferquote sich deutlich nach unten bewegen wird, wenn sich wieder deutlich mehr Unterneh-

men pro Ausschreibung beteiligen, da durchweg auf Grund der Wirtschaftskrise Überkapazitäten vorhanden sind.

Ein detailliertes Angebot kann daher aus Kostengründen nicht in jedem Fall erstellt werden. Zusätzlich kommt eine umfassende Beschreibung und Ausarbeitung von Details der Lösungen einer Offenlegung des unternehmensspezifischen Know-hows gleich und führt daher ebenso dazu, dass Angebote nicht allzu detailliert ausgeführt werden. (ABMANN 1996, S. 6)

Dies widerspricht allerdings den Ausführungen zum Angebot als Ergebnis des Projektierungsprozesses und den dort ausgeführten Eigenschaften eines solchen. Auf der einen Seite steht der dringende Bedarf einer genauen und absichernden Leistungsbeschreibung. Auf der anderen Seite ergibt sich aus wirtschaftlichen Erwägungen die Forderung, möglichst geringen Aufwand einzubringen. Dies zeigt einmal mehr den Hauptkonflikt im Rahmen der Projektierung.

2.2.4 Zusammenfassung zur Projektierung komplexer Systeme

Als Fazit des Kapitels zur Projektierung komplexer Systeme lassen sich folgende Kernaussagen zusammenfassen:

- Projektierung beschreibt allgemein die Tätigkeiten zwischen Kundenanfrage und Übergabe des Angebotes. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der technischen Lösungssuche, -auswahl, -bewertung und Dokumentation zur Erfüllung der Kundenanforderungen.
- Die Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus sind in der Regel komplexe Systeme und haben häufig einen hohen Auftragswert. Sie werden kundenindividuell in zeitlicher Überlappung zu anderen Projekten entwickelt und in kleinen Stückzahlen geliefert. Die Anforderungen sind hoch und es werden Ersatzteillieferungen lange vorausgesetzt.
- Das Angebot als Ergebnis der Projektierung beinhaltet neben der technischen Lösung auch Preis, mögliche Liefertermine und diverse Lieferbedingungen. Der Aufwand zur Erstellung ist auf Grund der Komplexität der Systeme und des starken Einflusses des Kunden (dynamische Änderungen der Anforderungen) hoch.
- Die Ausarbeitung der technischen Lösung für das Angebot muss zum einen so detailliert sein, dass die wirtschaftlichen und technischen Risiken beherrschbar sind, und zum anderen der Trefferquote in der jeweiligen Branche gerecht werden. Dies stellt häufig einen Widerspruch dar und ist ein drängendes Problem im Maschinen- und Anlagenbau.
- Projektierungswerkzeuge sind erforderlich um die Qualität der Ergebnisse des Projektierungsprozesses zu verbessern.

2.3 Simulation in der Pneumatik

Die Grundlagen dieser Arbeit werden mit diesem Kapitel zur Simulation in der Pneumatik abgeschlossen. Ein Anliegen des Autors ist es, neben einer allgemeinen Vorstellung des Themas Modellbildung und Simulation, auch deren vielfältige Einsatzmöglichkeiten aufzuzeigen, bevor im Besonderen auf die Pneumatiksimulation eingegangen wird.

2.3.1 Grundlagen der Simulation

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik zur Einführung von Pneumatiksimulation als Werkzeug der Eigenschaftsfrüherkennung für die Projektierung in Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus vorgestellt. Vorweg ist es erforderlich, dass die Begriffe Modellbildung und Simulation im Allgemeinen und im Kontext der Betrachtung komplexer Systeme definiert werden.

Modellbildung und Simulation

Die VDI-NORM 3633 definiert den Begriff Modell wie folgt: „Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“

Für das Wort „Simulation“ liefert das DUDEN FREMDWÖRTERBUCH (1974) unter anderem die Bedeutung „Nachahmung (in Bezug auf technische Vorgänge).“ Diese Deutung allein reicht noch nicht aus, um die Verwendung des Begriffes in Forschung und Technik ausreichend zu beschreiben. Aus diesem Grund ist es wichtig, Simulation, aber auch die dazu erforderliche Modellbildung, ausführlicher zu beschreiben.

Nach MÖLLER (1992) gilt bezogen auf eine wissenschaftliche Verwendung folgendes: „Als Simulation (Verähnlichung) bezeichnet man eine Nachbildung, bei der nicht das reale System selbst, sondern Ersatzweise das Modell des Systems untersucht wird“. Er definiert die Simulation weiter als eine Reproduktion des statischen und/oder dynamischen Verhaltens eines realen Systems. Dieses basiert auf einem materiellen oder immateriellen Abbild der Realität, dem Modell (siehe oben), welches diejenigen Aspekte des realen Systems beschreibt, die für den angestrebten Erkenntnisgewinn von Bedeutung sind. Dieser Erkenntnisgewinn bezieht sich auf die Eigenschaften des realen Systems und soll durch Rückschluss aus den Simulationsergebnissen erfolgen.

Dies korrespondiert mit der Beschreibung, die BOSSEL (1994) für die Modellbildung liefert. Er fokussiert dabei im Speziellen den Aspekt der Vereinfachung und deren Konsequenzen, wenn es heißt: „Modellbildung bedeutet immer Vereinfachung, Zusammenfassung, Weglassen, Abstraktion. Modellbildung ist daher prinzipiell nicht möglich ohne Auswahl und Entscheidungsvorgänge. [...] Subjektivität ist also in der Modellbildung unvermeidbar, auch wenn sie sich, wie etwa in der kollektiven Erfahrung eines ganzen Fachgebietes als relativ objektiv gestalten.“ (BOSSEL 1994, S. 36).

Eine weitere interessante Beschreibung mit Blick auf die rechnergestützte numerische Simulation, findet sich bei MURRENHOF: „Unter Simulation wird die Nachahmung von Prozessen mit Hilfe von Modellen verstanden, die sich mathematisch beschreiben lassen und damit einer Verarbeitung durch einen Computer zugänglich gemacht werden können“ (2006, S. 281). Weiter wird dort die Motivation zur Nutzung der Simulation angesprochen. So ist es das Ziel jeder Simulation, das System- bzw. Bauteilverhalten unter bestimmten Randbedingungen zu erkunden. Daraus ergibt sich, dass das Simulationsmodell alle funktionalen Zusammenhänge und Größen umfasst, die den gewählten Teilaspekt beeinflussen.

Die hier vorgestellten Beschreibungen und Hinweise ergeben einen guten Überblick über die Verwendung der beiden Begriffe Modellbildung und Simulation im Sinne dieser Arbeit und lassen sich unterstützend wie folgt zusammenfassen: „Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“ (VDI 3633 2000)

Als Randbemerkung sei erwähnt, dass auch der Begriff Komplexität häufig verwendet wird, wenn Modelle zur rechnergestützten Simulation diskutiert werden. Nach LIENEMANN (2006) steigt die Komplexität eines Modells durch drei wesentliche Einflüsse. So ist zunächst die Größe des mathematischen Modells entscheidend. Unter Größe ist dabei die Anzahl der beschreibenden Gleichungen zu sehen. Als zweiten Einfluss nennt er die Anzahl der Systemparameter und der Dritte ist die Nichtlinearität im Modell. (LIENEMANN 2006, S. 34f)

Verifikation, Validation und Beurteilung der Ergebnisse

Entscheidend für jeden Einsatz von Modellbildung und Simulation ist die Absicherung des verwendeten Modells und der damit durch Experimente erzielten Ergebnisse. BOSSEL (1994) hat hierzu für die Beurteilung der Modellqualität die Frage der Modellgültigkeit gestellt und dazu vier Aspekte herausgearbeitet, die äußerst hilfreich sind:

„Verhaltensgültigkeit: Hier muss gezeigt werden, dass für die im Rahmen des Modellzwecks liegenden Anfangsbedingungen und Umwelteinwirkungen des Originalsystems das Modellsystem das (qualitativ) gleiche dynamische Verhalten erzeugt.

Strukturgültigkeit: Hier muss gezeigt werden, dass die Wirkungsstruktur des Modells der (für den Modellzweck) essentiellen Wirkungsstruktur des Originals entspricht.

Empirische Gültigkeit: Hier muss gezeigt werden, dass im Bereich des Modellzwecks die numerischen oder logischen Ergebnisse des Modellsystems den empirischen Ergebnissen des Originals, bei gleichen Bedingungen, entsprechen, bzw. dass sie (bei fehlenden Beobachtungen) konsistent und plausibel sind.

Anwendungsgültigkeit: Hier muss gezeigt werden, dass Modell und Simulationsmöglichkeiten dem Modellzweck und den Anforderungen des Anwenders entsprechen.“ (BOSSEL 1994, S. 36)

Die von BOSSEL nicht verwendeten aber in diesem Kontext absolut gebräuchlichen Begriffe Verifikation und Validierung werden nicht durchgängig einheitlich verwendet.

In VDI 3633 wird Validierung²³ als „die Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Original“ (2000, S. 19) bezeichnet. Dort heißt es weiter: „Es ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des realen Systems genug und fehlerfrei widerspiegelt. [...] Eine vollständige Übereinstimmung zwischen Original und Modell ist grundsätzlich nur bedingt möglich, da das abstrahierte und idealisierte Modell nicht alle Aspekte und Einflussgrößen berücksichtigen kann.“ (VDI 3633 2000, S. 19)

Den hier erwähnten grundsätzlichen Zusammenhang berücksichtigt auch MURRENHOF, wenn er auf die Folgen maximaler Übereinstimmung von Modell und Realität eingeht: „Je genauer das System [...] modelliert ist, desto genauer können die Simulationsergebnisse an das reale Verhalten heranreichen. Allerdings steigt auch die Anzahl der zur Simulation benötigten Beschreibungparameter.“ (MURRENHOF 2006, S. 281)

MÖLLER erklärt diese Begriffe wie folgt: „Bei der Verwendung der durch Simulation gewonnenen Ergebnisse ist [...] die Gültigkeit des Modells im eingesetzten Zustandsbereich sicherzustellen; man spricht in diesem Zusammenhang von der Verifikation. Die Verifikation wird unterteilt unter dem Gesichtspunkt der Übereinstimmung bzw. der Nichtübereinstimmung. Im Falle der Übereinstimmung spricht man von Validation, im Falle des Verwerfens von Falsifikation.“ (MÖLLER 1992, S. 2). In gleichem Sinne definiert er die Begriffe Modellverifikation und Modellvalidation. (MÖLLER 1992, S. 114) In der Literatur finden sich auch Beispiele in denen die Begriffe Validierung und Verifikation mit exakt getauschter Bedeutung verwendet werden.

BENDER & SCHILLER (2009) lösen diesen Konflikt indem sie die beiden Begriffe voneinander trennen und Verifikation folgendermaßen definieren:

„Verifikation: Durch den Prozess der Verifikation wird überprüft, ob ein Modell die zugrundeliegenden Anforderungen der Realität widerspiegelt, bzw. ob das Simulationsmodell das konzeptionelle Modell korrekt beschreibt.“ (BENDER & SCHILLER 2009, S. 25)

Für Validierung orientieren sie sich an der Definition nach VDI 3633: Validierung ist die Überprüfung der Übereinstimmung zwischen Modell und System (Realität). (BENDER & SCHILLER 2009)

Da diese Definitionsfragestellung für den Hauptteil hohe Relevanz hat, wird sie im Zusammenhang zwischen Realität, Modell und Simulation noch weiter vertieft.

Von der Modellbildung zur Simulation

Der Vorgang zur Durchführung einer Simulation wurde von BENDER & SCHILLER (2009, S. 1-26) schematisch dargestellt (Abbildung 2-28). Die Simulation besteht dort im Wesentlichen aus den drei Schritten Modellierung, Implementierung²⁴ und Experiment²⁵. Sie

²³ Validierung und Validation werden in dieser Arbeit gleichbedeutend verwendet. Lateinischer Ursprung ist „validus“ – u.a. stark, wirksam, gesund (LANGENSCHIEDT 1983).

²⁴ „Unter Implementierung in der Simulationsstudie versteht man die Umsetzung eines abstrakten bzw. gedanklichen Modells in ein auf einem Rechner ablauffähiges Simulationsmodell“ (VDI 3633 2000).

bilden die Kanten eines Dreieckes, dessen Eckpunkte die Realität, das Modell und das Simulationsmodell sind. Die Verwendung der Begriffe Verifikation und Validierung im oben genannten Sinne lässt sich an dieser Darstellung ebenfalls gut nachvollziehen.

Für die Naturwissenschaften ist alles das, was der wissenschaftlichen Betrachtung und Erforschung zugänglich ist, Realität. Dinge, die nicht messbar sind, können keine Basis für wissenschaftliche Theorienbildung sein. Realität im Umfeld der Simulation ist eine existierende, bzw. noch nicht existierende Wirklichkeit eingebettet in seine System-Umwelt (BENDER & SCHILLER 2009, S. 1-18).

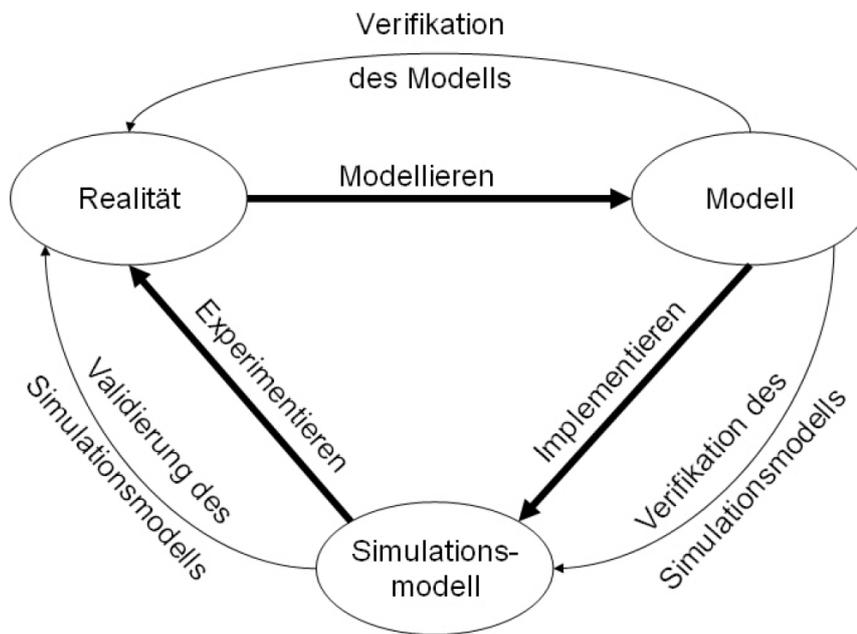


Abbildung 2-28: Modellbildung und Simulation nach BENDER & SCHILLER (2009, S. 1-26)

Das Modell ist, wie oben erwähnt, eine vereinfachte Nachbildung der Realität. Ziel eines Modells ist es alle Wirkzusammenhänge zu beschreiben, welche zur Erfüllung einer definierten Aufgabenstellung notwendig sind.

Zur Vorbereitung einer Simulation wird nun dieses abstrakte Modell durch den Vorgang der Implementierung in ein ablauffähiges Simulationsmodell umgewandelt. Mit diesem kann der eigentliche Vorgang der Simulation ausgeführt werden. Die Verifizierung beider Modelle auf ihre Plausibilität ist vorab zwingend erforderlich.

Nach dem Experiment in Form der Simulation werden deren Ergebnisse mit gemessenen Werten der Realität validiert. Dies ist allerdings nicht immer möglich, da die Simulation häufig Eigenschaften von gänzlich neuen und somit völlig unbekannt Systemen voraussagen - sozusagen extrapolieren - soll. Die Validierung wird daher mit bestehenden Daten soweit wie

²⁵ „In der Simulationstechnik versteht man unter Experimentieren die gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischen Parametervariationen“ (VDI 3633 2000).

möglich durchgeführt. Beispiel hierfür ist die Simulation des Weltklimas. Modelle, die dessen zukünftige Entwicklung voraussagen sollen, werden anhand bestehender Daten aus der Vergangenheit abgesichert.

2.3.2 Vielseitigkeit von Modellbildung und numerischer Simulation

Modellbildung und Simulation sind Methoden, welche in der heutigen Zeit in vielen Bereichen und in sehr unterschiedlicher Form als Werkzeug Anwendung finden. Meist ist das Ziel der Simulation unter folgenden Oberbegriffen zu finden:

- Prognose und Entscheidungshilfe
- Verständnis
- Optimierung
- Ressourceneinsparung
- Qualitätssicherung (BENDER & SCHILLER 2009)

Auf Basis einer Recherche zur allgemeinen Verbreitung von Modellbildung und Simulation zeigen die folgenden ausgewählten Beispiele, wie vielfältig diese Methoden einsetzbar sind. Dabei wird mit diesem Überblick kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

In den Ingenieurwissenschaften ist die numerische Simulation seit vielen Jahren Stand der Technik. Die Berechnungen basieren meist auf FEM, FVM²⁶. In der Regel handelt es sich dabei um strukturmechanische Betrachtungen. Aber auch andere Themen wie z.B. Schock-, Vibrations-, oder Schwingungsverhalten, sowie das ganze Thema Fahrzeugakustik werden mit Simulationswerkzeugen untersucht. (HERFELD 2007; DEMMERER 2002). Der Einsatz von Modellbildung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung ist soweit selbstverständlich, dass man sich auch mit den zugehörigen Prozessen auseinandersetzt und diese optimiert. Dies ist auf Grund der stetig kürzeren Produktentwicklungszyklen bei gleichzeitig steigender Variantenvielfalt in den Fahrzeugen erforderlich. Hierbei gibt es vielfältige Ansätze. So hat, um nur ein Beispiel zu nennen, SOMMER (2003) gezeigt, dass man die Ergebnisbeurteilung vereinfachen und damit beschleunigen kann, wenn man neuartige Visualisierungsmöglichkeiten (kombinierte Darstellung unterschiedlicher Simulationsansätze) verwendet.

Im Rahmen der Produktqualifizierung wird mit HiL²⁷ häufig eine weitere Form von Modellbildung und Simulation eingesetzt. Damit wird ein Verfahren bezeichnet, bei dem ein reales Systemelement (z. B. ein elektronisches Steuergerät oder eine reale mechatronische Komponente) über seine Ein- und Ausgänge an ein angepasstes Gegenstück, den sogenannten HiL-Simulator, welcher als Nachbildung der realen Umgebung des Systems dient, angeschlossen wird. (DLR BRAUNSCHWEIG 2009)

Über die Produktentwicklung hinaus gibt es weitere sehr vielfältige Anwendungen. So lassen sich z.B. Fertigungs- und Logistikprozesse zu deren Optimierung simulieren. (SCHULZ 2002)

²⁶ FEM = Finite Elemente Methode; FVM = Finite Volumen Methode

²⁷ HiL = Hardware in the Loop.

In anderen Fällen dienen Modelle und simulierte Vorgänge zu Marketing und Abstimmungszwecken an zukünftig zu errichtenden Anlagen oder allgemein zu Schulungszwecken (KIBNER & STÜRING 2005; SEKAR & CHUNG 2004).

Entfernt man sich von den industriellen Einsatzfeldern gibt es weitere Verwendungsmöglichkeiten: Katastrophen verhindernd verwendet KRAFT (2003) die CFD²⁸-Simulation, um durch Berechnung und Visualisierung von unterschiedlichen Szenarien die besten und kostenoptimalsten Konzepte zur Entrauchung brennender Gebäude zu ermitteln.

Das Verhalten von Personen, die sich in Krisen- und Paniksituationen befinden, wird ebenfalls simuliert. Durch das Einbringen vorab ermittelter, individueller Verhaltensmuster in eine Gruppensimulation ist es das Ziel, eine geeignete Koordination der Betroffenen für einen tatsächlichen Krisenfall herauszuarbeiten. Es liegt auf der Hand, dass derartige Fälle nur schwer real getestet werden können und daher die Simulation eine sinnvolle Alternative darstellt (TROITZSCH ET AL. 1998).

Der Mensch steht auch bei den vielfältigen Verwendungszwecken von Modellbildung und Simulation in der Medizin im Mittelpunkt. So ermöglicht Simulation „die Evaluierung von verschiedenen Behandlungsalternativen an einem Computermodell. Dabei reichen die Anwendungsfelder von der molekularen Ebene (z.B. Biosimulation einer Krebszellreaktion auf Bestrahlung oder Chemotherapie) über die Biomechanik (z.B. die Simulation des Blutflusses in einer Herzklappe mit Hilfe von FEM) bis zur Operationssimulation (z.B. Bewertung der Operationspfade durch Durchführung einer Gewebebiopsie bei Bronchialkrebs am offenen Herzen).“ (SAKAS & BOCKHOLT 2005, S. 385) Der Bogen ließe sich in der medizinischen Forschung beliebig weiterspannen über z.B. präoperative Behandlungsplanung in der plastischen Chirurgie bis hin zur prognostizierenden Untersuchung von Genmutationen (HEINE 2005; KOHLHOFF 2002).

Weitere Einsatzfelder belegen die verbreitete Einschätzung, dass es sich bei Modellbildung und Simulation um omnipräsente Methoden handelt. So werden diese in Form unterschiedlicher Werkzeuge ebenso zur Untersuchung von Gesteinsschichten in der Geologie (FRIEDEL 2004) oder zur Untersuchung der Entstehung des Globus (MIKOLAJEWICZ ET AL. 2004) eingesetzt, wie bei der Analyse von Polymerphysik (MICHEL 2003) oder der Entwicklung verteilter Softwaresysteme (KARATZA 2003). Mit zwei exotischen Beispielen soll der Beleg der Vielseitigkeit dieser Methoden abgeschlossen werden: So wenden auch Sozialwissenschaftler Simulation an, um mit Hilfe von Agentenmodellen²⁹ Gruppenbildungsprozesse zu untersuchen (TROITZSCH 2004). Daneben gibt es Anwendungen wie das Evolutionsprojekt GOLEM, in dessen Kern sich Einfachstroboter über Generationen weiterentwickeln, um bestmöglich vorab gestellte Aufgaben zu erfüllen (LIPSON & POLLACK 2000).

²⁸ CFD = Computational Fluid Dynamics.

²⁹ Agenten sind in der Begriffswelt der Informatik Programme, welche im Auftrag anderer (Mensch oder Programme, dabei möglicherweise wiederum Agenten) selbstständig Aufgaben erfüllen. „...Agenten können [dabei] nicht nur ihre Umgebung wahrnehmen und darauf reagieren, sondern sind in der Lage, ihr Agieren zu planen, zu kommunizieren und aus Erfahrung zu lernen.“ (LÄMMEL UND CLEWE 2008)

Die Beispiele lassen sich beliebig fortsetzen und würden lediglich den bereits erreichten Eindruck bestätigen. Für die spätere Betrachtung der Allgemeingültigkeit des in dieser Arbeit entwickelten Modells sind die Beispiele als Beweise ausreichend, um zu belegen, dass es sich bei Modellbildung und Simulation nicht um eine Methode des hier diskutierten Umfeldes Maschinen- und Anlagenbau handelt, sondern dass diese Methode nahezu unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten hat. Eine weitere Erkenntnis ist es, dass allen Beispielen ein hoher Grad an Komplexität bezüglich der untersuchten Fragestellung gemein ist, der wiederum alternative Methoden zurückdrängt.

Neben der allgemeinen Euphorie über die Möglichkeiten gibt es auch Vorbehalte gegenüber Modellbildung und Simulation. Im Kern wird darin der Verdacht geäußert, dass im Umgang mit diesen Werkzeugen die üblichen Regeln wissenschaftlichen Arbeitens verlassen werden. BOSSEL (1994) entgegnet diesem Vorwurf damit, dass Modellbildung und Simulation den gleichen Anforderungen an die Überprüfbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Annahmen, Hypothesen, Sätze und Ergebnisse gerecht werden müssen, wie dies bei Experimenten der Fall ist. Trifft dies zu, was durchaus möglich ist, hat Modellbildung und Simulation die volle Berechtigung, andere Untersuchungsformen zu ergänzen oder zu ersetzen.

2.3.3 Simulation in der Pneumatik

Das vorangegangene Kapitel gab einen weiten Überblick über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Modellbildung und Simulation. Nun richtet sich der Fokus auf Simulation in der Fluidtechnik und dort im Speziellen auf den Bereich der Pneumatik. Das Gebiet der Fluidtechnik wird entsprechend der eingesetzten Druckmedien (flüssige oder gasförmige Druckübertragungsmedien) in zwei Bereiche eingeteilt. Dabei steht die Hydraulik für die flüssigen, die Pneumatik für die gasförmigen Druckübertragungsmedien. Meist ist in der Pneumatik das Druckmedium Luft.

Wenn von Simulation in der Pneumatik die Rede ist, spricht man in der Regel von den folgenden zwei Ansätzen bzw. Einsatzzwecken und verknüpft damit die jeweiligen Werkzeuge:

- Auslegung pneumatischer Systeme mit Hilfe fluidtechnischer System-Simulationssoftware
- Unterstützung der Konstruktion und Optimierung pneumatischer Bauteile durch den Einsatz von Strömungssimulation (CFD)

Bei der hier diskutierten Entwicklungs- und Einführungsmethodik steht die Auslegung fluidtechnischer Systeme im Mittelpunkt, wohingegen die Strömungssimulation nur der Vollständigkeit halber am Ende des Kapitels kurz vorgestellt wird.

Systemsimulation zur Auslegung pneumatischer Systeme

Durch den Einsatz von Simulation ist eine zuverlässige Vorhersage des statischen und dynamischen Verhaltens pneumatischer Systeme möglich (BAUER 2002). Bereits in den Neunzigern wurde damit begonnen, der Nachfrage nach Simulationssoftware für die Auslegung pneumatischer Systeme zu begegnen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Hydraulik, dort begann der Trend zum Einsatz der Simulation früher, wurden die ersten, heute noch verwend-

baren Berechnungsprogramme, entwickelt. Im hier adressierten Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus sind die am weitesten verbreiteten Programme das ursprünglich am INSA Lyon entwickelte AMESim³⁰, welches heute im Portfolio der Firma LMS zu finden ist, und das Programm DSHplus der Firma Fluidon, welches Mitte der 90er Jahre an der RWTH Aachen entwickelt wurde (MURRENHOF 2006; LMS 2009). Darüber hinaus wird häufig auch Matlab/Simulink von Mathworks eingesetzt, um pneumatische Systeme zu beschreiben. ANGERMANN ET AL. (2005) empfiehlt den Einsatz fachspezifischer Simulationsprogramme (DSHplus, AMESim usw.) gegenüber allgemeinen blockschaltorientierten Programmen, wie beispielsweise Matlab/Simulink. Diese fachspezifischen Programme stellen über ihre Modellbibliotheken Komponenten zur Verfügung, die in Darstellung, relevanten Charakteristika und Parametern dem Nutzer meist vertraut sind. Außerdem sind keine tiefgreifenden Kenntnisse der den Modellen zugrunde liegenden Differentialgleichungen erforderlich, um die Komponenten miteinander zu verknüpfen. Bei allgemeinen Berechnungsprogrammen ist ein deutlich tieferes Detailwissen zur Modellbildung und Simulation und der zugrundeliegenden Berechnung erforderlich.

Grundlagen der pneumatischen Systemsimulation

Die Berechnung des dynamischen Verhaltens pneumatischer Systeme erfolgt durch Aufstellung und Lösung nichtlinearer Differentialgleichungen für die verschiedenen Zustandsgrößen. Die wichtigsten sind hierbei Druck p und Temperatur T . Zusätzlich ergibt die Dichte ρ den Zusammenhang von Massen- und Volumenstrom zwischen den Systemelementen. Die wichtigste Grundlage zur Modellierung derartiger Systeme ist die Berechnung des Massenstroms durch Strömungswiderstände. Hierfür werden vor allem die folgenden Kennwerte zur Beschreibung der Widerstände verwendet:

Bei Durchströmung mit kompressiblen Medien wurde zur Widerstandsklassifikation von Bauteilen (Düsen, Ventilen und Drosseln) die ISO 6358:1989 eingeführt, die nach wie vor als der Stand der Technik gilt. Diese Norm wurde aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik für einen stationären Fließprozess abgeleitet. Sie definiert als Beschreibung von pneumatischen Widerständen das kritische Druckverhältnis b_{krit} ³¹ und den pneumatischen Leitwert C_L ³² sowie das Verfahren zur Ermittlung dieser beiden Kennwerte.

³⁰ AMESim = Advanced Modeling Environment for performing Simulations of engineering systems.

³¹ Im unterkritischen Bereich führt eine Absenkung des Ausgangsdruckes bei konstantem Eingangsdruck an einer pneumatischen Komponente zu einer Erhöhung des Massenstromes durch die Komponente. Ab dem kritischen Druckverhältnis b_{krit} ($p_{\text{aus}}/p_{\text{ein}}$) lässt sich der Massenfluss mittels weiterer Absenkung des Nachdrucks p_{aus} nicht mehr steigern. Im engsten Querschnitt der betroffenen Komponente tritt dann Schallgeschwindigkeit auf (überkritische Durchströmung).

³² Der pneumatische Leitwert C_L ist ein Maß für den auf technischen Normzustand bezogenen überkritischen Durchfluss.

Häufig werden bei Ventilen alternative Kennwerte, wie z.B. der K_v -Wert³³, zur Beschreibung des Durchflussverhaltens von Komponenten in der Fluidtechnik verwendet. Diesen weiteren Kennwerten ist gemein, dass sie durch das Fehlen der Definition des Überganges zwischen unter- und überkritischer Strömung nie so genau sein können, wie es die Beschreibung nach ISO 6358:1989 ist (MURRENHOF 2006, S. 61).

Darüber hinaus stellt der Widerstandsbeiwert ζ ein Maß dar, um die Widerstände durchströmter Komponenten zu quantifizieren und somit vergleichen zu können. Er wird häufig zur Beschreibung von Verrohrungselementen (Krümmer, Rohrein- und Auslässe, Diffusoren, T- und Y-Stücke) verwendet. Dazu wurden für zahlreiche strömungstechnische Bauteile Widerstandsbeiwerte ermittelt und dokumentiert, bzw. in Diagrammen die Abhängigkeit von ihren jeweiligen Parametern dargestellt. Auch zur Beschreibung der Widerstände von Rohrleitungen finden Widerstandsbeiwerte Verwendung. Bei der Berechnung einer Serienschaltung von pneumatischen Widerständen, ausgedrückt durch den Widerstandsbeiwert, werden diese aufaddiert. Auch bei der Beschreibung des pneumatischen Widerstands nach ISO 6358:1989 gibt es verschiedene Ansätze, Serienschaltungen zu berechnen (IDELCHIK 1986; MURRENHOF 2006; SIGLOCH 2005).

Beispiel für die Simulation eines pneumatischen Systems

Mit dem einfachen Beispiel der Simulation einer Be- und Entlüftung eines Behälters lässt sich ein Eindruck vermitteln, wie bei einer Pneumatiksimulation vorgegangen wird und welche Ergebnisse damit erzielbar sind. Dieses Modell besteht im Wesentlichen aus einer Druckquelle (3), einem elektrisch gesteuerten 3-3-Wegeventil (5), einem Behälter (6), einer Entlüftung (4) und einer Signalquelle (2) als Ansteuerung. Diese Systemelemente werden durch eine Signalleitung (s) und pneumatische Leitungen (l – in diesem Beispiel als direkte Verbindung modelliert, ohne z.B. Volumen oder Reibung) miteinander verbunden. Darüber hinaus werden die Gaseigenschaften des Mediums im Element „Gas Data“ (1) zusammengefasst. Abbildung 2-29 zeigt das zugehörige Simulationsmodell.

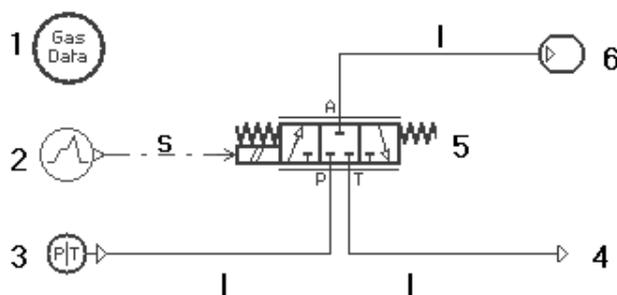


Abbildung 2-29: Beispielsimulation eines pneumatischen Systems mit AMESim

³³ Der k_v -Wert ist in VDI 2173 definiert. Er beschreibt einen Durchfluss durch die zu bestimmende Komponente bei einer bestimmten Druckdifferenz (1 kp/cm^2) und wird überwiegend in der Ventiltechnik genutzt. (MURRENHOF 2006)

Während des Simulationslaufes wird das Ventil 5 zunächst bestromt, damit Behälter und Entlüftung verbunden sind. Nach zwei Sekunden wird umgeschaltet, so dass die Druckquelle mit dem Behälter (Startzustand Atmosphärendruck) verbunden ist und dieser so auf deren Niveau angehoben wird. Nach weiteren zwei Sekunden wird dann wieder umgeschaltet, so dass der Behälter nun über das Schaltventil entlüftet wird. Abbildung 2-30 zeigt den Druckverlauf und den zugehörigen Massenstrom.

Dieses relativ einfache System lässt sich nahezu beliebig erweitern. Es sind komplexere Ventile und Schaltungen ebenso denkbar, wie z.B. das Einbinden von Regelalgorithmen, welche aus zu erfassenden Ist- und vorgegebenen Soll-Werten eine Druck-Regelung ausführen.

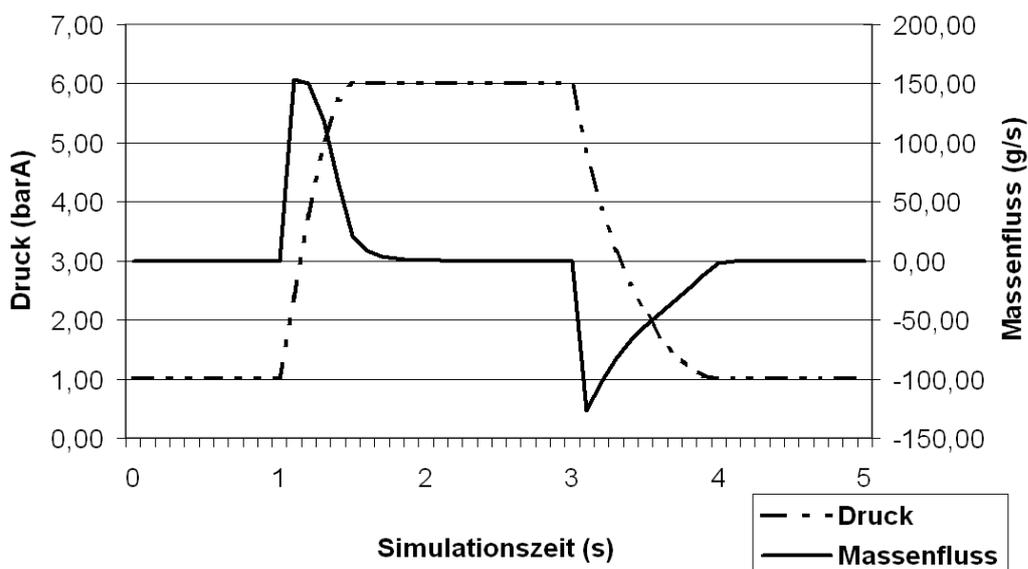


Abbildung 2-30: Ergebnis der Beispielsimulation mit AMESim

Grenzen der aktuellen Pneumatiksimulation

Wenngleich die Weiterentwicklung der Pneumatiksimulation nicht das Thema dieser Arbeit ist, geben gerade die Schwächen der aktuell als Stand der Technik bezeichneten Ansätze und Lösungen einen guten Überblick und zeigen auf zukünftige Verbesserungspotentiale.

Wie oben erwähnt, werden pneumatische Widerstände aktuell mit Hilfe von pneumatischem Leitwert C_L und kritischem Druckverhältnis b_{krit} beschrieben. Dieses Modell hat Einschränkungen, die dazu führen, dass in dynamischen Systemen die Erwartung an die Genauigkeit der Ergebnisse eingeschränkt werden muss. Grund für die Einschränkung dieses Modells sind die Vereinfachungen, die zur Herleitung getroffen werden mussten. So bildet der 1. Hauptsatz der Thermodynamik für stationäre Strömung die Grundlage und berücksichtigt somit keine instationären Prozesse³⁴.

³⁴ Bei der 1D-Pneumatiksimulation wird für die Durchströmung einer Blende angenommen, dass der Durchmesser vor der Blende viel größer ist als der Blendendurchmesser ($A_{Einlass} \gg A_{Blende}$) und damit der statische Druck in

So wird weiter die kinetische Energie vor dem Widerstand im Modell gleich null gesetzt und somit nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass diese vor jedem Widerstand erneut einen Fehler produziert. Auch die Rückwirkung von Widerständen aufeinander, wie z.B. bei Schwingungen der Luftsäule werden nicht ausreichend berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es keinen Wärmeübergang zur Umgebung im Widerstand. Als letzte Einschränkung bei der gewählten Modellierung der pneumatischen Widerstände muss erwähnt werden, dass die instationären Verhältnisse beim Schalten nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Aber auch andere Systemelemente sind nicht optimal abgebildet: Z.B. sind für Schläuche bislang nur rudimentäre Modellierungsansätze geschaffen worden, die empirische Formeln oder Leitwert und kritisches Druckverhältnis verwenden und somit die räumliche Ausdehnung ignorieren (FLUIDON 2008).

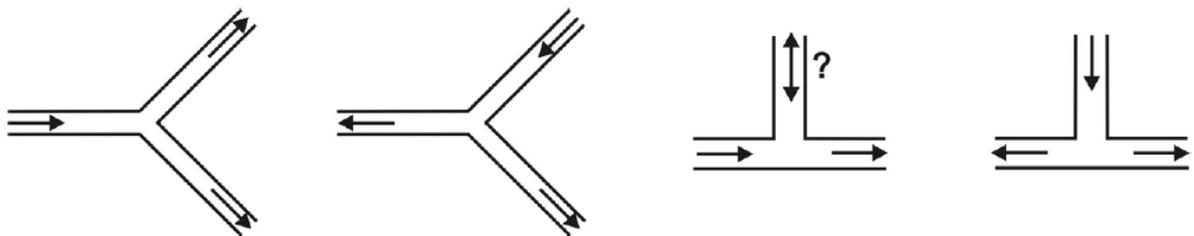


Abbildung 2-31: Y- und T-Stücke als Verteiler der Druckluftströme (ELVERS 2009)

T- und Y-Stücke, welche in Verrohrungsgeometrien zur Verteilung und Zusammenführung der Druckluftströme dienen, werden bislang ebenfalls nicht ausreichend beschrieben. Es ist der Stand der Technik diese Verteiler in der Systemsimulation als Volumenknoten abzubilden. Dabei sind Umlenkeffekte ebenso wenig modelliert wie der Einfluss von Richtungsänderungen. Ziel wären hier daher Modelle, die Umlenkungsrichtung, Saugeffekte (Ejektor-Wirkung) und Druckverluste in Verteilern und Krümmern abbilden können. Da bei diesen Effekten das Geschwindigkeitsprofil über dem Querschnitt wichtig ist, erscheint als Lösung nur eine Kombination aus 1D-Systemsimulation und 3D-Strömungssimulation CFD realistisch zu sein. (ELVERS 2009)

Werden die hier erwähnten Grenzen bzgl. der Aussagekraft der Simulation berücksichtigt, so können die damit erzielten Ergebnisse zur Auslegung von pneumatischen Systemen herangezogen werden. Entscheidend sind hierbei Verifikations- und Validierungsaktivitäten, welche der benötigten Belastbarkeit entsprechen.

2.3.4 Individual- und Standardsoftware

Bei jeder Anwendung der numerischen Simulation pneumatischer Systeme stellt sich die Frage nach der Verwendung von Standardsoftware oder der Entwicklung von Individualsoftware. Als Abgrenzung zwischen diesen beiden Lösungsansätzen kann der Zweck der Entwicklung

etwa dem Totaldruck entspricht ($P_{\text{stat}} \approx P_{\text{total}}$). Ist dies nicht der Fall, so ergeben sich Saugeffekte und Ähnliches, was die Bedeutung des dynamischen Druckes steigen lässt und damit zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofil erfordert. Zu dessen Berechnung wäre die CFD-Simulation heranzuziehen.

herangezogen werden. „Während Individualsoftware entweder durch eigene oder beauftragte Programmierer für einen bestimmten Anwendungsfall entwickelt wurde, ist Standardsoftware nicht für einen bestimmten Anwendungsfall, sondern für das Lösen eines abstrakten Anwendungsfalls konzipiert.“ (NIEDEREICHHOLZ & RESKE 2005) Dadurch sind sehr häufig Anpassungen an die Software erforderlich. Diese werden unter dem Begriff Customizing zusammengefasst und beinhalten nach STAHLKNECHT & HASENKAMP (2002) die Parametrisierung, die Konfigurierung und die Individualprogrammierung. Sind die gewünschten ergänzenden, unternehmensindividuellen Programmfunktionalitäten in der Standardsoftware vorhanden und auswählbar, können diese durch Setzen von Parametern aktiviert werden. Die Konfigurierung aktiviert lediglich die vom Anwender gewünschten und von der Standardsoftware zur Verfügung gestellten Programmbausteine. Als teuerste Form des Customizing besteht weiterhin die Möglichkeit der Individualprogrammierung, welche zu einer Veränderung der Standardsoftware führt und die flexibelste Form des Customizing darstellt. In Extremfällen kommt dies einer Neuprogrammierung gleich (STAHLKNECHT & HASENKAMP 2002, S. 303).

So muss im Einzelfall entschieden werden, ob eine reine Individuallösung oder eine Standardsoftware mit Customizing vorzuziehen ist. In den meisten Fällen wird allerdings die zweite dieser Möglichkeiten besser geeignet sein. Zur Entscheidungsfindung haben NIEDEREICHHOLZ & RESKE (2005) einige Argumente zusammengetragen:

In der Regel kann von Kosteneinsparungen bei der Verwendung einer Standardsoftware im Vergleich zur Eigenentwicklung ausgegangen werden.

Die schnellere Verfügbarkeit der Lösung ist bei Standardlösungen ebenfalls gegeben. Denn selbst beim Customizing wird auf Vorhandenem aufgebaut, was zu kürzeren Entwicklungszeiten führt.

Die Programmierung von Standardsoftware erfolgt durch Experten mit Spezialwissen und größerem Erfahrungsschatz. Wird beim Softwarehersteller allerdings lediglich bereits Bewährtes reproduziert, ist dieser Vorteil für die Standardsoftware zumindest fraglich.

Bei einem erfolgreichen Anbieter kann von Wartung und Weiterentwicklung der Software ausgegangen werden.

Es besteht häufig eine Diskrepanz zwischen Anforderungen der Anwender und den bereits im Basisumfang der Standardsoftware angebotenen Möglichkeiten. Dadurch werden gegebenenfalls große Anpassungen erforderlich.

Möglicherweise notwendige Anpassungen der Ablauforganisation an die Standardsoftware sind nicht zwingend ein Nachteil, da diese auch zur Optimierung verwendet werden können.

Ein Nachteil kann die zum Teil überfordernde Funktionsüberfrachtung von Standardsystemen sein. Diese ergibt sich aus dem wirtschaftlichen Interesse der Anbieter, ein möglichst großes Nutzerfeld anzusprechen. Dadurch entsteht eine Komplexität, die es möglicherweise erschwert, das Customizing optimal auszuführen.

Die schnelle Verfügbarkeit hat den Nachteil, dass eine zu schnelle Einführung möglich wird, bei welcher Analyse und Anforderungsklä rung zu kurz ausfallen. Dies kann zu hohem Nachbesserungsaufwand und hohen Einführungskosten führen. (NIEDEREICHHOLZ & RESKE 2005,

S. 77f). Letztlich muss je nach Anwendungsfall entschieden werden, ob eine Standard- oder eine Individuallösung ausgewählt wird.

2.3.5 Beispiel für eine Software zur Pneumatik-Systemsimulation – AMESim

Da sie im Praxisteil dieser Arbeit Verwendung finden wird, soll die System simulationssoftware AMESim als Beispiel für eine fachspezifische Standard-Lösung vorgestellt werden.

AMESim ist eine komplette Modellier- und Simulationsplattform, die multidisziplinäre Systeme in eine gemeinsame Umgebung integriert. Es ist eine in der Industrie weit verbreitete Lösung, wie die beispielhaften Anwenderfirmen Mercedes, BMW, Renault, Bosch, Siemens, ZF, INA, EADS, SNECMA, Alstom und Hitachi zeigen.

AMESim bietet über 20 Modell-Bibliotheken an, unter anderem in den Bereichen Hydraulik, Mechanik, Pneumatik, Thermik und Elektromagnetik. Die in AMESim erstellten Modelle werden mit entsprechenden Differentialgleichungen beschrieben, welche mit dem gleichen numerischen Solver durch geeignete Lösungsverfahren (z.B. Explicit Runge-Kutta Methods oder Linear Multistep Methods) gelöst werden.

Die AMESim-Plattform besteht aus folgenden vier Anwendungsprogrammen:

AMESim ist die Hauptanwendung der Plattform. Es ermöglicht die Modellierung und Parametrisierung ablauffähiger Systemmodelle und Programmmodule. Damit können die eigentliche Simulation durchgeführt, sowie die Simulationsergebnisse visualisiert und ausgewertet werden.

AMERun ist eine „Run-only“ Version von AMESim, das heißt, dass in AMESim modellierte Systeme in AMERun parametrisiert, simuliert und ausgewertet werden können.

AMECustom ist ein Werkzeug, das es erlaubt, die Anwendung speziell an die Bedürfnisse des Nutzers anzupassen. Mit diesem Programm ist es beispielsweise möglich, firmenspezifische Komponentensymbole für die bestehenden Bibliotheken oder auch eigene Modelldatenbanken zu erstellen. Darüber hinaus können mit AMECustom, falls erforderlich, vertrauliche Informationen verschlüsselt werden.

AMESet erfordert die meisten Kenntnisse, sowohl im Bereich der Simulation, als auch bei der Programmierung. Dieses Programm bietet die Möglichkeit, die AMESim-Bibliothek durch das Programmieren neuer Modelle zu erweitern. (LMS 2009)

Grundlegender Modellierungsansatz

Die Berechnungsprogramme dieser Art stellen in der Regel eine Netzwerkebene als Modellierungsoberfläche zur Verfügung. Netzwerkebene steht dabei für einen Abstraktionsgrad, der zwischen der Systemebene (üblich für Systemdarstellungen in Regelungs- und Leittechnik) und der Ebene der Geometrien von Geräten und anderen Systemkomponenten liegt. Bei der Modellierung bilden die physikalischen Eigenschaften der Komponenten die Vorlage, womit es möglich wird, sie mit den häufig vorhandenen detaillierten technischen Beschreibungen der

Komponenten abzugleichen. Der Detaillierungsgrad richtet sich dabei nach der Entwicklungs- bzw. Untersuchungsaufgabe.

In AMESim werden diese Systemnetzwerke im *Multiport*-Ansatz aufgebaut. Dabei entsteht ein Systemaufbau aus Blöcken, die an definierten Schnittstellen (*Ports*), welche Energie erhaltender Art sind, miteinander verbunden sind. Im Gegensatz zu Modellierungen mit dem sogenannten *Singleport*-Ansatz fließen hier zwischen den Blöcken in der Regel Informationen in zwei Bahnen.

Im *Multiport*-Ansatz werden die Elemente mit jeweils einem Symbol repräsentiert. Die folgende Darstellung zeigt den Unterschied zwischen einer *Multiport*- und einer *Singleport*-Modellierung bei gleichem Informationsgehalt. Es handelt sich jeweils um ein und dasselbe Hydrauliksystem bestehend aus Motor, Pumpe, Servoventil und Zylinder.

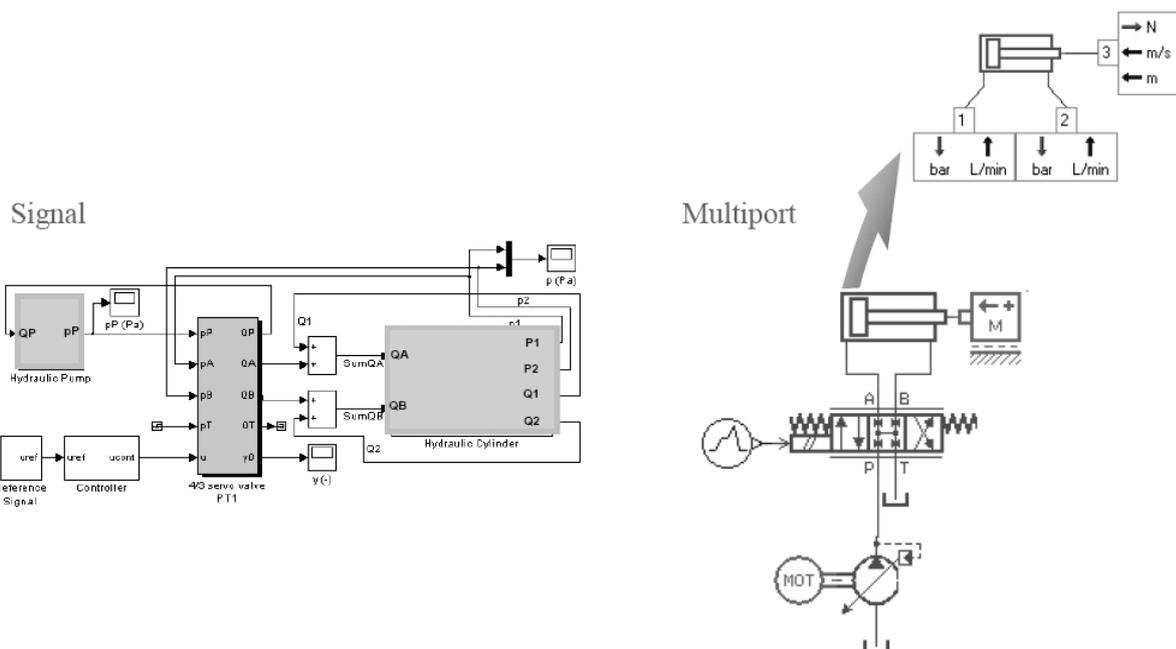


Abbildung 2-32: Singleport- und Multiport-Modellierung (RHOTE-VANEY ET AL. 2002)

Bei der Modellierung auf Netzwerkebene mit Multiport-Elementen ist im Idealfall während der Modellierung keine zusätzliche Programmcodeerstellung oder weitere mathematische Manipulation erforderlich und somit auch keine Kenntnisse hierzu. Es sind lediglich die in den Modellen getroffenen Annahmen zu berücksichtigen.

Der in AMESim angewandete Multiport-Ansatz basiert auf der Bond-Graphen-Theorie zur Beschreibung technischer Systeme. Im Kern dieses Ansatzes heißt es, dass durch die Extraktion der essentiellen Eigenschaften und Charakteristika von Systemen und deren Elementen sich Systeme unabhängig der zum Einsatz kommenden Disziplinen (wie Mechanik, Pneumatik, Regelungstechnik, Thermodynamik, Elektrizität etc.) modellieren lassen. (KARNOPP ET AL. 2000)

Da die Beherrschung einer derartigen Darstellungsmethode weitreichende physikalische Kompetenz voraussetzt, wurde eine Kombination aus dem Modellierungsansatz der Bond-Graphen-Theorie und einer mehr praxisorientierten technologischen Systembetrachtung ent-

wickelt. Diese Kombination führt zum Basiselementansatz von AMESim. Wenn man ein technisches System in seine natürlichen Bestandteile zerlegt, erreicht man in der kleinsten Teilung Elemente wie Massen, Federn oder hydraulische Düsen. In AMESim werden diese Elemente Basiselemente genannt, erhalten entsprechende Symbole und werden durch ein oder mehrere Modelle zur Beschreibung ihrer physikalischen Eigenschaften abgebildet.

Die Idee in AMESim ist es, diese Basiselemente in disziplinspezifischen Bibliotheken für die Systemmodellierung und Simulation zur Verfügung zu stellen. Dem Nutzer können so vollständig getestete, verlässliche und wieder verwendbare Modelle zur Verfügung gestellt werden. Er muss somit nicht in der Lage sein, Systemelemente selbst zu programmieren, sondern benötigt lediglich gutes Systemverständnis und die Fähigkeit, Ergebnisse beurteilen zu können. (RHOTE-VANEY ET AL. 2002)

Modellierungs- und Simulationsprozess

Dieser Modellierungsansatz bildet die Grundlage für ein benutzerfreundliches, modernes Simulationswerkzeug. Wie die folgende Abbildung zeigt, ist der Modellierungs- und Simulationsprozess in AMESim in vier Teilschritte (Simulationsmodi) unterteilt:

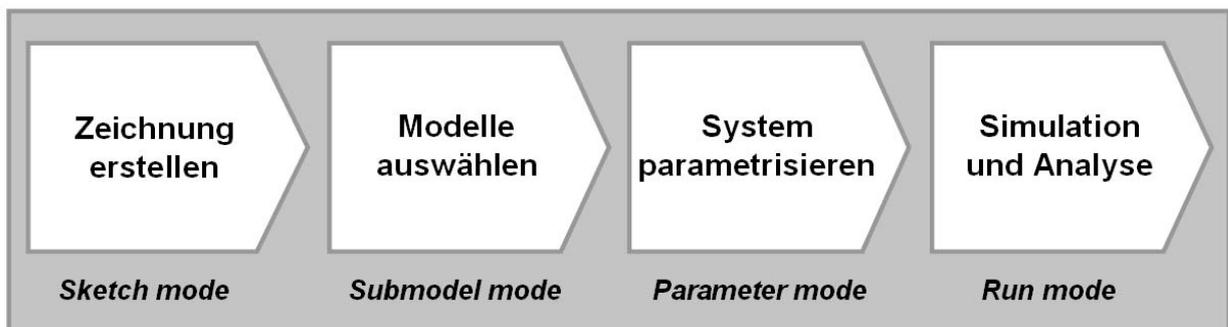


Abbildung 2-33: Modellierungs- und Simulationsprozess in AMESim

Die graphische Oberfläche von AMESim ermöglicht dem Benutzer komplexe Systeme in Netzwerkform durch die Komponentenauswahl aus den Modellbibliotheken und die anschließende Kombination zu erstellen (*Sketch mode*). Anschließend muss für jede Komponente das zugrunde liegende numerische Modell ausgewählt werden (*Submodel mode*). Auf diese Weise entsteht zugleich ein übersichtlicher und leicht verständlicher Schaltplan des Systems. Die Eingabe der Parameter erfolgt dann direkt über die ausgewählten Komponenten oder in globalen Parameterlisten (*Parameter mode*). Abschließend kann die Simulation und Auswertung der Ergebnisse erfolgen (*Run mode*).

2.3.6 Entwicklung pneumatischer Bauteile mit Hilfe von Strömungssimulation

Um den Überblick über das Thema Simulation in der Pneumatik zu vervollständigen, ist ein Blick auf die Computational-Fluid-Dynamics (CFD) Strömungssimulation unerlässlich. Diese ist häufig gemeint, wenn allgemein über das Thema Simulation in der Pneumatik diskutiert wird.

Für die Darstellung von Strömungsvorgängen existieren, je nach Anwendungsgebiet und Auflösungsgrad, unterschiedliche Simulationsprogramme. Die höchste Auflösung der Strömungseigenschaften und damit die besten Analysemöglichkeiten bieten CFD-Programme. Die aktuell bekanntesten Vertreter sind die Programme Fluent der Firma Fluent, CFX der Firma Ansys oder Star CCM+ von CD-adapco.

Derartige 3D-Berechnungsprogramme ermöglichen sehr genaue Ergebnisse, indem sich mit ihnen die relevanten Strömungsgrößen (meist Druck, Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur, etc.) in jedem Punkt des Strömungsfeldes berechnen lassen. Die Basis zur Modellierung und Berechnung der Strömungen ist die Finte-Volumen-Methode.

Diese Programme finden vor allem bei genauen Bauteilanalysen in kritischen Bereichen Verwendung, bei denen es wichtig ist, möglichst exakte Ergebnisse zu erhalten. Mittels anschaulicher Visualisierungsmöglichkeiten lassen sich Geräte detailliert analysieren und Erkenntnisse über die Durchströmung gewinnen, die mit anderen Werkzeugen nicht denkbar wären. Einsatzzweck ist sowohl die Neuentwicklung von Ventilen und pneumatischen Komponenten als auch deren Optimierung.

Meist wird die Modellierung und Simulation in derartigen Programmen in drei Schritte unterteilt: *Praeprocessing*, *Solving* und *Postprocessing*. Beim *Praeprocessing* wird der umströmte bzw. durchströmte Körper mit einem CAD-System geometrisch modelliert und daraufhin vernetzt. Im *Solverprozess* wird das diskretisierte Problem numerisch gelöst und der *Praeprocessor* dient der Auswertung und Visualisierung der berechneten Ergebnisse.

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese hohe Genauigkeit einen sehr hohen Modellierungsaufwand und sehr lange Rechenzeiten erfordert. Daher werden größere Systeme nicht mit dieser Methode untersucht.

2.3.7 Zusammenfassung zur Simulation in der Pneumatik

Als Zusammenfassung zur Simulation in der Pneumatik dienen folgende Kernaussagen:

- Simulation ist im weiteren Sinne das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell.
- Die Verwertung der Simulationsergebnisse muss immer unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen erfolgen. Verifikation und Validierung sind die Grundlage für eine Entscheidungsfindung auf Basis der Simulation.
- Modellbildung und Simulation sind Methoden, welche auch über die Ingenieurwissenschaften hinaus vielfältige Verwendung finden. Dabei unterscheiden sich die grundsätzlichen Regeln nicht.
- Der aktuelle Einsatz von Simulation im Bereich der Pneumatik unterteilt sich im Wesentlichen in die Auslegung pneumatischer Systeme mit 1-D-Fluidsystemsimulation und in die Unterstützung der Konstruktion und Optimierung von pneumatischen Bauteilen mit 3-D-Strömungssimulation (CFD).
- Trotz bekannter Grenzen beim derzeitigen Stand der Technik der 1-D-Strömungssimulation in der Pneumatik eignen sich derartige Werkzeuge zur Ausle-

gung von Pneumatiksystemen und können als Ersatz für aufwändige Systemversuche herangezogen werden. Entscheidend ist hierbei das Thema Verifikation und Validierung.

- Standardsoftware bietet gegenüber Individualsoftware viele Vorteile. So ist sie z.B. nicht abhängig von bestimmten Personen im Unternehmen. Sie wird durch die Herstellerfirma gewartet und weiterentwickelt.
- Strömungssimulation (CFD) bietet vielfältige Möglichkeiten bei der Untersuchung, Entwicklung und Optimierung von Bauteilen pneumatischer Geräte. Auf Grund des hohen Berechnungsaufwandes eignet sie sich nicht für die Simulation komplexer Systeme.

2.4 Ableitung des Handlungsbedarfes zur Definition einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik

Es zeigt sich, dass in einem dynamischen Marktumfeld die Beherrschung des Prozesses der Projektierung von Maschinen und Anlagen große Herausforderungen birgt. Da es sich um große Auftragswerte und hohe technische Komplexität innerhalb der zu projektierenden Systeme handelt, sind mit der Angebotserstellung typischerweise große Risiken verbunden. Diese Risiken sind dadurch gegeben, dass in der Regel die Inhalte des Angebotes später Teil des Vertrages werden und somit nicht einfach zu revidieren sind. Unter Wettbewerbsdruck erstellte Angebote müssen allerdings vergleichsweise knapp kalkuliert sein. Eine spätere, im Auftragsfall notwendige Nachbesserung, z.B. in Form einer Vergrößerung des Liefer- und Leistungsumfanges, fällt bei einer nicht spezifikationskonformen Auslegung zu Lasten des Auftragnehmers und kann dort zu erheblichen wirtschaftlichen Problemen bis hin zur Bedrohung der Existenz des Unternehmens führen. Zur Beherrschung derartiger Risiken ist eine hinreichende Präzision bei der Ausarbeitung der Angebote notwendig, um eine angemessen genaue Vorhersage über die Erfüllung der Kundenanforderungen treffen zu können. Gleichzeitig ist nicht selten eine sehr zeitnahe Erstellung von Angeboten erforderlich, was die präzise Ausarbeitung zusätzlich erschwert.

Angebote, welche den oben genannten Anforderungen genügen, erfordern bei herkömmlichen Herangehensweisen einen großen Aufwand. Dies steht im klaren Widerspruch zum Wunsch, den Aufwand für die Projektierung möglichst klein zu halten. Dieser Wunsch basiert vor allem darauf, dass selbst in wirtschaftlichen Boomzeiten nur durchschnittliche Trefferquoten von 30% (vgl. Abbildung 2-27) erreichbar sind und somit ein hoher Aufwand für das Angebot nur schwer in einem vertretbaren Verhältnis zum Nutzen stehen kann.

Vor diesem Hintergrund liegt die Erkenntnis nahe, dass der Projektierungsprozess mit Hilfsmitteln unterstützt werden muss, die zum einen die Qualität der Angebotsausarbeitung verbessern, und zum anderen dabei keinen erhöhten, sondern besser reduzierten Aufwand, verglichen mit dem heute praktizierten Vorgehen, erfordern.

Die Ausführungen zur Systemsimulation (Kapitel 2.3) haben gezeigt, dass die Simulation ein mächtiges Werkzeug sein kann, um im Sinne einer Eigenschaftsfrüherkennung Systeme zu analysieren. Sie lässt sich dazu nutzen, dem jeweils zur Verfügung stehenden Kenntnisstand

entsprechend, genaue Aussagen über das System treffen zu können. Es zeigt sich weiter, dass Simulation in vielen Bereichen auf dem Vormarsch ist. Dies gilt auch für das Feld der Pneumatik, wo es nach aktuellem Stand der Technik möglich ist, mit Hilfe von numerischer Simulation Systeme und ihr dynamisches Verhalten zu untersuchen. Allerdings wird dieses Werkzeug bislang im Maschinen- und Anlagenbau auf Grund seiner hohen Komplexität und der aufwändigen Anpassung an die gegebenen Randbedingungen und Anforderungen nicht in vollem Umfang genutzt. Häufig wird nur die Schwierigkeit der Umwandlung eines Simulationsprogrammes in ein Projektierungswerkzeug erkannt. Auf Grund eines fehlenden Vorgehens zur Lösung dieser Problemstellung wird dann vom Einsatz eines derartigen Werkzeuges abgesehen. Das Unternehmen in der Fallstudie dieser Arbeit konnte in der Vergangenheit als Beispiel hierfür herangezogen werden. Inzwischen zeigt sich dort, dass die Entscheidung, Vorreiter in der Branche zu sein und Pneumatiksimulation auch im Projektgeschäft einzusetzen, erste Vorteile bringt. Letztlich sollte die Projektierung aus oben genannten Gründen durch Werkzeuge unterstützt werden, wofür sich insbesondere die Pneumatiksimulation auf Grund ihrer weitreichenden Möglichkeiten gut eignet.

Die Simulation pneumatischer Systeme zur Unterstützung der Projektierung bedeutet in der Regel die Beherrschung von hoher Komplexität (HOFFMANN & KOHNHÄUSER 1999). Diese ist durch unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen an Systeme, mit vielen unterschiedlich verknüpften und zueinander unterschiedlichen Systemelementen, sowie der daraus resultierenden Dynamik, gegeben. Grundsätzlich erscheint es erstrebenswert, dass diese Komplexitätsbeherrschung durch selbstständig projektierende Systeme implementiert wird. Da derartige Systeme letztlich aber nur Wiederholhandlungen ausführen³⁵ können, müsste eine sehr große Basis geschaffen werden, um diese Wiederholtätigkeit durch ein Projektierungswerkzeug zu ermöglichen. Dieser Aufwand ist in den meisten Fällen auf Grund der hohen Varianz zu groß und somit nicht vertretbar. In der Regel kann also beim Einsatz von Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug nicht gänzlich auf primäre Intelligenz verzichtet werden.

Wenn man sich letztlich dazu entschließt, Pneumatiksimulation für die Systemprojektierung einzusetzen, dann tritt der in der Einleitung erwähnte Zielkonflikt zwischen optimierten Systeme mit vielen Neuentwicklungen auf der einen Seite, und Standardisierungsbemühungen, die für den wirtschaftlichen Erfolg entscheidend sind, auf der anderen Seite deutlich hervor. Dieser Zielkonflikt kann und muss bei der Ausgestaltung eines Projektierungswerkzeuges dahingehend berücksichtigt werden, dass dieses die Projektierung eines technisch optimalen Systems, bestehend aus Standardkomponenten, maßgeblich unterstützt.

Ist die Notwendigkeit eines Projektierungswerkzeuges erkannt, muss man sich mit der Herausforderung der Einführung auseinandersetzen. Hierfür liefern die Ausführungen in Kapitel 2.1 Hinweise, die auch bei der Vorstellung der erarbeiteten Methodik an bestimmten Stellen herangezogen werden, um diverse Entscheidungen während der Entwicklung zu begründen. Es zeigt sich anhand von Erfahrungen aus allen untersuchten Bereichen, dass nur mit einem strukturierten Vorgehen sichergestellt werden kann, dass Einführungsprojekte er-

³⁵ Aufgrund fehlender primärer Intelligenz können Softwaresysteme nur sekundäre Intelligenz im Sinne von Wiederholhandlungen unter Bedienerführung darstellen. (AMFT 2002 & KOLLER 1991)

folgreich verlaufen. Ohne genaue Planung und Überwachung der Zwischenschritte wird die Einführung nur selten erfolgreich sein.

In der Literatur finden sich verschiedenste Gründe, warum Werkzeugeinführungen scheitern. Wie im Kapitel 2.1 beschrieben, ist die Anpassung eines einzuführenden Werkzeuges an Einsatz und Umfeld dabei von großer Bedeutung. Da es sich bei der numerischen Simulation um ein hoch komplexes Werkzeug handelt, ist zunächst die Ermittlung des Anpassungsbedarfes, also die Ausgestaltung als Projektierungswerkzeug, bzw. die Adaption dahin, für sich genommen eine anspruchsvolle Aufgabe. Darüber hinaus ist das Einsatzfeld von hoher technischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Daraus ergibt sich ein deutlicher Erfolgsdruck, sowohl bezüglich der Entwicklung, als auch der Einführung des Werkzeuges.

Als weiterer erfolgsentscheidender Punkt erweist sich die Einbeziehung der späteren Nutzer in die Planung der Einführung sowie in die Ausgestaltung des Werkzeuges. Parallel zur Analyse von Technik, Unternehmen und Prozess kann durch das Schaffen von Einflussmöglichkeiten für die Werkzeugnutzer, dem Aufkommen teils irrationaler bzw. emotionaler Widerstände wirkungsvoll entgegengetreten werden. Im gleichen Kontext sind dazu noch Fragen zu stellen, welcher Stil und welche Vorgehensweise bei der Einführung, und später, welcher Zwang zur Verwendung des Werkzeuges angemessen ist. Diese Fragen sind je nach Projektierungsprozess und –werkzeug, sowie dem Umfeld im Unternehmen zu definieren. Die Ausführungen im Stand der Technik geben einen guten Überblick, welche Variationen hierbei möglich sind.

Als zusammenfassendes Fazit kann festgehalten werden: Die Aufgabe *Entwicklung und Einführung der Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug in einem Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus* kann nur dann mit hoher Wahrscheinlichkeit erfolgreich abgeschlossen werden, wenn sie durch eine sinnvoll strukturierte Entwicklungs- und Einführungsmethodik unterstützt wird. „Erfolgreich“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sowohl die Einführung als auch die Ausprägung des Werkzeuges und dessen spätere Verwendung einen hohen Wirkungsgrad erreichen.

Die Betrachtung des Standes der Forschung und der Technik zeigen, dass zu den drei wesentlichen Themenschwerpunkten dieser Arbeit, nämlich Unterstützung des Projektierungsprozesses, Adaption und Einsatz des komplexen Werkzeuges Pneumatiksimulation, sowie das Change Management zur Einführung eines Werkzeuges, vielfältige Teilerkenntnisse bestehen. Es fehlt allerdings eine übergreifende Verknüpfung dieser hin zur Lösung der durch die Kombination der Schwerpunkte gegebenen Problemstellung. Aus diesem Grund besteht Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation. Für eine derartige Vorgehensmethodik gilt, dass sie das Vorgehen definieren und alle wichtigen Facetten berücksichtigen muss. Sie sollte zudem Empfehlungen für die Integration eines sinnvoll ausgeprägten Projektmanagements beinhalten. Hierzu zählt die Projektorganisation ebenso wie ein Reflexionszwang oder zugehöriges Projektcontrolling. Hilfreich sind darüber hinaus Vorschläge für Unterstützungshilfsmittel, wie bestimmte Methoden oder Praxis-Beispiele.

3. Anforderungen & Vorgehensweise zur Definition einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik

Auf Basis der vorangegangenen Kapitel zum Stand der Technik und dem abgeleiteten Handlungsbedarf folgt in diesem Kapitel die Beschreibung der Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik. Anschließend werden die wichtigsten Anforderungen zur Definition einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik erarbeitet, bevor das daraus abgeleitete Grundkonzept vorgestellt wird.

3.1 Definition der Entwicklungs- und Einführungsmethodik

„Trotz der Vielzahl von Vorgehensmodellen wie Strategien und Methoden sind in der Literatur nur wenige Hinweise auf deren Entwicklung zu finden. In den meisten Fällen werden die Vorgehensmodelle als Ergebnisse präsentiert und es ist zu vermuten, dass diese in vielen Fällen empirisch und intuitiv entwickelt wurden.“ (HEBLING 2006, S. 109) Auf Grund dieser Beobachtung hat HEBLING (2006) eine Vorgehensweise zur Entwicklung von Vorgehensmodellen erarbeitet. Dazu weist er zunächst eine Analogie zwischen Produkten und Vorgehensmodellen nach, um dann auf Basis des vorrangig zur Produktentwicklung eingesetzten Münchner Vorgehensmodells von LINDEMANN (2007) dieses Vorgehensmodell zu erarbeiten. Dabei sind die drei Phasen *Planung*, *Entwicklung* sowie *Vermittlung und Implementierung* zu durchlaufen. Die *Entwicklung* orientiert sich ebenfalls am Vorgehen in der Produktentwicklung und gibt die Schritte Aufgabenklärung, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten sowie Testen & Verifizieren vor. (HEBLING 2006, S. 104ff)

Der allgemeine wissenschaftliche Ansatz dieser Arbeit wurde bereits in Kapitel 1.4 beschrieben. Bezogen auf die Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik wurde dabei ein Vorgehen gewählt, welches sich auch mit dem Modell von HEBLING (2006) in Einklang bringen lässt: Die Phase *Planung* erfolgte im Vorfeld der in dieser Arbeit beschriebenen Handlungen. Die wesentlichen Ergebnisse der Planung finden sich in der Beschreibung der Problemstellung (Kapitel 1.2). Sie bildeten die Grundlage für das erwähnte Forschungsprojekt (Kapitel 1.5). Im Rahmen dieses Projektes erfolgte dann die *Entwicklung* der Methodik. Hierzu wurden zur *Aufgabenklärung* zunächst die drei Themenschwerpunkte *Einführung von Werkzeugen* (Kern der Aufgabe – Kapitel 2.1), *Projektierungsprozess* (Umfeld der Einführung – Kapitel 2.2) und *Pneumatiksimulation* (Werkzeug – Kapitel 2.3) analysiert. Die Zusammenfassung der jeweiligen Analyse und die diesem Kapitel vorangegangene Ableitung des Handlungsbedarfes ergeben die Anforderungen an die Entwicklungs- und Einführungsmethodik. Die folgende Schritte *Konzeption und Entwurf* fanden auf Basis der Aufgabenklärung im nächsten Schritt statt. Dazu wurde ein Konzept für die Vorgehensweise aufgesetzt, welches am Ende dieses Kapitels vorgestellt wird. Aus diesem *Konzept* entstand ein *Entwurf* der Entwicklungs- und Einführungsmethodik, welcher vor allem durch das MVM von LINDEMANN (2007) und die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu Einführungsansätzen stark beeinflusst wurde.

Die *Ausarbeitung* folgte im nächsten Schritt, bevor die Erstanwendung im Beispielunternehmen (*Test & Verifizierung*) zu diversen Verbesserungen führte. Diese Erstanwendung (Kapitel 5) der Einführungsmethodik konnte noch nicht abgeschlossen werden, so dass auf eine weitere *Vermittlung und Implementierung* nur im Ausblick der Arbeit verwiesen werden kann.

Im Folgenden soll zunächst das Ergebnis der Aufgabenklärung beschrieben werden, bevor auf das Konzept der Vorgehensweise eingegangen werden kann.

3.2 Anforderungen an die Entwicklungs- und Einführungsmethodik

Aus der dieser Arbeit zugrunde liegenden Problemstellung (Kapitel 1.2) und dem Stand der Technik (Kapitel 2.1 bis einschließlich 2.3) wurde der im Kapitel 2 beschriebene Handlungsbedarf abgeleitet, aus welchem sich wiederum die nachstehenden Anforderungen ergeben. Diese bilden zugleich die Grundlage für die Reflexion im Schlusskapitel dieser Arbeit. Quelle der Anforderungen ist damit im Wesentlichen der Stand der Forschung und der Technik, sowie Erfahrungen des Autors im industriellen Umfeld. Die erarbeiteten Anforderungen lassen sich in drei Blöcke fassen. Ein Teil richtet sich direkt an das zu entwickelnde Projektierungswerkzeug, ein weiterer richtet sich auf das Change Management der Einführung. Der dritte Block fokussiert die Verknüpfung der beiden erstgenannten Blöcke in Form der Gesamtmethodik zur Entwicklung *und* Einführung des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation. Mit diesen letztgenannten Anforderungen wird die Aufzählung im Folgenden begonnen.

Allgemeine Anforderungen an die Gesamtmethodik:

- **Projektmanagement & Controlling:** Die Entwicklung und Einführung eines Projektierungswerkzeuges muss einem strukturierten Vorgehen folgen. Es sind Controlling-Mechanismen erforderlich, welche die Möglichkeit zur Überwachung des Projekterfolges und zur Korrektur ermöglichen. (Kapitel 2.1.2 & 2.1.3)
- **Analyse des Ist-Standes:** Die Analyse des Ist-Standes ist als Basis für die Entwicklung und die Beschreibung der Anforderungen an das einzuführende Projektierungswerkzeug Systemsimulation erforderlich. (Kapitel 2.1.3)
- **Soziotechnische Aspekte:** Die Entwicklungs- und Einführungsmethodik muss neben der Technik auch das Unternehmen mit seinen Strukturen, Mitarbeitern, Prozessen usw. berücksichtigen. Vor allem muss die Beachtung des Menschen als Nutzer des einzuführenden Werkzeuges in die Lösungsfindung eingebaut werden. (Kapitel 2.1.2)
- **Visualisierung:** Es ist eine aussagekräftige Visualisierung für die Entwicklungs- und Einführungsmethodik zu erstellen, um die Vorgehensweise stets transparent darstellen zu können. (Kapitel 2.1.2)
- **Evaluation und Reflexion** sind für den Erfolg von Change Management von hoher Bedeutung und aus diesem Grunde in der Entwicklungs- und Einführungsmethodik zu verankern. (Kapitel 2.1.2 & 2.1.4)

- Vorgehensweise: Die Berücksichtigung der Einführungsstilauswahl, der Anwenderbeteiligung am Entscheidungsprozess und der späteren Verwendung des Werkzeuges ist von entscheidender Bedeutung und muss in die Methodik integriert werden. (Kapitel 2.1.2)
- Entscheider: Es müssen alle relevanten Entscheidungsebenen berücksichtigt und sinnvoll eingebunden werden. (Kapitel 2.1.2)
- Bekannte Erfolgsaspekte von Einführungsaufgaben sind zu berücksichtigen. (Vgl. Abbildung 2-2)
- Bei der Gesamtmethodik soll es sich um einen wissenschaftlich fundierten und übertragbaren Ansatz handeln, um eine breite Anwendung der zu entwickelnden Methodik sicherzustellen.

Anforderungen an das Projektierungswerkzeug:

Aus dem Stand der Technik ergeben sich einige grundsätzliche Anforderungen an das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation. Damit sind sie auch indirekte Anforderungen an die Entwicklungs- und Einführungsmethodik. Sie lauten wie folgt:

- Aufwand/Nutzen-Relation: Das Projektierungswerkzeug ist so zu gestalten, dass sich der Aufwand in der Projektierung entweder bei gleichbleibender Auslegungsqualität reduzieren lässt, oder bei gleichem Aufwand eine signifikante Steigerung der Auslegungsqualität erreicht wird. Der Vergleich zu Systemversuchen muss unter Berücksichtigung der Ergebnisqualität bezogen auf Aufwand und Dauer deutlich positiv ausfallen. Bei dieser Anforderung ist zu erwähnen, dass es hierfür keine absoluten Maßstäbe gibt und deshalb de facto nicht gemessen, sondern nur verglichen werden kann. (Kapitel 2.2.3)
- Standardisierung: Das Projektierungswerkzeug soll den Zielkonflikt zwischen Systemoptimierung und Systemstandardisierung durch einen geeigneten Kompromiss auflösen. Hierbei ist zu beachten, dass diese Anforderung unternehmensspezifisch ist und somit an die Unternehmensstrategie angepasst werden muss. (Kapitel 1.2 & 1.1.3)
- Verfügbarkeit: Praxistaugliche Auslegungswerkzeuge müssen in der Lage sein, zeitnah Ergebnisse zu liefern, um so der Dynamik im Projektierungsprozess gerecht zu werden. (Kapitel 2.1.2 & 2.2.3)
- Integration: Das Projektierungswerkzeug muss in die Prozesse, Abläufe und Strukturen des jeweiligen Unternehmens integrierbar sein. (Kapitel 2.1.2)
- Adaption (Customizing): Das Werkzeug Pneumatiksimulation wird nur dann zu einem erfolgreichen Projektierungswerkzeug, wenn es bezogen auf Systemaufbau, Systemelemente, Variationsmöglichkeiten, Parametrisierung, Ergebnisgenauigkeit usw. an die vorliegenden Fragestellungen angepasst wird. (Kapitel 2.1.2)
- Verifikation und Validierung: Die Absicherung der Ergebnisse des Projektierungswerkzeuges muss während der Anwendung berücksichtigt werden. (Kapitel 2.2.2 & 2.3.1)

- Sekundäre Intelligenz: Nach Möglichkeit ist das Projektierungswerkzeug so auszuführen, dass es zu möglichst großen Teilen auf primäre Intelligenz verzichten kann. Dazu sollte eine automatische Erreichung der Systemoptimierung durch das Projektierungswerkzeug angestrebt werden. Dies ist allerdings nur bis zu dem Punkt möglich, an dem eine primäre Intelligenz z.B. zur Systemdefinition oder zur Interpretation von Simulationsergebnissen erforderlich wird. (Kapitel 2.2.2)
- Simulationskenntnisse: Der Projektierer soll ein Projektierungswerkzeug möglichst fehlerfrei nutzen und die Ergebnisse interpretieren können, ohne selbst Fachmann für Modellbildung und numerische Simulation sein zu müssen. (Kapitel 2.2.2)

Anforderungen an die Einführung des Projektierungswerkzeuges:

- Planung der Einführung: Vielfältige Erfahrungen beim Change Management zeigen, dass die Planung von entscheidender Bedeutung ist. Darüber hinaus sollen klassische Elemente des Projektmanagements (Meilensteine, kontinuierliches Controlling, zielorientierte Strukturierung des Projekts, etc.) Anwendung finden. (Kapitel 2.1.2 & 2.1.3)
- Schulung: Das Thema Schulung ist in die Entwicklungs- und Einführungsmethodik zu integrieren. Dabei sollten alle Widerstandstufen (nach GALPIN 1996) und die zugehörigen Maßnahmen adressiert werden. (Kapitel 2.1.2)
- Lessons Learned: Rückfluss von Verbesserungsvorschlägen aus Schulung, Pilotanwendung, Prototypeneinsatz und Einführung muss sichergestellt werden. (Kapitel 2.1.3 & 2.1.4)
- Visualisierung: Funktionsweise des Werkzeuges, Darstellung der Abläufe, Integration in Organisation, Abläufe und Prozesse sollte, wenn sinnvoll, durch geeignete Visualisierungen unterstützt werden. (Kapitel 2.1.2)
- Management Unterstützung: Alle relevanten Entscheidungsebenen sind einzubeziehen. Es ist zu berücksichtigen, dass nur mit uneingeschränkter Unterstützung des Unternehmensmanagements erfolgreiches Change Management wahrscheinlich ist. (Kapitel 2.1.2)

3.3 Konzept für die Entwicklungs- und Einführungsmethodik

Auf Basis der Aufgabenklärung (Ergebnis Anforderungen) wurde zunächst ein Konzept für die Entwicklungs- und Einführungsmethodik erarbeitet, welches im Wesentlichen das Vorgehen in Form eines Phasenmodells beschreibt. Auf Basis der Untersuchungen zum Change Management wurde eine Einteilung in die Phasen Analyse, Konzept und Realisierung (Abbildung 3-1) als zielführend beurteilt.

Basierend auf diesem Konzept entstand der Entwurf der Methodik, welches das Phasenkonzept um die Einteilung in zwei aufeinander abzustimmende Themenschwerpunkte (TECHNIK und ORGANISATION) und um den später vorgestellten Projektmanagementansatz erweitert. Das Vorgehensmodell wurde zudem um die Phase Reflexion ergänzt, damit der gro-

ßen Bedeutung der Zielabsicherung Rechnung getragen wird, bevor auf Basis der Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und der Technik die Ausarbeitung der Gesamtmethodik mit dem MVM als Vorbild erfolgen konnte. Das folgende Kapitel stellt als Ergebnis die so erarbeitete Entwicklungs- und Einführungsmethodik vor. Die Beschreibung beinhaltet dabei außerdem bereits die sich aus den Erfahrungen der Fallstudie ergebenden Verbesserungen.



Abbildung 3-1: Grobstruktur des entwickelten Vorgehensmodells

4. Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation

Dieses Kapitel stellt die erarbeitete Methodik zur Entwicklung und Einführung der numerischen Simulation als Werkzeug zur Unterstützung der Projektierung komplexer pneumatischer Systeme vor. Diese basiert auf dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Grundkonzept und berücksichtigt die Anforderungen sowohl an Werkzeug und Methodik als auch an den Prozess der Einführung. Zur Vorstellung der Methodik folgt eine Kurzbeschreibung, bevor die einzelnen Modellphasen detailliert beschrieben werden. Dabei werden die jeweils wesentlichen Aspekte in Unterkapiteln herausgearbeitet und die Methodik durch Nennung von unterstützenden Methoden und Hilfsmitteln sowie zusätzlichen Hinweisen vervollständigt.

4.1 Kurzvorstellung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik

Die Entwicklungs- und Einführungsmethodik besteht aus einem Vorgehensmodell, unterstützenden Methoden und Hilfsmitteln und einem Projektmanagementansatz. Der Bedeutung der Einteilung in Phasen und deren Anzahl verdankt das Vorgehensmodell seinen Namen 4-Phasenmodell. Grundlage des darin beschriebenen Vorgehens ist das Münchner Vorgehensmodell nach LINDEMANN (2007). Mit Hilfe des 4-Phasenmodells und seiner zusätzlichen Erläuterungen und Methodenhinweise, sowie dem dazu ausgearbeiteten Projektmanagementwerkzeug *gate*³⁶, können die im vorangegangenen Kapitel aufgeführten Anforderungen an Methodik und Vorgehen, Projektierungswerkzeug und Einführungsprozess weitestgehend erfüllt werden (vgl. Kapitel 3.2).

Nach der Beschreibung der Methodik in diesem Kapitel und den Ausführungen zur Erstanwendung in Kapitel 5 folgt im Schlusskapitel dieser Arbeit unter anderem die Diskussion, inwieweit die Gesamtmethodik auch über den Maschinen- und Anlagenbau hinaus für ein anderes Werkzeug und andere Prozesse anwendbar ist.

4.1.1 Überblick über das 4-Phasenmodell

Das Vorgehensmodell (Abbildung 4-1) erstreckt sich über vier Phasen, welche entsprechend ihrer inhaltlichen Schwerpunkte als Analyse-, Konzept-, Realisierungs- und Reflexionsphase

³⁶ Das hier implementierte Projektmanagementwerkzeug „gate“ ist eine Adaption der von AMFT ET AL. (2009) entwickelten Quality „Gates“ zur Steuerung von Produktentwicklungsprozessen. AMFT ET AL. (2009) haben für derartige Steuerungsmechanismen das Legitimationsprinzip empfohlen, welches auch die Grundlage für die hier vorgestellten *gates* darstellt.

bezeichnet werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Inhalte folgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

Der Prozess der Tooleinführung in einem bestehenden Unternehmen muss sich an der bestehenden Unternehmensorganisation und an den Spezifika der behandelten Technik orientieren. Darüber hinaus haben die Erfahrungen aus anderen Einführungsprojekten gezeigt (siehe Kapitel 2.1.2), dass eine rein technische Betrachtung der Problemstellung nicht zielführend ist. Insbesondere die Bedeutung des Werkzeugnutzers, die das Problem von einem technischen zu einem soziotechnischen werden lässt, muss berücksichtigt werden. Das 4-Phasenmodell wird daher in die beiden Bereiche ORGANISATION und TECHNIK unterteilt, in deren Mitte die Entwicklung, Realisierung und Einführung des Projektierungswerkzeuges abläuft. Für den Erfolg des Einführungsprojektes ist es von entscheidender Bedeutung, dass die dabei gebildeten Leitplanken aus Randbedingungen und Anforderungen ausführlich analysiert, stetig verfolgt und im Projekt eingehalten werden. Dazu zählt auch ein ständiger Abgleich zwischen beiden Bereichen.

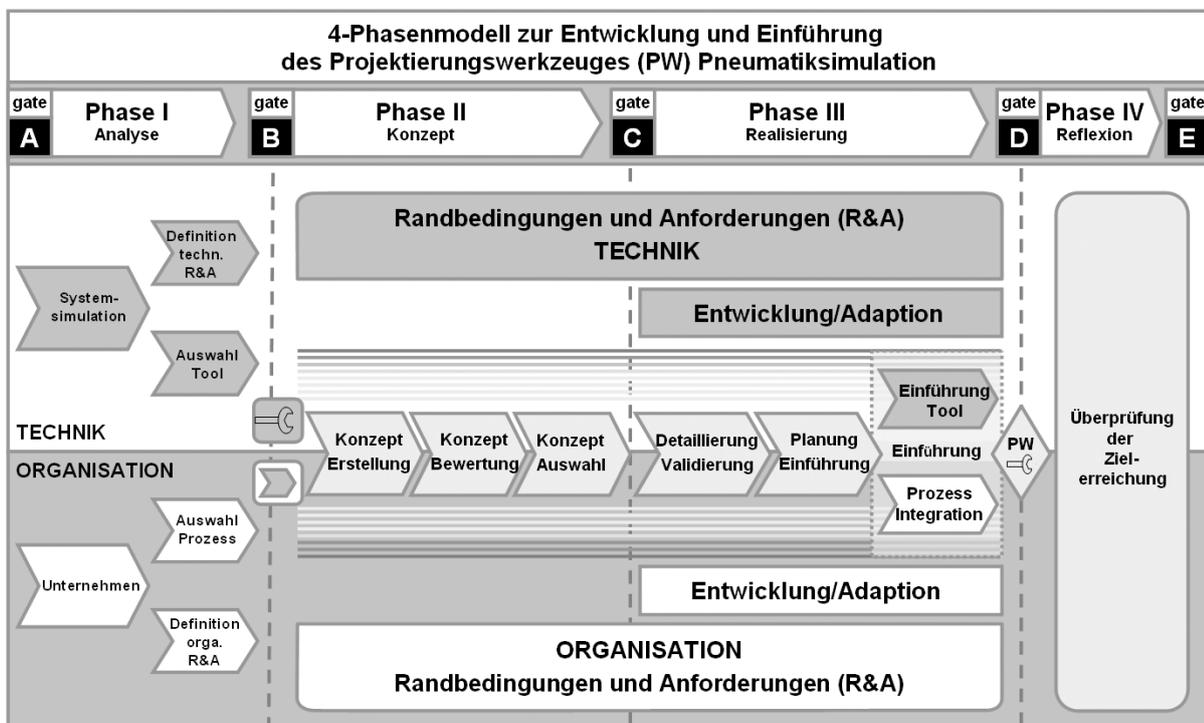


Abbildung 4-1: 4-Phasenmodell zur Entwicklung und Einführung des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation

Das Vorgehensmodell startet in der **Analysephase** mit der grundlegenden Untersuchung in beiden Bereichen – also der **TECHNIK** und der **ORGANISATION**. Die parallelen Untersuchungen beider Bereiche sind Voraussetzung für die Definition der Leitplanken und grundlegende Bedingung für den Start der Toolkonzeption. Die Betrachtung der Simulation und der dazugehörigen technischen Möglichkeiten allein ist nicht ausreichend.

Die Analysephase muss bereits zur Auswahl des Simulationstools führen und klar die möglichen Ansatzpunkte im Prozess identifizieren. Dies ist die zwingende Voraussetzung für den Start der nächsten Phase des Einführungsprojektes. Wenn das Einführungsprojekt mit einer

indifferenten Toolauswahl und ohne klare Vorstellung zur Prozesseingliederung startet, ist es orientierungslos und damit im realen Unternehmensumfeld nicht zum Erfolg zu führen. Die Auswahl des Tools und der Prozessanker kann ein beliebig aufwändiges Teilprojekt sein, das mit Abschluss der Analysephase des Einführungsprojekts eindeutig beendet sein muss.

Den Kern des Vorgehensmodells bilden die Phasen II und III. In der **Konzeptphase** werden zunächst verschiedene Projektierungswerkzeugentwürfe erarbeitet, deren Eigenschaften ermittelt, und schließlich daraus ein geeignetes Konzept ausgewählt. In der **Realisierungsphase** wird das ausgewählte Konzept ausgearbeitet, die Einführung geplant und das Tool technisch umgesetzt und in die Organisation eingeführt. Parallel dazu werden in den Bereichen TECHNIK und ORGANISATION die notwendigen Entwicklungen, bzw. Anpassungen in Bezug auf die Systemsimulation, das Projektierungswerkzeug, die Prozesslandschaft und die Organisation vorgenommen. Am Ende des Hauptprozesses steht nach der Einführung der Meilenstein *Projektierungswerkzeug* – (Abkürzung: PW).

Die Phase IV führt alle Tätigkeiten in Form einer abschließenden **Reflexion** zusammen. Hierbei soll der Erfolg der Einführung abgeprüft werden und Fehler oder Probleme gegebenenfalls aufgearbeitet und dokumentiert werden. Die Sicherstellung der Nachhaltigkeit der Einführung sollte belegt werden. So kann z.B. die Verankerung in den Unternehmensprozessen durch interne oder externe Prozess-Audits abgesichert werden. Die Qualität des Werkzeuges sollte durch eine neutrale Beurteilung der Anwendungsergebnisse validiert werden. Anschließend kann die Entlastung des Projektteams und damit der endgültige Projektabschluss vollzogen werden.

4.1.2 Projektmanagement – Steuerung über *gates*

Das Vorgehensmodell unterteilt den Einführungsprozess in vier Phasen und hat folglich drei Übergänge zwischen diesen Phasen. Mit dem Eintritt in das Projekt ergeben sich vier Phaseneintritte und der Phasenaustritt in Form der Entlastung zum Abschluss des Projektes. Wenn man diesen Abschluss als Eintritt in die Nach-Projekt-Phase bezeichnet, können fünf sogenannte *gates* als Phasenzugänge gesetzt werden. Diese müssen jeweils durchschritten werden, bevor Tätigkeiten aufgenommen werden dürfen, die der nächsten Phase zugeordnet sind. Dadurch lässt sich der Einführungsprozess steuern und qualitativ überwachen.

Durch das *gate* kann vor dem Eintritt in die jeweils nächste Phase das Projekt angehalten, sowie die Zielerreichungschancen und Risiken beleuchtet werden, um dann gegebenenfalls Änderungen vorzunehmen. Das kann bedeuten, Ansätze zu verändern, sozusagen gegenzusteuern, oder das Projekt sogar abzubrechen³⁷. Dies kann erforderlich sein, wenn sich Entwicklungen ergeben, die für die Einführung der Pneumatiksimulation als Projektierungswerk-

³⁷ Vgl. hierzu das Stage-Gate-Modell von COOPER (2002). Wesentlicher Bestandteil seiner Prozessbeschreibung sind neben der Einteilung in Abschnitte definierte Tore, welche zwischen den einzelnen Abschnitten positioniert sind und als Meilenstein fungieren. Bevor ein Projektteam die Aufgaben des nächsten Abschnitts in Angriff nehmen kann, wird im Rahmen der Gates eine Entscheidung getroffen, ob das Projekt fortgeführt, bedingt fortgeführt oder abgebrochen wird. (COOPER 2002)

zeug kontraproduktiv sind oder sie sogar unmöglich machen. Im Rahmen des Phasenübergangs kann abgefragt werden, ob die entscheidenden Tätigkeiten durchgeführt wurden, die erforderlichen Ergebnisse erarbeitet wurden und der Projekterfolg allgemein wahrscheinlich ist. Kriterien bzw. Merkmale für den Projekterfolg sind unter anderem die Einhaltung des Budgets, der Terminplanung und letztlich die erfolgreiche Einführung, die sich in effizienter und effektiver Nutzung des neuen Werkzeuges zeigt.

Rücksprünge vor ein *gate* sind dann möglich und sinnvoll, wenn sich herausstellt, dass die dort getroffenen Entscheidungen falsch waren und dadurch ein Neuansatz erforderlich ist. Dann müssen die begonnenen Tätigkeiten der auf das *gate* folgenden Phase beendet werden, um eine echte Entscheidung über das weitere Vorgehen zu ermöglichen. Außerdem birgt ein paralleles Weiterarbeiten das Risiko von Ressourcenverschwendung und dem Auseinanderdriften der Entwicklungsbestrebungen.

Darüber hinaus gelten während der Anwendung des 4-Phasenmodells die inzwischen üblichen Praktiken des Projektmanagements (vgl. PMI 2003). Hauptmeilensteine sollten den *gates* zugeordnet werden, welche das Einführungsprojekt grundsätzlich gliedern. Daraus ergeben sich auch deren deskriptive Bezeichnungen, wie Abbildung 4-2 zeigt. Weiter sind je nach Ausprägung des Einführungsprojektes und entsprechend dem erforderlichen Detaillierungsgrad der Planung weitere Meilensteine in gegebenenfalls mehreren Ebenen möglich.

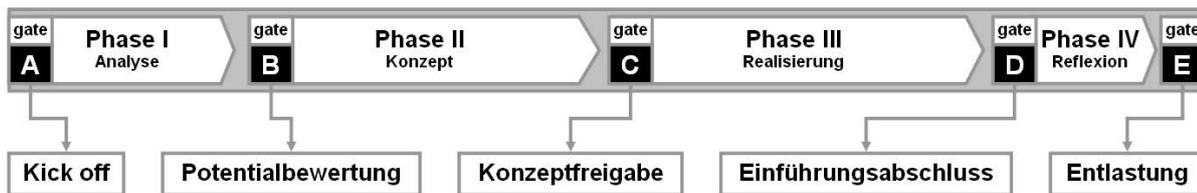


Abbildung 4-2: Deskriptive Bezeichnungen der gates

4.1.3 Zusammenhang zwischen MVM und 4-Phasenmodell

Das Kapitel 2.1 zur Einführung von Methoden und Werkzeugen hat mehrere Schwerpunkte herausgearbeitet. Dort wird neben der strikten Planung darauf hingewiesen, dass es sich bei der Aufgabenstellung der Entwicklung und Einführung eines Werkzeuges in eine Unternehmensorganisation um ein vielschichtiges Problem handelt. Aus diesem Grund bietet sich die Verwendung eines flexiblen Problemlösungsmodells als Basis an. Die Wahl fiel auf das in Kapitel 2.1.4 bereits vorgestellte Münchner Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN (2007).

Die im Stand der Technik vorgestellten Vorgehensmodelle und Prozessbeschreibungen zur Einführung von Werkzeugen verfolgen in den meisten Fällen ein lineares Vorgehen. Die Erfahrungen aus den untersuchten Einführungsaufgaben in der industriellen Praxis haben gezeigt, dass bewusst die Freiheitsgrade des Vorgehens eingeschränkt werden müssen, um sich nicht in endlosen Optimierungsschleifen mit allen beteiligten Parteien zu verlieren. Das 4-Phasenmodell legt sich dementsprechend ebenfalls auf ein relativ festes Vorgehen, de facto einen vorgezeichneten Weg durch das MVM fest. Dabei kann man sich an den Empfehlungen

von LINDEMANN ET AL. (2007) und KREIMEYER ET AL. (2007) zum Verhalten in Krisensituationen orientieren. Dort wird ebenfalls auf die Flexibilität des MVM verzichtet, um möglichst direkt zu zielgerichteten Lösungen zu gelangen.

Als wissenschaftliche Grundlage für diese Art von Einschränkung kann, neben den oben genannten Hinweisen, aus der Literatur das Grundprinzip des Handelns nach WULF (2002) herangezogen werden, welches für einen nichtzufälligen Erfolg eine klare Zielsetzung³⁸ voraussetzt.

So wurde bei der Erstellung des Vorgehensmodells zur Einführung numerischer Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug zunächst der Standardweg durch das MVM als Handlungsdirektive vorgeschlagen (siehe Beschreibung des MVM in Kapitel 2.1.4). Im Verlauf der Ausarbeitung des 4-Phasen-Modells zeigte sich auch hier der Vorteil der Flexibilität im Vorgehensmodell von LINDEMANN (2007). So ist es in seinem Modell jederzeit möglich, Elemente mehrfach anzusteuern. Dies wurde beim 4-Phasenmodell dazu verwendet, dass das MVM-Element „Zielerreichung absichern“ in Form von *gates* iterativ angesteuert wird. Dieses ständige Controlling ist eine weitere Lehre aus den Untersuchungen zu anderen Einführungsansätzen.

Neben Iterationen kann es durchaus sinnvoll sein, Divisionen und Rekursionen zielgerichtet einzusetzen (HUTTERER 2005). Dadurch wird es möglich, in verschiedenen Granularitätsebenen zu arbeiten.

Der Einsatz von Rekursionen kann dabei intuitiv erfolgen, wie es z.B. bei der Toolauswahl zu erwarten ist. Es wird darüber hinaus an einigen Stellen im 4-Phasenmodell explizit empfohlen, die Elemente „Problem strukturieren“, „Lösungsideen ermitteln“, „Eigenschaften ermitteln“ und „Entscheidungen herbeiführen“ zur Strukturierung eines Prozessschrittes zu verwenden (diese empfohlene rekursive Verwendung des verkürzten MVM ist in Abbildung 4-3 jeweils mit „R“ markiert).

Auch eine Division findet beim 4-Phasenmodell Anwendung. So wurde die Analysephase, um der Erkenntnis Rechnung zu tragen, dass es sich bei der vorliegenden Thematik um ein soziotechnisches Problem handelt, in die beiden Bereiche TECHNIK und ORGANISATION aufgeteilt. Bei der Analyse zu diesen beiden Schwerpunkten ist eine weitere Eigenschaft des MVM von Vorteil. Die fließenden Übergänge der einzelnen Elemente, repräsentiert durch die überschneidenden Kreise im MVM, verdeutlichen, dass eine strikte Trennung der Elemente nicht zwingend erforderlich ist. Es ist vielmehr häufig der Fall, dass die Bearbeitung eines Elementes direkt in die des nächsten übergeht.

Abbildung 4-3 verdeutlicht den oben beschriebenen Zusammenhang zwischen MVM-Elementen und 4-Phasenmodell-Bausteinen sowie die Anwendung der beschriebenen Eigenschaften des MVMs (Flexibilität, Rekursion und Überlappung der Elemente). Der Standardweg durch das MVM wird durch die Nummerierung 1-7 dargestellt.

³⁸ Klare Zielsetzung: Verglichen mit den typischen Anwendungen des MVM, wie z.B. Neuentwicklungen, sind die Zielvorgaben bei einer derartigen Einführungsaufgabe sehr konkret und der Lösungsraum sowie die Randbedingungen stark begrenzt.

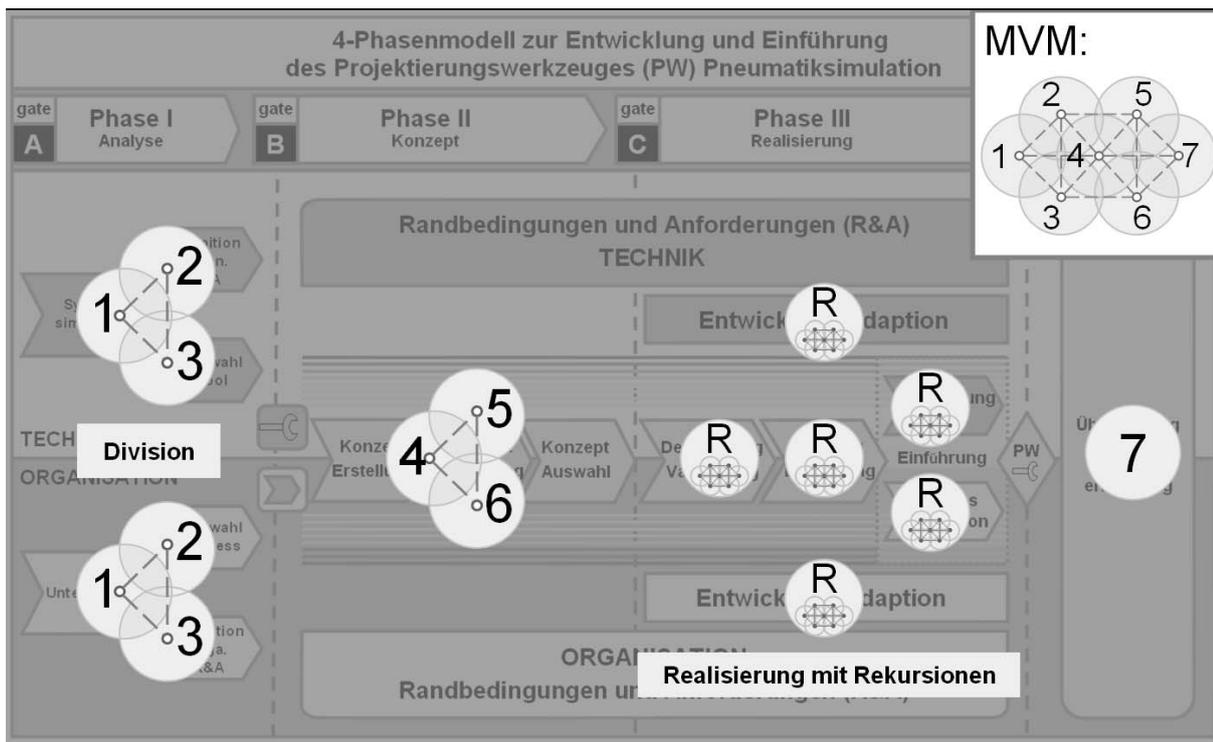


Abbildung 4-3: Zusammenhang zwischen 4-Phasenmodell und dem MVM

Ausgangspunkt des 4-Phasenmodells ist das allgemein formulierte Ziel „Einführung numerischer Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug“. Dieses Ziel muss für das *gate A – Kick off* anwendungsspezifisch angepasst werden. Damit die Zielinhalte später bei der Überprüfung als Kriterium anwendbar sind, sollten Sie dementsprechend formuliert werden. Als Beispiel für Hilfsmittel zur Unterstützung der Zieldefinition kann die Methode SMART³⁹ herangezogen werden.

In der Analysephase lassen sich die Elemente 1 „Ziel planen“, 2 „Ziel analysieren“ und 3 „Problem strukturieren“ den 4-Phasenmodell-Bausteinen nicht eindeutig zuordnen, da die Analysebausteine *Systemsimulation* und *Unternehmen* wiederum dividiert und iterativ bearbeitet werden. Vereinfacht kann man „Ziel planen“ mit diesen beiden grundsätzlichen Analyseblöcken in Einklang bringen. Die Bausteine *Definition der Rahmenbedingungen und der Anforderungen* für TECHNIK und ORGANISATION sowie *Toolauswahl* und *Ziel im Prozess* werden erneut dividiert und stellen jeweils die Inhalte der MVM-Elemente „Ziel analysieren“ und „Problem strukturieren“ dar. Hier wird explizit die oben erwähnte Rekursion mit verkürztem MVM empfohlen, da sich diese geschlossenen Fragestellungen damit einfach bearbeiten lassen.

In der Konzeptphase (II) wird der Standardweg des Münchner Vorgehensmodells verwendet. Dabei werden die Elemente 4 „Lösungsideen ermitteln“, 5 „Eigenschaften ermitteln“ und 6 „Entscheidungen herbeiführen“ linear für die Konzepterstellung, Bewertung und Auswahl

³⁹ SMART bedeutet „Specific Measurable Achievable Relevant Timely“ und dient als Abkürzung für die wesentlichen Eigenschaften, die ein gut formuliertes Ziel beschreiben (DRUCKER 2007).

und ORGANISATION, wohingegen die Konzept- und die Realisierungsphase diese Bereiche zusammen in einem Unterkapitel als Grenzen für die jeweiligen Kernprozesse behandeln und die Konzepterstellung bzw. die Umsetzung des Projektierungswerkzeuges fokussieren.

4.2 Phase I – Analyse

Die detaillierte Beschreibung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik beginnt mit der Vorstellung der Analysephase und betrachtet dabei die beiden Hauptbereiche des Modells TECHNIK und ORGANISATION.

Bevor damit begonnen werden kann, muss das *gate A – Kick off* durchschritten worden sein. Hierzu sind folgende Grundvoraussetzungen erforderlich: Das Ziel, ein Projektierungswerkzeug auf Basis von Pneumatiksimulation zu entwickeln und einzuführen, um damit die Qualität und Wirtschaftlichkeit dieses Prozesses und seiner Ergebnisse signifikant zu steigern, ist bezogen auf die Unternehmensspezifika präzisiert. Hierzu ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit ersten Grobschätzungen zu möglichen Potentialen und erforderlichem Aufwand vorhanden⁴⁰. Ein rudimentärer Projektplan, welcher die *gates B bis E* als Grundstruktur verwendet, ist erarbeitet worden. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, kann ein interdisziplinäres Projektteam gebildet werden und im Rahmen des *gate A – Kick off* der Eintritt in die Analysephase beschlossen werden.

AMBROSY (1997) weist im Rahmen seiner Betrachtungen zur Einführung von Methoden und Werkzeugen der integrierten Produktentwicklung auf die oftmals ungenügende Auswahl und Adaption dieser Methoden hin und verweist dabei auf die Bedeutung einer detaillierten Situationsanalyse. Diese Bedeutung erkennend wurde im 4-Phasenmodell das Thema Analyse der vorliegenden Situation mit einer eigenen Phase entsprechend berücksichtigt. Die Analysephase (Phase I) erarbeitet die Grundlagen für die Einführung der numerischen Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug.

4.2.1 Analyse im Bereich Technik

In der oberen Hälfte des 4-Phasenmodells, welche den Bereich TECHNIK repräsentiert, steht zu Beginn der Analyseblock Systemsimulation. Unter diesem Thema sind vier Schwerpunkte vereint, die für die Betrachtung der TECHNIK von großer Bedeutung sind. Die folgende Abbildung zeigt den Analyseblock mit den vier Aspekten *Systeme*, *Potentiale*, welche das Objekt der Systemsimulation sind, sowie *Simulationsansatz* und *Simulationswerkzeuge*, welche sich auf das Subjekt Werkzeug beziehen.

Für den Erfolg der Einführung ist es entscheidend, die aufgeführten Kernthemen entsprechend der jeweils eigenen Relevanz für die Gesamtaufgabenstellung zu analysieren. Welches die

⁴⁰ Diese Wirtschaftlichkeitsrechnung muss nur so genau sein, dass sich damit der Aufwand innerhalb der Analysephase rechtfertigen lässt. Als Ergebnis dieser Phase folgt die eigentliche Kosten-Nutzen-Rechnung im *gate B – Potentialbewertung*.

entscheidenden Aspekte sind und wie diese zu analysieren sind, zeigen die folgenden Erläuterungen:

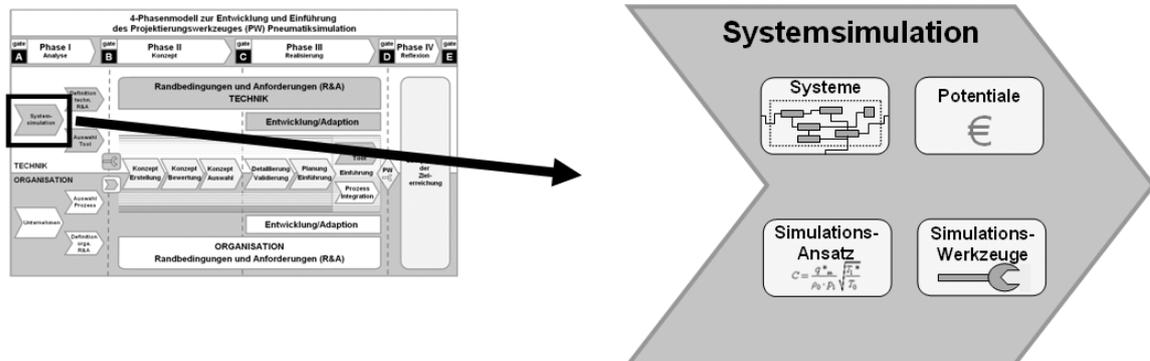


Abbildung 4-5: Analyseschwerpunkte im Bereich TECHNIK

Systeme (Objekt der Projektierung)

Der Schwerpunkt *Systeme* beschäftigt sich mit dem Objekt der Projektierung aus rein technischer Sicht. Um die anderen Schwerpunkte bearbeiten zu können, ist es entscheidend, die pneumatischen Systeme, welche im Rahmen der Projektierung auszulegen sind, zu kennen. Fragen, die während dieser Analyse beantwortet werden können, sind unter anderem folgende: Wie sind die Systeme beschaffen (Grenzen, Elemente, Verbindungen, Dynamik)? Welche Ausprägungen haben sie (Varianten...)? Welches sind die für die Projektierung relevanten Parameter? Ergebnis der Untersuchung kann dann eine Zergliederung dieser Systeme in ihre Elemente, die Teilsysteme und Komponenten sein. Gepaart mit Kenntnissen über Relationen, Systemdynamik und Details der Elemente bildet das die Grundlage für die angestrebte Systemsimulation als Basis des Projektierungswerkzeuges.

Potential

Der zweite Block beinhaltet als Analyseziel eine *Potentialabschätzung*. Primär wird hier geklärt, welche technische und kommerzielle Verbesserung durch effizienter (oder effektiver) projektierte Systeme zu erreichen ist. Dabei handelt es sich um positive Effekte, wie z.B. einen möglicherweise reduzierten Einmalaufwand während der Systemauslegung im Rahmen der Projektierung oder auch technische oder kommerzielle Vorteile durch optimierte Systeme. Vor Einführung der numerischen Simulation sind derartige Effekte zu quantifizieren, als mögliches Ratio auszuweisen und dem Aufwand für Einführung und spätere Pflege des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation gegenüberzustellen. Dieser Vergleich kann die Basis für die Entscheidung zum Start der Einführung sein, wenn eine rein wirtschaftliche Betrachtung gefordert ist. Nebeneffekte, wie z.B. Know-how-Aufbau innerhalb des Unternehmens sind in der Regel eher für die grundsätzliche Tooleinführung relevant, spielen aber bei der Beurteilung des Einsatzes als Projektierungswerkzeug eine untergeordnete Rolle. Derartige Fragestellungen werden nach Abschluss der Analysephase im Rahmen des *gate B – Potentialbewertung* diskutiert. Unterstützende Methoden können hier Prognosetechnik, Szenariotechnik, Stärken-Schwächen-Analysen, Kostenstrukturen, Anforderungslisten etc. sein.

Simulationsansatz

Die weiteren beiden Schwerpunkte im Rahmen der Analyse im Bereich TECHNIK fokussieren die numerische Simulation pneumatischer Systeme.

Der erste dieser Themenblöcke beschäftigt sich mit dem Stand der Technik zur Systemsimulation. Zusammengefasst unter der Überschrift *Simulationsansatz* werden dabei Modellierungs-, Berechnungs-, sowie allgemeine Simulationsansätze als Grundlage der Pneumatiksimulation diskutiert. Hierbei ist es wichtig, herauszufinden, welche Ansätze durch Forschung und Wissenschaft sowie durch Praxisanwender und Simulationssoftwarehersteller bereits genauer untersucht und vorangetrieben wurden. Darauf aufbauend kann die Verknüpfung einer Simulationslösung mit den oben untersuchten Systemen erfolgen.

Simulationswerkzeuge

Parallel dazu widmet sich das Themenfeld *Simulationswerkzeuge* im Wesentlichen mit den zur Verfügung stehenden Softwarelösungen. Dabei müssen frei zugängliche und käufliche Konzepte zusammengetragen und mit Hilfe der Erkenntnisse aus dem Stand der Technik und der Systemanalyse untersucht werden. Diese beiden Themenblöcke sollten in jedem Fall parallel erarbeitet werden, da die jeweils analysierten Softwarelösungen durchaus helfen, den Stand der Technik zu vervollständigen. Letztlich bilden die Ergebnisse beider Blöcke die Grundlage der Entscheidung zwischen einem am Markt verfügbaren Tool und einer Eigenentwicklung.

Ergebnisse der Analysen im Bereich TECHNIK

Der Analyseblock im Bereich TECHNIK als erstes Element der oberen Hälfte des 4-Phasenmodells stößt innerhalb der Phase I die nächsten Schritte an. Dazu zählt zunächst die Definition der technischen Randbedingungen und Anforderungen für die folgenden Phasen der Konzeptfindung und Umsetzung. Die hier definierten technischen Randbedingungen und Anforderungen bilden den Rahmen für Entwicklung und Einführung des Projektierungswerkzeuges. Dies ist erforderlich, um konsequent das Ziel, die erfolgreiche Einführung der Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug, zu verfolgen.

Im Rahmen der Einführung numerischer Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug sind mehrere schwierige Aufgaben gleichzeitig zu lösen. So ist grundsätzlich bereits die Einführung eines Werkzeuges eine Herausforderung (vgl. Kapitel 2), welche dadurch, dass dieses Projektierungswerkzeuges zusätzlich zunächst entwickelt werden muss, ungleich komplexer wird. Dazu kommt die Systemsimulation als sehr anspruchsvolles Themengebiet. Um bei der Lösungsfindung möglichst zielgerichtet vorzugehen und sie damit zu vereinfachen, ist es sinnvoll, bereits vor der Konzepterstellung die Grundauswahl für das Simulationswerkzeug zu treffen und damit die Basis für das Projektierungswerkzeug zu definieren.

Gerade die Untersuchungen zum Stand der Technik und zu den zur Verfügung stehenden Simulationsprogrammen sind für die *Toolauswahl* sehr wichtig. Diese sind gemeinsam mit der Analyse der betroffenen projektierten Systeme zu verwenden, um eine geeignete Berech-

nungslösung (Individual- oder Standardlösung) auszuwählen, welche die Basis für das Projektierungswerkzeug sein kann.

Für die betroffenen Unternehmen des Anlagenbaus ist es in der Regel unwirtschaftlich, Simulationsprogramme, welche zur Systemauslegung im Projektierungsprozess verwendet werden können, selbst zu entwickeln, da die Ressourcen hierzu meist nicht vorhanden sind und auch die später erforderliche Wartung eine nicht zu unterschätzende, zusätzliche Belastung darstellt. Dazu kommt, dass sich die verfügbaren käuflichen Lösungen durch sehr hohe Qualität auszeichnen, welche mit einer selbst entwickelten Lösung in der Regel nicht zu erreichen ist. Bereits die Adaption einer verfügbaren Lösung und die zusätzlich erforderliche Pflege des daraus entstandenen Projektierungswerkzeuges können als aufwändig eingeschätzt werden. Diese Annahme bestätigte sich auch während der Fallstudie. Die Nachteile einer Individuelllösung überwiegen den Vorteil der einfacheren Anpassung an die Aufgabe als Projektierungswerkzeug in den meisten Fällen deutlich. Letztlich führt das Abwägen zwischen Vor- und Nachteilen in den meisten Fällen dazu, dass die Entscheidung auf ein am Markt verfügbares Simulationsprogramm fällt, wenn nicht bereits im Vorfeld eigene Berechnungsprogramme entwickelt wurden, die verwendet werden können. Diese Vorüberlegungen und die daraus folgende Entscheidung für die Simulationslösung (Individual- oder Standardlösung) fließen gemeinsam mit den Randbedingungen und Anforderungen in die Diskussionen zum *gate B - Potentialbewertung* ein, um dort mit den Ergebnissen des Bereiches ORGANISATION zusammengeführt zu werden.

4.2.2 Der Bereich Organisation

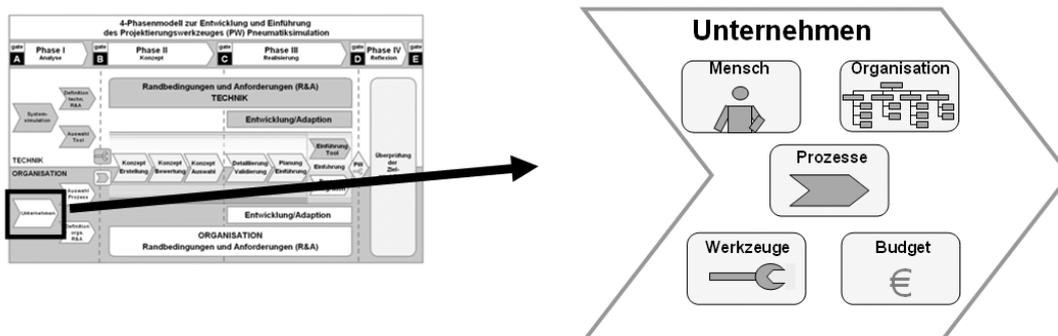


Abbildung 4-6: 5 Aspekte des Analyseblocks Unternehmen

Auch im Bereich ORGANISATION des 4-Phasenmodells beginnt die Phase I mit einem Analyseblock. Dieser trägt die Überschrift *Unternehmen* und befasst sich mit diversen Fragestellungen, die sich mit dem Unternehmen als Umfeld der Projektierung und Ort der Einführungsaufgabe auseinandersetzen. Für eine umfassende Betrachtung wurden fünf Hauptaspekte erarbeitet, die im Zuge der Einführung der Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug besondere Aufmerksamkeit erfordern. Abbildung 4-6 zeigt diese fünf Schwerpunktthemen.

Prozesse

An erster Stelle sind der zu unterstützende Prozess bzw. die betroffenen *Prozesse* zu nennen, weshalb diese durch die zentrale Anordnung in der Darstellung hervorgehoben wurden. Es muss zunächst die Prozesslandschaft des Unternehmens dargestellt werden, um dann den Projektierungsprozess zu analysieren. Zur Abbildung der Prozesse werden in der Regel Flussdiagramme verwendet. So lassen sich z.B. UML-Darstellungen oder ereignisorientierte Prozessketten (EPK) verwenden. Bei den durch diese Arbeit angesprochenen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus kann dies in den meisten Fällen auf der Grundlage vorhandener Prozessmodelle und Beschreibungen erfolgen. Auf dieser Basis ist es verhältnismäßig einfach einen Überblick über den Soll-Prozess zu bekommen, da sich auf Basis der Prozessbeschreibungen zumindest die theoretische Darstellung der Prozesse und die Einbettung der Projektierung in die Angebotsabläufe ableiten lässt. Es ist darüber hinaus unerlässlich zu untersuchen, ob diese festgeschriebenen Prozesse im Unternehmen tatsächlich Anwendung finden. Hierbei können Analysetechniken z.B. aus dem Bereich kontinuierliche Verbesserungsprozesse hilfreich sein. Ist dies nicht der Fall, so ist in der Folge abzuklären, wie die Realität sich, bezogen auf die Projektierung und die für die Projektierung relevanten anderen Prozesse und Abläufe, darstellt. Dies kann als ungleich schwerere Aufgabe angesehen werden, der man sich in Form von strukturierten interdisziplinären Prozessworkshops nähern sollte.

Mensch

Die hier angestellten Überlegungen führen zwangsläufig zum nächsten Schlüssel-Aspekt. Unter der Überschrift *Mensch* steht zunächst der Nutzer des Projektierungswerkzeuges im Fokus. Da viele Einführungsprojekte daran scheitern, dass der Aspekt Mensch vernachlässigt wird, ergibt sich eine hohe Bedeutung (vgl. Kapitel 2.1.2). So muss der Nutzer in seiner Funktion im Unternehmen und seiner Stellung in der Prozesswelt analysiert werden, um ein Werkzeug zu entwickeln, welches seinen Anforderungen genügt. Ziel dieser Analyse muss es sein, alle Personen genau zu kennen, die Berührungspunkte zum Projektierungswerkzeug haben. Vorrangig sind dadurch die Angebots-, System- und Entwicklungsverantwortlichen, sowie betroffene Sachbearbeiter sowohl in der Projektierung als auch in den technischen Bereichen im Zentrum der Analyse. Darüber hinaus sind alle weiteren Mitarbeiter, die in irgendeiner Form durch die Projektierung tangiert werden, zu berücksichtigen. Dabei geht es um ihre Rolle im Bezug auf den Projektierungsprozess, bzw. auf die Tätigkeiten, die sie in diesem Rahmen ausführen. Die persönliche Analyse der Mitarbeiter ist besonders für die spätere Einführung relevant und dort, wie eingangs erwähnt, zu beachten, um Widerstände zu vermeiden und Motivation zu schaffen. Letztlich kann an dieser Stelle auch darüber nachgedacht werden, welche bislang nicht involvierten Bereiche, zukünftig potentiell eine Rolle im Projektierungsprozess spielen könnten. Außerdem muss eruiert werden, ob auch Firmenexterne in den späteren Phasen hinzugezogen werden könnten. Als Beispiele sind externe Dienstleister zu nennen, die die Pflege eines Projektierungstools übernehmen könnten.

Organisation

Als weiterer wichtiger Aspekt muss die *Organisation* selbst untersucht werden. Hierbei ist gerade die Verknüpfung zwischen Organisationsstruktur und Unternehmensprozessen mit

Fokus auf den Projektierungsprozess wichtig. Zusätzlich sind die im Vorfeld behandelten Personen und Rollen in diesen Strukturen zu orten. Es muss zu Beginn der Konzeptphase (Phase II) ermittelt sein, welche Bereiche mit in der Konzeptphase betrachtet werden müssen, weil sie zumindest in Teilen von einem Projektierungswerkzeug betroffen sein könnten. Außerdem erscheint es sinnvoll zu sein, bereits unveränderbare Aspekte festzuhalten (z.B. eine Verneinung externer Unterstützung oder vorab festgelegte Verantwortlichkeiten).

Werkzeuge

Als vierter Aspekt sind die bislang verwendeten *Werkzeuge* im Rahmen der Projektierung zu analysieren. Hier gilt es Lücken oder Schwachpunkte, bezogen auf das Ergebnis des Projektierungsprozesses bzw. den Prozess selbst, zu ermitteln, die durch die numerische Simulation pneumatischer Systeme beseitigt werden können. Darüber hinaus ist ein erwünschtes Ergebnis der Analyse die Darstellung der Verknüpfungspunkte (z.B. Datentransfer) zwischen den bestehenden Werkzeugen und Hilfsmitteln und dem neuen Projektierungswerkzeug, oder auch die mögliche Verwendung von vorhandenen und bislang nicht zur Projektierung verwendeten Werkzeugen.

Budget

Der letzte Aspekt des Analyseblocks zum Unternehmen ist das *Budget*. Es ist zu Beginn festzulegen, welches Budget für das Projektierungswerkzeug zur Verfügung steht. Dabei sind zwei Punkte getrennt voneinander abzuschätzen. Das sind zum einen die finanziellen Mittel und Ressourcen als Einmalaufwand für Beschaffung und Installation des Softwaretools (falls dieses Softwaretool beschafft werden muss), für die Anpassung dessen in ein Projektierungswerkzeug und letztlich für die eigentliche Einführung. Zum anderen muss geklärt werden, welche laufenden Kosten für die Pflege des Projektierungstools bzw. die Softwarewartung (vollständig zu bewerten bei alleiniger Nutzung zu Projektierungszwecken – anteilig bei Nutzung auch in anderen Bereichen wie z.B. der Komponentenentwicklung) zur Verfügung steht. Diese Investitionen müssen mit den oben erwähnten Potentialen aus dem technischen Teil der Analyse im Rahmen des *gate B - Potentialbewertung* abgeglichen werden. Ein hoher Unschärfegrad ist hier zwar zu erwarten, da beide Bereiche sich nur schwer quantifizieren lassen. Dies sollte aber nicht davor abschrecken, mit Hilfe einer Kosten-Nutzen-Betrachtung die Entscheidung zur Durchschreitung des Phasenübergangs zur anschließenden Konzeptphase zu treffen, und das Budget für das Projektierungswerkzeug und dessen Einführung freizugeben.

Ergebnisse der Analyse im Bereich ORGANISATION

Auch der Analyseprozess zum Unternehmen auf der organisatorischen Seite des 4-Phasenmodells stößt zum Ende der Phase I zwei Folgeschritte an. Im Besonderen ermöglichen es die Prozessanalysen, dass im nächsten Schritt die Ansatzpunkte in der Prozesslandschaft herausgearbeitet werden, an welchen das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation eingesetzt werden kann. Der hierzu notwendige Schritt im 4-Phasenmodell ist die Auswahl der Prozessanker im Element *Auswahl Prozess*.

Ebenso wie auf der technischen Seite ist es auch für die organisatorische Seite entscheidend *Randbedingungen und Anforderungen* zu definieren, welche die Folgephasen sinnvoll ein-

grenzen. Die Begründung deckt sich mit den Ausführungen zu technischen Randbedingungen und Anforderungen.

4.2.3 gate B - Potentialbewertung

Zum Ende der Phase I des 4-Phasenmodells sind technische und organisatorische Randbedingungen und Anforderungen an das zu entwickelnde und einzuführende Projektierungswerkzeug definiert. Während der folgenden Entwicklung und der darauf folgenden Einführung des Projektierungswerkzeuges sind die Wechselwirkungen beider Bereiche stets zu berücksichtigen. Sie bilden damit den Rahmen der Entwicklung und beeinflussen sich dabei gegenseitig. Außerdem wurden die Prozesse Toolauswahl und Zielprozessdefinition durchgeführt, so dass die Grundlagen für die Konzeptphase gegeben sind.

Im Rahmen des Phasenübergangs *gate B - Potentialbewertung* kann entschieden werden, ob die Entwicklung und Einführung des Projektierungswerkzeuges gestartet wird. Dies erfolgt, wie oben bereits erwähnt, unter Berücksichtigung aller bis dato erarbeiteten Aspekte. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei auf die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Potentialanalyse auf der einen und den ermittelten Aufwendungen als Ergebnis der Budgetdiskussion auf der anderen Seite gerichtet werden. Wenn das Budget sowohl für das Einführungsprojekt zur Verfügung steht und auch die spätere Nutzung finanzierbar erscheint, sowie ein dazu relativer Gewinn durch die Potentialanalyse angezeigt ist, ist abschließend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Phasenübergang durchzuführen.

Bei dieser Potentialbewertung wird wie bei jeder anderen Aufwand/Nutzen- bzw. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgegangen. Eine Gegenüberstellung des laufenden Aufwandes (für Nutzung des Projektierungswerkzeuges während der Projektierung sowie dessen Pflege und Weiterentwicklung) und des erzielbaren Nutzens (durch technisch und kommerziell optimierte Systeme sowie kürzere Projektierungszeiten und Aufwandsreduzierung in den Versuchsbereichen) bildet den Kern der Bewertung. Dabei sind alle Effekte nach Möglichkeit monetär zu bewerten. Der erzielbare Nutzen, abzüglich des Aufwandes, wird dann über der Zeit, gegen den Initialaufwand gerechnet. Damit wird ermittelt, ab welchem Zeitpunkt die Verwendung des Projektierungswerkzeuges rentabel erfolgt. Dieses Ergebnis bildet unter Berücksichtigung der gegebenen Unschärfe die Grundlage für die Entscheidung zum Eintritt in die nächste Phase. Weiche Faktoren, die sich schwer monetär bewerten lassen, wie z.B. die Weiterbildung der Mitarbeiter und daraus folgende Motivationsmöglichkeiten müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

4.3 Phase II – Konzept

Die Konzeptphase wird flankiert durch die Randbedingungen und Anforderungen der Bereiche TECHNIK und ORGANISATION. Im Kern wird das Konzept des Projektierungswerkzeuges in seiner Gesamtheit, Werkzeug und Prozessintegration, erarbeitet.

4.3.1 Technik und Organisation als Rahmen der Konzeptphase

Sowohl die Konzept-, als auch die Realisierungsphase werden durch Randbedingungen und Anforderungen aus den Bereichen TECHNIK und ORGANISATION (Leitplanken der Entwicklung und Einführung) begrenzt. Sie bilden die festen Bezugsgrößen für die dazwischen liegenden Prozessschritte. Zu Beginn der Phase II stehen noch nicht alle Anforderungen und Randbedingungen vollständig und endgültig fest, da durch die Konzeptentwicklung weitere Aspekte hinzukommen werden. Daher muss in Phase II auf diese beiden Seitenstränge Einfluss genommen werden. Die Aufgabe der beiden Entwicklungsleitplanken ist es somit, das Vorgehen dahingehend zu kanalisieren, dass die Einführung möglichst zielgerichtet verläuft. Es ist an dieser Stelle außerdem wichtig zu erwähnen, dass sie auch über den Phasenübergang *gate C - Konzeptfreigabe* hinweg stetig weiter detailliert und gegebenenfalls angepasst werden müssen.

Für beide Seiten gilt, dass die Inhalte größtenteils auf Basis der Analysen aus Phase I definiert werden. Im Folgenden dienen einige Beispiele dazu, ein besseres Verständnis für die Begrenzungsbereiche zu schaffen und somit die Anwendung des 4-Phasenmodells zu erleichtern.

Auf der technischen Seite werden gegebenenfalls Restriktionen für die als Basis der Simulation zu verwendende Datenstruktur definiert, die sich auf Grund der ermittelten Systembeschaffenheit als sinnvoll herausgestellt haben. Diese Vorgaben sind selbstverständlich bei einer Weiterentwicklung des Produktportfolios des Unternehmens zu erweitern und anzupassen. Weiter können Möglichkeiten zur Pflege des Projektierungstools oder eingeschränkte Nutzerrechte zur Abbildung unterschiedlicher Rollen als Anforderungsbeispiele genannt werden. Randbedingungen können bestimmte Systemstrukturen und Systemparameter sein, welche im Rahmen des Projektierungsprozesses zu variieren sind. Auch andere Werkzeuge und Hilfsmittel, mit denen gegebenenfalls eine Vernetzung, bzw. an die möglicherweise eine Anbindung erforderlich ist, müssen als technische Randbedingung genannt werden.

Auf organisatorischer Seite sind als Randbedingungen vor allem die Organisationsstruktur und die Prozesslandschaft zu nennen. Beides bildet den Rahmen für den Einsatz eines Projektierungswerkzeuges. Als Anforderung aus organisatorischer Sicht ist die erforderliche Zuordnung der Rechte im Projektierungswerkzeug entsprechend noch zu definierender Rollen im Prozess zu nennen. Je nach Konzept kann auch die Art und Weise der Dokumentation vorgeschrieben werden. Weiter zählen die organisatorische Vernetzung und Anbindung an andere Werkzeuge und Hilfsmittel als Anforderung.

Darüber hinaus gibt es verschiedene Anforderungen an das Projektierungswerkzeug, welche sich aus dem Stand der Forschung und der Technik in Kapitel 2 ergeben und in Kapitel 3.2 als Anforderungskatalog zusammengefasst sind. Sie sind allgemein gültig für die hier diskutierten Projektierungswerkzeuge, deshalb müssen sie als Standard bei jeder Anwendung der Methodik in die Anforderungsliste übernommen werden. Es handelt sich dabei um folgende Anforderungspunkte: Aufwand/Nutzen-Relation, Standardisierung, Verfügbarkeit, Integration, Adaption, Verifikation & Validierung, Sekundäre Intelligenz und Simulationskenntnisse (Beschreibung siehe Kapitel 3.2).

4.3.2 Konzeptentwicklung und Auswahl als Kern der Konzeptphase

Den Kern der Phase II bildet die Konzepterstellung und –auswahl. Ausgangsbasis ist auf Seiten der TECHNIK das ausgewählte Simulationstool (Individual- und Standardlösung), auf welchem das Projektierungswerkzeug aufgesetzt werden soll. Hinzu kommen die oben beschriebenen technischen Randbedingungen und Anforderungen. Es ist für den Erfolg des Projektierungswerkzeuges sehr wichtig, dass es für seinen Einsatzzweck angepasst entwickelt wird. Damit auch Simulations-Laien das Werkzeug später verwenden können, ist in der Regel großer Adaption- und Entwicklungsaufwand erforderlich. Wie bereits erwähnt, ist das Risiko zu scheitern groß, wenn die Konzeptphase ohne vorherige Festlegung auf eine Simulationslösung (Berechnungsprogramm) startet, da die daraus resultierende Steigerung der Komplexität der Aufgabenstellung kaum beherrschbar ist. Nur in seltenen Fällen kann es dennoch sinnvoll sein, eine zweite Berechnungslösung alternativ in die Konzeptphase mitzuführen, wenn zu große Unklarheit über die Fähigkeiten der unterschiedlichen Lösungen besteht.

Aus organisatorischer Sicht startet die Konzeptphase mit der Definition der Ansatzpunkte im Angebotsprozess, an welchen das Projektierungswerkzeug in diesen eingreifen soll und an welchen es dafür andockt werden kann. Es muss bereits grob geklärt werden, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Form der Projektierungsprozess abläuft, und wann ein Einsatz des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation Sinn machen kann. Auf diesen Grundlagen kann die Konzeptphase bearbeitet werden.

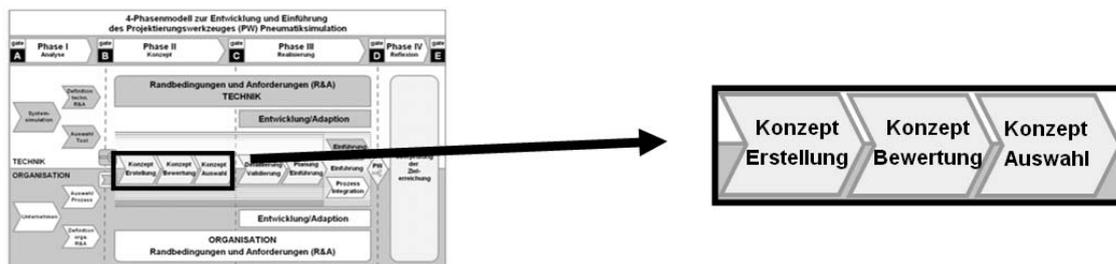


Abbildung 4-7: Darstellung des Kernprozesses in der Phase II - Konzepterstellung

Die Prozessdarstellung im 4-Phasenmodell mit drei aufeinander folgenden Schritten verdeutlicht den ablauforientierten Charakter, der Iterationen an explizit hervorgehobenen Stellen empfiehlt und sonst davon abrät. Die komplexe Aufgabenstellung dieser Einführung erfordert die Einschränkung des Lösungsraums, um den im industriellen Rahmen herrschenden Gegebenheiten gerecht zu werden. Dazu wird die Flexibilität im Münchner Vorgehensmodell aufgegeben und die theoretisch in jeder Reihenfolge durchführbaren Elemente entsprechend dem Standardweg durch das MVM im Ablauf linearisiert. Dieses Vorgehen ist der Nutzung des MVM in Krisensituationen ähnlich (LINDEMANN ET AL. 2007; KREIMEYER ET AL. 2007).

Bei diesem linearen Vorgehen wird, entsprechend dem Münchner Vorgehensmodell („Lösungsideen ermitteln“ und „Eigenschaften ermitteln“), während der *Konzepterstellung* die eigentliche Suche nach möglichen Lösungsansätzen und die Ermittlung und Aufbereitung der Eigenschaften dieser Lösungen verknüpft. So werden verschiedene Konzepte entwickelt, welche hohe Aussicht auf Erfolg haben, die numerische Simulation pneumatischer Systeme als effizientes Projektierungswerkzeug einzusetzen. Die bereits erwähnten industriellen Rahmen-

bedingungen fordern es gegebenenfalls ein, dass man sich dabei frühzeitig auf erfolgversprechende Lösungen fokussiert, was die Akzeptanz von weißen Feldern im Lösungsraum bedingt. Die Beschreibung der Konzepte und ihrer Eigenschaften muss derart gestaltet sein, dass Sie im Zuge der Auswahl miteinander verglichen werden können. Im Rahmen der beiden hier betrachteten Vorgehensbausteine wird deshalb grob definiert, in welcher Form die numerische Simulation pneumatischer Systeme eingesetzt werden soll, um die Systemauslegung im Rahmen des Projektierungsprozesses zu unterstützen. Dazu wird auch festgelegt, ob zusätzliche Rollen in der Organisation bezogen auf das neue Projektierungswerkzeug erforderlich sind, oder ob bestehende Rollen um neue Aufgaben und Kompetenzen zu erweitern sind. Hiervon kann in der Regel ausgegangen werden. Im Weiteren sind für das jeweilige Konzept die Schnittstellen zum Prozess definiert. So könnten beispielsweise die erforderlichen Simulationsrechnungen automatisch angestoßen werden, sobald ein System erstellt und für die Systemprüfung freigegeben wurde. Alternativ sind auch diverse Beauftragungsvarianten zur Berechnung möglich, die wiederum im Prozessablauf eingebettet werden müssen. Ähnlich verhält es sich bei der Verwertung der Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen. Die Verantwortlichkeiten zur Erstellung und Beurteilung der Ergebnisberichte sollten geklärt und definiert sein, da dies erheblichen Einfluss auf die spätere Verwendung und den damit verbundenen Aufwand an den betroffenen Stellen hat. Zusammenfassend kann man sagen, dass die jeweiligen Konzepte soweit detailliert sind, dass nach einer Entscheidung für eine der Lösungen in der Realisierungsphase mit der Ausarbeitung begonnen werden kann. Auch muss die Beschreibung derart genau sein, dass sie eine Beurteilung der Konsequenzen, die eine Umsetzung des jeweiligen Konzeptes mit sich führt, zulässt, um den Beginn der Realisierungsphase verantwortungsbewusst durchzuführen.

Die erwähnte Entscheidung für eines der erarbeiteten Konzepte erfolgt im Rahmen des Phasenbausteines *Konzeptauswahl* entsprechend dem MVM-Element „Entscheidungen herbeiführen“. Hierbei handelt es sich um den abschließenden Schritt der Konzeptphase im 4-Phasenmodell, welcher vor der *gate*-Entscheidung steht. Es wird somit zunächst lediglich ein Konzept ausgewählt, bevor die Entscheidung über die Umsetzung getroffen wird.

Eine Iteration wird in Phase II explizit empfohlen. Für den Fall, dass sich relativ viele Grobkonzepte ergeben, kann zur Einschränkung des Aufwandes eine Vorauswahl getroffen werden. Hierfür würde die Prozesskette zweimal durchlaufen, was bedeutet, dass nach der ersten Anwendung des Bausteins *Konzeptauswahl* die Detaillierung für die verbliebenen Konzepte in Form einer erneuten *Konzepterstellung* inklusive Eigenschaftsermittlung und anschließender Bewertung und Auswahl folgt. Diese Schleife wird, obwohl sie durchaus gewünscht ist, nicht im 4-Phasenmodell dargestellt, da dies den stringenten Charakter des Modells verwässern würde.

Aus der Beschreibung des Münchner Vorgehensmodells wurden für das Vorgehenselement *Konzepterstellung* folgende Methoden als besonders geeignet identifiziert: Brainstorming, Mindmap, morphologischer Kasten, Ordnungsschemata und diskursive Lösungssuche (nach WULF 2002). Speziell der Einsatz des morphologischen Kastens hilft bei der Schaffung einer erforderlichen Übersicht über die Konzepte. In einer abgewandelten Anwendung lassen sich mit Hilfe dieser Methode Eigenschaften unterschiedlicher Disziplinen und Betrachtungsweisen zusammenführen und damit sämtliche Facetten der unterschiedlichen Konzepte übersicht-

lich nebeneinander stellen. Gerade diese Darstellung aller relevanten Eigenschaften ermöglicht es, einen besseren Überblick von den erarbeiteten Konzepten zu bekommen. Darüber hinaus bietet das MVM weitere kreative oder systematische Methoden und Hilfsmittel, welche die Konzepterstellung unterstützen können, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Für die folgenden Prozessbausteine *Konzeptbewertung* und *Konzeptauswahl* eignen sich verschiedenste Bewertungsmethoden wie z.B. paarweiser Vergleich, gewichtete und ungewichtete Punktbewertung und Nutzwertanalyse. Unterstützend kann eine modifizierte FMEA⁴¹ hilfreich sein.

4.3.3 gate C - Konzeptfreigabe

Am Ende der Phase II steht ein Konzept zur Verfügung, welches den Ausgangspunkt für die Realisierungsphase darstellt. Dieses Konzept umfasst die wichtigsten Eigenschaften des zukünftigen Projektierungswerkzeuges auf Basis der ausgewählten Simulationssoftware und dokumentiert den Anpassungsaufwand zur Verknüpfung des Werkzeuges mit den vorhandenen Prozessen.

Im Rahmen des *gate C - Konzeptfreigabe* muss nun entschieden werden, ob in die Realisierungsphase gewechselt werden kann oder ob noch Verbesserungen erforderlich sind. Diese Entscheidung ist von großer Tragweite, da mit der Festlegung, ob das Konzept umgesetzt wird, neben der Planung der Einführung und ihrer Umsetzung auch die erforderlichen Entwicklungen und Anpassungen in den Bereichen TECHNIK und ORGANISATION angestoßen werden. Daraus ergibt sich, dass die Freigabe dieses *gates* die entscheidende Budgetfreigabe im Projekt ist. Entscheidend für das Weitergehen im Projekt ist die Beurteilung der Erfüllung der erarbeiteten Anforderungen in den gegebenen Randbedingungen.

4.4 Phase III – Realisierung

Ähnlich der Konzeptphase wird auch die Realisierungsphase durch die Randbedingungen und Anforderungen der Bereiche TECHNIK und ORGANISATION flankiert. In dieser Phase werden diese Randbereiche noch um die notwendigen Adaptionen bzw. Entwicklungen erweitert. Als Kern dazwischen steht die Umsetzung des Projektierungswerkzeuges bis hin zur Einführung in Form von *Tool-Einführung* (Seite TECHNIK) und *Prozessintegration* (Seite ORGANISATION).

⁴¹ FMEA = Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse.

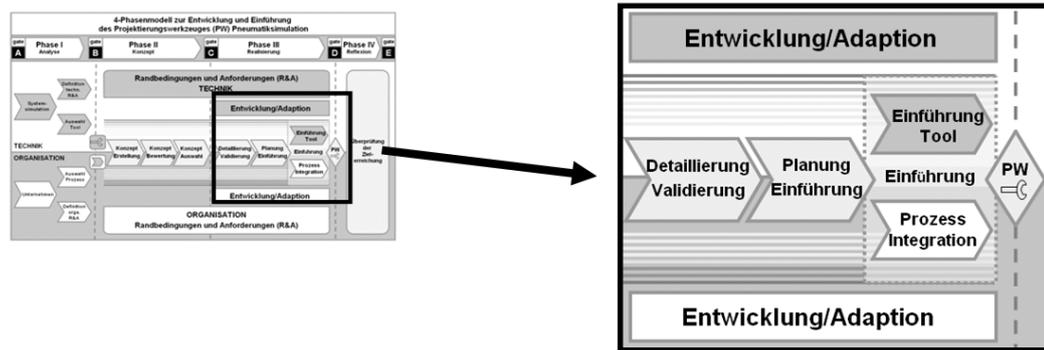


Abbildung 4-8: Realisierungsphase

4.4.1 Technik und Organisation als Rahmen der Realisierungsphase

Die beiden Begrenzungsbereiche führen ab Beginn der Realisierungsphase innerhalb der jeweiligen *Randbedingungen und Anforderungen* die *Entwicklung und Adaption* im Bereich TECHNIK und ORGANISATION.

So muss in der oberen Hälfte des Modells für den Bereich der TECHNIK als einer von zwei Schwerpunkten dieses Stranges die numerische Simulation pneumatischer Systeme soweit entwickelt werden, dass das Projektierungswerkzeug eine technische Basis erhält. Dies allein bedeutet eine große Herausforderung, wie der große Aufwand zur Entwicklung einer geeigneten Systemsimulation in der Fallstudie (Kapitel 5) zeigen wird. Für den Fall, dass die Einführung der numerischen Simulation pneumatischer Systeme nicht nur als Projektierungswerkzeug, sondern auch als Werkzeug der Entwicklung erfolgt, wird diese die Entwicklung der Systemsimulation bereits parallel zur Konzeptphase beginnen. Der zweite Schwerpunkt ist die technische Umsetzung des Projektierungswerkzeuges. Dieser ist in jedem Fall Bestandteil der Realisierungsphase und führt dort spätestens während der Einführung zu einer starken Interaktion zwischen dem Kern des 4-Phasenmodells und dem Bereich TECHNIK.

Auf Seiten der ORGANISATION müssen auf Basis der Ergebnisse der Unternehmensanalyse und der Konzeptentwicklung die Veränderungen organisatorisch umgesetzt werden. Die Möglichkeit, dass es erforderlich sein kann, völlig neue Rollen für den Projektierungsprozess in die Organisation zu integrieren, zeigt die Bedeutung des Phasenelementes *Entwicklung und Adaption* für diesen Bereich des Vorgehensmodells.

4.4.2 Realisierung des Projektierungswerkzeuges

Die Realisierungsphase teilt sich im Wesentlichen in drei Prozessbausteine, die dazu führen sollen, dass am Ende der Realisierungsphase die numerische Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug eingeführt ist. Diese Prozessschritte sind *Detaillierung und Validierung*, *Planung Einführung* und *Einführung des Projektierungswerkzeuges*.

Detaillierung und Validierung

Für die Einführung des Projektierungswerkzeuges ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Werkzeugkonzeption komplett ausgearbeitet ist, was erheblichen Aufwand für diesen Baustein des 4-Phasenmodells bedeutet. Es empfiehlt sich im Rahmen der *Detaillierung und Validierung* an dieser Stelle die Analyseergebnisse aus Phase I heranzuziehen, um zum einen alle Bereiche einzubeziehen, und zum anderen die vorliegenden Gegebenheiten und Randbedingungen vollständig zu berücksichtigen. Es besteht die Gefahr bei derartigen Fragestellungen, dass die technische Lösung an der Realität vorbei entwickelt wird. Um dies zu verhindern, sind stete Blicke auf das Unternehmen und eine vollständige inhaltliche Validierung gegen die Anforderungen erforderlich.

Aufgabe des Bausteins *Detaillierung und Validierung* ist es, den Aufbau, die Funktionsweise und die technische sowie organisatorische Integration des Projektierungswerkzeuges zu detaillieren und anschließend zu validieren. Dabei muss genau geklärt werden, wie die numerische Simulation pneumatischer Systeme eingesetzt wird, um die Systemauslegung im Rahmen des Projektierungsprozesses zu unterstützen. Im Zuge der Detaillierung und der Validierung gegen die Anforderungen unter Berücksichtigung der Randbedingungen sind stets beide Modellseiten (TECHNIK und ORGANISATION) aufeinander abzustimmen, da nur dann ein letztlich umfänglich funktionsfähiges Projektierungswerkzeug entstehen kann.

Ein gutes Beispiel für eine derartige Abstimmung ist folgende Abwägung zwischen zwei Optionen. Nach NIEDEREICHHOLZ & RESKE (2005, S. 80ff) müssen die Konsequenzen bei der im Kern stehenden Entscheidung ob Prozesse an die jeweilige Software angepasst werden oder ob die jeweilige Software an die vorhandenen Prozesse angepasst wird, unbedingt berücksichtigt werden. Sowohl die Prozessanpassung als auch Customizing von Software kann erheblichen Aufwand mit sich führen. Dies ist fallweise zu klären und einem strukturierten Entscheidungsprozess unter Zuhilfenahme üblicher Bewertungsmethoden wie Stärken-Schwächen-Analyse, Punktbewertungen usw. zu unterziehen.

Im erstgenannten Bereich TECHNIK wird im Rahmen der Ausarbeitung die Funktionsweise der Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug detailliert beschrieben. Dies umfasst sowohl die Simulation der Systeme selbst, als auch den Einsatz dieser Systemsimulation als Projektierungswerkzeug. Daraus kann man ableiten, inwieweit die Pneumatiksimulation im Rahmen des oben beschriebenen Bausteins *Ausarbeitung/Adaption Technik* entwickelt werden muss. Abhängig vom ausgewählten Werkzeug muss ausgearbeitet und dokumentiert werden, welche Systeme und Teilsysteme in welcher Form im Rahmen der Projektierung mittels Simulation untersucht werden können. Daraus wiederum leitet sich ab, in welchem Umfang Modelle (Elemente und Systeme) erstellt werden müssen. Bei einem theoretisch möglichen Projektierungswerkzeug mit sämtlichen Freiheitsgraden bezüglich des Systemaufbaus in der Simulationsumgebung entfällt diese Festlegung vollständig. Das als repräsentativ bewertete Anwendungsbeispiel im folgenden Kapitel zeigt jedoch, dass derartige Ausprägungen von Projektierungswerkzeugen nicht wahrscheinlich sind. Das liegt daran, dass entweder der Validierungsaufwand zur Erreichung verwertbarer Ergebnisse im Vorfeld extrem hoch wäre oder die Ergebnisse auf Grund fehlender Belastbarkeit im Projektierungsprozess keine Anwendung finden würden.

Letztlich müssen sämtliche für das Projektierungswerkzeug erforderlichen Anpassungen am ausgewählten Berechnungsprogramm in Form eines Pflichtenheftes spezifiziert werden. Die folgende Aufzählung nennt beispielhaft einige Anpassungen oder Erweiterungen, die entsprechend des ausgewählten Werkzeugansatzes spezifiziert werden müssen:

- Modellierungsumfang (Komponentenmodelle, Systemmodelle)
- Programmierung von Simulationsabfragen
- Definition der Simulationsabläufe
- Definition unterschiedlicher Zugriffsmöglichkeiten
- Modellierungsmöglichkeiten auf System oder Komponentenebene
- Definition der Parametereingabe (z. B. Wertebereiche)
- Erstellung der Ergebnisdokumentation
- Implementierung erforderlicher Datenbanken und Beschreibung ihrer Schnittstellen zur Simulationsumgebung.

Ein Thema, welches für die Detaillierung des Konzeptes aus technischer Sicht entscheidend ist, ist die Validierung der später im Projektierungsablauf generierten Ergebnisse. Es muss vor der Umsetzung des Konzeptes klar definiert werden, welche Aussagequalität mit dem Projektierungswerkzeug erzielt werden soll und in welcher Form die Absicherung der Ergebnisse erfolgt. Gerade der zweite Teil dieser Anforderung hat grundsätzlich unterschiedliche Ausprägungen zur Folge. Wenn im späteren Projektierungsprozess auf eine Ergebnisvalidierung gänzlich verzichtet werden soll, dann sind entweder große Einschränkungen bezüglich zu variierender Parameter oder eine große Anzahl an absichernden Voruntersuchungen erforderlich. Diese Effekte zeigen sich nicht, wenn zusätzliche Ergebnisprüfungen in den Ablauf der Projektierungswerkzeuganwendung eingeplant werden können.

Auch bezogen auf die Modellseite ORGANISATION muss das Konzept detailliert und umfassend beschrieben werden. Der Schwerpunkt hierbei liegt auf dem Themenfeld Unternehmensorganisation. So müssen im Zuge der Ausarbeitung die gegebenenfalls für den Einsatz des Projektierungswerkzeuges erforderlichen zusätzlichen Rollenaufgaben definiert werden. Dabei kann es sich um vollständig neu zu schaffende Rollen handeln oder um die Erweiterung von Aufgaben und Kompetenzen bestehender Rollen. In den meisten Fällen wird die Erweiterung zum Einsatz kommen. Bezüglich der Definition neuer, bzw. der Anpassung bestehender Rollen, sind häufig auch Aspekte technischer Natur betroffen. Dies bestätigt das oben erwähnte Erfordernis nach Abstimmung zwischen den beiden Bereichen TECHNIK und ORGANISATION. Folgende Fragen sind hierfür beispielhaft:

- Wer bereitet die Ergebnisse auf und dokumentiert sie? Gestaltung der Dokumentation?
- Wer prüft und verifiziert Ergebnisse?
- Wer interpretiert die Ergebnisse und trägt Verantwortung?
- Wer verantwortet das Simulationswerkzeug bezogen auf Entwicklung und Pflege?
- Durch wen und wie wird die Simulation im Projektierungsprozess initiiert?

Gerade die letzte Frage lenkt das Augenmerk auf den nächsten Punkt, welcher im Rahmen der Detaillierung und Validierung definiert werden muss: Die Beschreibung, welche Schnittstellen es zwischen dem Projektierungswerkzeug und dem Projektierungsprozess gibt. Die automatische Initiierung von Simulationsrechnungen wurde bereits als Beispiel genannt. Alternativ sind auch diverse andere Beauftragungen oder Auslöser zur Berechnung möglich, die wiederum im Prozessablauf eingebettet werden müssten.

An dieser Stelle ist außerdem zu klären, in welcher Form die Verwendung des Projektierungswerkzeuges erfolgen soll. Wird ein verpflichtender Einsatz dieses Werkzeug an bestimmten Prozessstellen zukünftig vorgeschrieben oder kann es freiwillig bei Bedarf herangezogen werden. Zwischenstufen sind selbstverständlich denkbar.

Den Abschluss bildet die Validierung gegen die Anforderungen, um vor Planung der Einführung sicherzustellen, dass mit dem Projektierungswerkzeug die definierten Anforderungen in den gegebenen Randbedingungen erfüllt werden.

Einführung planen

Mit dem ausdetaillierten Projektierungswerkzeug kann im Vorgehensschritt *Planung Einführung* die Einführung vorbereitet werden. In Kapitel 2 wurden Hinweise darauf gegeben, wie vielfältig die Problematik von Einführungsprojekten ist und dass darauf zu achten ist, dass der vorangehenden Planung besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird. Bei diesem Schritt im 4-Phasenmodell lässt sich erneut der Kern des Münchner Vorgehensmodells anwenden. Somit müsste zunächst definiert werden, welche Anforderungen an die Einführung gestellt werden. Diese lassen sich in erster Linie aus dem ausgearbeiteten Konzept des Projektierungswerkzeugeinsatzes und den bekannten Anforderungen aus den Leitplanken des Modells ableiten. Zusammen müssen sie auf die beiden Einführungsschwerpunkte *Tooleinführung* (Bereich TECHNIK) und *Prozessintegration* (Bereich ORGANISATION) ausgerichtet werden. Im nächsten Schritt gilt es einen sinnvollen Einführungsansatz auszuwählen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Anwendung des 4-Phasenmodells eine Empfehlung zur Vorgehensweise während der Einführung festgelegt. Diese orientiert sich am Ansatz von BESKOW ET AL. (1999) und wird auch während der Fallstudie Anwendung finden. Sein Modell zur Einführung der Methode „House of Quality“ in ein Unternehmen wurde um einen Prototypenversuch erweitert, der die Erfolgsaussichten der Einführung zeigt und die Möglichkeit zur Nachbesserung und Korrektur ergibt (Abbildung 4-9). So lässt sich das Gesamtrisiko für die Einführung reduzieren.

Dazu ist zu erwähnen, dass sich neben der Planung auch die beiden anderen Einführungsschritte nach BESKOW ET AL. (1999) im 4-Phasenmodell wiederfinden. Implementierung entspricht der *Einführung des Projektierungswerkzeuges* und die Evaluation wird durch die *Reflexion* in Phase IV abgebildet.

Grundsätzlich bietet sich eine stufenweise Einführung an, da dabei die Integration der späteren Nutzer leichter erfolgen kann. Diese haben neben gegebenenfalls optionaler Beteiligung an der Entwicklung des Projektierungswerkzeuges in größerer Anzahl die Möglichkeit während Pilotanwendungen, Prototypen und stufenweiser Einführung Einfluss auf die Ausgestaltung zu nehmen als dies bei einer schlagartigen Einführung der Fall wäre. Vor allem diese Möglichkeit zur Beeinflussung führt zu erheblicher Akzeptanzsteigerung und signifikanter

Qualitätsverbesserung des Werkzeuges. Dadurch wird das Risiko einer kompletten Fehlentwicklung zurückgedrängt.

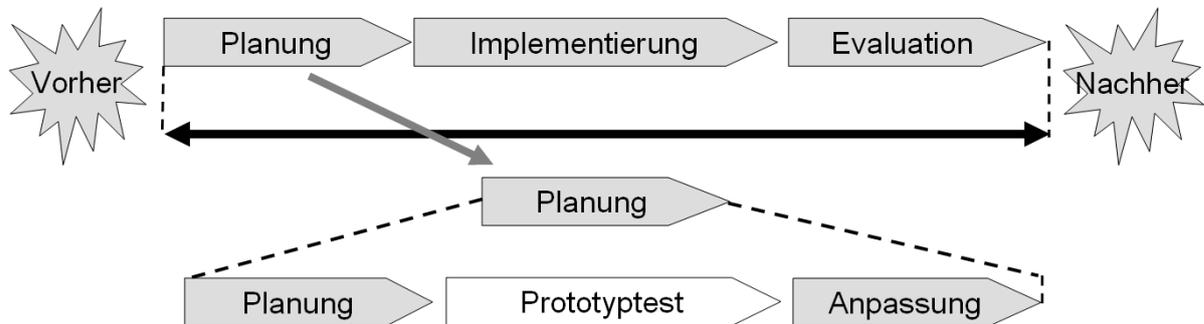


Abbildung 4-9: Durch Prototypentest erweiterter Einführungsablauf nach BESKOW ET AL. (1999)

Der Prototypentest (siehe oben) kann dabei als erste Stufe angesehen werden, auf welche mindestens eine weitere Stufe, die tatsächliche Einführung des Werkzeuges in den Projektierungsprozess, folgt. Es können aber auch weitere Abstufungen sinnvoll sein, wenn z.B. zunächst nur eine von mehreren Anwendungen des Werkzeuges eingeführt wird. Durch die Stufung der Einführung wird eine Verteilung des Aufwandes erreicht, der Kapazitätsengpässe vermeidet und die Einführung leichter planbar macht.

Selbstverständlich sind auch andere Einführungsansätze aus Kapitel 2 denkbar, wobei stets bedacht werden muss, dass der Erfolg der Einführung nicht allein von der Auswahl der Entwicklungs- und Einführungsmethodik abhängt. Als einfaches Hilfsmittel zur Beurteilung der Erfolgsaussichten kann bei den dazu angestellten Überlegungen die im Stand der Forschung und der Technik bereits erläuterte „Formula for Change“ (GREEN 2007) herangezogen werden.

Neben der Entwicklungs- und Einführungsmethodik ist im Baustein *Planung Einführung* der zeitliche Ablauf, die notwendigen Maßnahmen und die erforderlichen Arbeitspakete, wie z.B. Erstellung von Schulungskonzept und Schulungsunterlagen, sowie ein sinnvolles Projektmanagement zu erarbeiten.

Einführung des Projektierungswerkzeuges

Auf die Planung folgt die tatsächliche Einführung des Werkzeuges. Sie umfasst im Wesentlichen die folgenden Teilaspekte:

- Vorstellung des Projektierungswerkzeuges und Kommunikation der zukünftigen Verwendung (freiwillig, projektabhängig oder verpflichtend).
- Abschluss der Projektierungswerkzeugerstellung bzw. der Implementierungsarbeiten an der Softwarelösung (siehe Adaption und Anpassung im Bereich TECHNIK).
- Abschluss der Anpassungen an bestehenden Werkzeugen, bzw. Neuentwicklung und Integration in der Firmenorganisation sowie Umsetzung der erforderlichen Prozessänderungen (siehe Adaption und Anpassung im Bereich ORGANISATION).
- Durchführung der Schulungen.

- Optionale Prototypenphase mit Feedback (im Falle des oben beschriebenen Einführungsansatzes).
- Kommunikation Einführungstermine und Überwachung der Umsetzung.

Diese Punkte sind Inhalt der beiden Prozessschritte *Tool-Einführung* und *Prozessintegration*, welche zusammen die Einführung bilden. Die beiden Bausteine sind im Modell auf den für sie jeweils relevanten Bereich ausgerichtet. Aus technischer Sicht bedeutet dies im Resultat, dass das Projektierungswerkzeug in Betrieb genommen, folglich mit den erforderlichen Systemen vernetzt und den Nutzern zur Verfügung gestellt wird. Aus organisatorischer Sicht wird letztlich der Einsatz des Projektierungswerkzeuges im Prozess verankert. Außerdem werden, falls noch nicht geschehen, die gegebenenfalls erforderlichen Organisationsänderungen gültig. Mit Abschluss sämtlicher Entwicklungs- und Einführungstätigkeiten kann das *gate D – Einführungsabschluss* durchschritten werden.

4.5 Phase IV – Reflexion

Ein entscheidender Fortschritt des Münchner Vorgehensmodells im Vergleich mit anderen Vorgehensmodellen ist der starke Fokus auf die Zielabsicherung in Form von Reflexion. Die zunehmende Wahrnehmung der Bedeutung zeigt sich auch an anderer Stelle. Beispielhaft sollen hier BADKE-SCHAUB & FRANKENBERGER (2004) und DÖRNER (2003) genannt werden, die das Grundprinzip der wiederkehrenden Reflexion und seine Bedeutung als Erfolgsgarant bei der Anwendung von Vorgehensmodellen betonen.

Auf Basis dieser Überlegungen wurde auch das ursprüngliche 3-Phasenmodell um die zusätzliche Reflexions-Phase auf das hier vorgestellte 4-Phasen-Modell erweitert. Auch ohne diese Phase bestünde die Möglichkeit einer Reflexion, wie sie im *gate D – Einführungsabschluss* erfolgen soll, mit der die aktive Phase des Projektes abgeschlossen wird. Mit Hilfe einer eigenen – zeitlich über das Projektmanagement befristeten – Reflexionsphase lassen sich aber auch mittelfristige Beobachtungen in die Reflexion einbauen. Somit kann die Nachhaltigkeit der Einführung besser beurteilt werden, bevor die Verantwortlichen im abschließenden *gate E - Entlastung* entlastet werden.

Die Zielabsicherung verfolgt dabei drei Richtungen:

- Reflexion der Einführung des Projektierungswerkzeuges
- Reflexion der Integration des Projektierungswerkzeuges in das Unternehmen
- Reflexion des Projektierungswerkzeuges

Die Vorgehensweise zur Reflexion ist für diese drei Fragestellungen grundsätzlich ähnlich: Es geht immer darum, das Feedback aufzunehmen, Soll/Ist-Analysen zu erstellen und auszuwerten. Methodische Hilfsmittel sind Stärken-Schwächen-, Fehlerbaum-, Prozess- und Schwachstellen-Analysen auf Basis der gegebenen Anforderungen. Letztlich ist es das Ziel durch entsprechende Maßnahmen das Ergebnis soweit möglich zu verbessern, bzw. im nächsten ähnlich gelagerten Fall, von vornherein besser zu handeln. Im Rahmen des Kapitels zur Allgemeingültigkeit des Modells wird gezeigt werden, dass es ähnliche andere Einführungsaufgaben gibt. Lerneffekte aus der Reflexion führen dort dann im Idealfall zu Optimierungen.

Reflexion der Einführung

Im Rahmen dieser Betrachtung wird der Blick auf die eigentliche Einführung gerichtet: Dabei könnten z.B. folgende Fragen adressiert werden: Konnten die zeitlichen Planungen für die Einführung eingehalten werden? Wurden alle relevanten Bereiche erfasst? Waren die Einführungsmaßnahmen ausreichend und wurden sie auch durch die Nutzer so beurteilt? Waren die Schulungen und Schulungsunterlagen ausreichend und entsprachen sie den Erwartungen?

Reflexion der Integration

Dieser Rückblick analysiert das Ergebnis der Einführung und ermittelt den Grad der Werkzeugintegration in das Unternehmen. Darunter ist zu verstehen, dass gezeigt wird inwieweit das Werkzeug tatsächlich im Rahmen der Projektierung verwendet wird. Hier tritt z.B. zutage ob es im Beisein des „not-invented-here“ Phänomens ignoriert wird. Im Rahmen der Analysephase wurden die theoretischen und die gelebten Prozesse angesprochen. Die hier beschriebene Reflexion soll klären, ob das Projektierungswerkzeug den Zugang zu den tatsächlich gelebten Prozessen erlangt hat.

Reflexion des Projektierungswerkzeuges

Dabei geht es um die Frage, inwieweit das Projektierungswerkzeug die gestellten Anforderungen (siehe Leitplanken der Konzept- und Realisierungsphase) erfüllt und die erwarteten Einsparungen tatsächlich erreicht, bzw. inwieweit es die Optimierungspotentiale auszuschöpfen hilft. Hierbei sind die Zielformulierungen sowie die Anforderungen an das Projektierungswerkzeug die Bewertungsbasis.

Im Anschluss an die Reflexion erfolgt im *gate E – Entlastung* der offizielle Abschluss des Projektes mit Entlastung des Projektteams.

4.6 Zusammenfassung

Das Kapitel 4 beschreibt die erarbeitete Entwicklungs- und Einführungsmethodik zur Einführung der numerischen Simulation pneumatischer Systeme als Projektierungswerkzeug. Im Kern steht das in dieser Arbeit erstellte 4-Phasenmodell als Vorgehensmodell. Die Methodik wird vervollständigt durch das Projektmanagementwerkzeug *gate* sowie ergänzende Erläuterungen zum Modell, wie z.B. die Hinweise auf geeignete unterstützende Methoden und Hilfsmittel während der Anwendung.

Dieses Vorgehensmodell hat seinen Ausgangspunkt in einer Analysephase (Phase I), gegliedert in die zwei Schwerpunktböcke *Systemsimulation* und *Unternehmen*. Im Zentrum des Modells stehen zum einen die Konzepterstellung (Phase II) und zum anderen die Einführung des Werkzeuges (Phase III). Der hierdurch dargestellte Hauptprozess wird durch die Themenbereiche **TECHNIK** und **ORGANISATION** flankiert, welche das ganze Modell in zwei aufeinander abzustimmende Hälften teilen. Die flankierenden Leitplanken der Phasen II und III umfassen jeweils Randbedingungen und Anforderungen sowie Anpassung und Entwicklung im Zuge der Einführung. Den Abschluss bildet die Reflexionsphase zur Prüfung der Projektziele.

Das 4-Phasenmodell basiert auf dem Münchener Vorgehensmodell und bedient sich an dessen Inhalten. Angelehnt an das diskursive Vorgehen von WULF (2002) und das Krisenmanagement von LINDEMANN ET AL. (2007) werden im Modell bewusst Freiheitsgrade eingeschränkt, um der Komplexität der technischen Fragestellung und den Randbedingungen im industriellen Umfeld einer derartigen Einführungsaufgabe gerecht zu werden. Die dadurch wahrscheinliche Zielerreichung einer erfolgreichen Einführung des Projektierungswerkzeuges steht im Vordergrund. Gerade dieses Ergebnis zu hinterfragen ist die Aufgabe der äußerst wichtigen Reflexionsphase am Ende des Einführungsprojektes.

Die entwickelte Entwicklungs- und Einführungsmethodik ergänzt bestehende Vorgehensweisen im Wesentlichen um drei Aspekte. So wird mit der erarbeiteten Methodik erstmalig ein systematischer Rahmen für eine kombinierte Aufgabe aus Entwicklung und Einführung eines komplexen technischen Werkzeuges geliefert. Dabei werden die wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen zusammengeführt und miteinander verzahnt, um aus einer bislang schwer greifbaren Aufgabe für Spezialisten eine methodisch vorstrukturierte Ingenieurstätigkeit werden zu lassen. Dies wird vor allem durch den Checklisten-Charakter der Methodik und den starken Projektmanagementansatz erreicht.

Der zweite innovative Aspekt ist das Wechselspiel der beiden Bereiche TECHNIK und ORGANISATION innerhalb der Methodik. Die Verankerung beider Bereiche und das Aufzeigen der Notwendigkeit eines ständigen Abgleichs sind in dieser Form neu und wurden aus der Erkenntnis abgeleitet, dass aus der Kombination von Change Management und der komplexen technischen Aufgabe der Entwicklung eines Projektierungswerkzeuges auf Basis der Pneumatiksimulation Konsequenzen abgeleitet werden müssen.

Zudem ergibt sich aus dem Fokus auf Projektierungsprozess im Maschinen- und Anlagenbau eine Erweiterung bestehenden Wissens um Erkenntnisse über die Randbedingungen und Anforderungen an unterstützende Werkzeuge in diesem industriellen Umfeld. Die schnelle und einfache Anwendbarkeit bei, bezogen auf die Anwendung, ausreichender Genauigkeit, sowie die Robustheit der jeweiligen Lösungen stehen im Vordergrund. Gleichzeitig stellt eine optimale Simulationslösung für sich kein Ziel bei der Entwicklung eines Projektierungswerkzeuges dar. Diese Erkenntnis führt in Kombination mit den eingangs beschriebenen Herausforderungen des Marktes, zur Notwendigkeit eines sehr zielgerichteten Vorgehens, die mit der Einschränkung des Lösungsraumes einhergeht, wie sie das 4-Phasenmodell beschreibt.

5. Evaluation

Die Entwicklungs- und Einführungsmethodik wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes erstmalig angewendet. Ziel dieser Fallstudie ist es, die Lösung im Zusammenhang anhand eines Praxisbeispiels zu illustrieren, um damit ein besseres Verständnis zu schaffen. Zugleich wird sie als Reflexionsmöglichkeit genutzt, um die Sinnhaftigkeit der entwickelten Ansätze und Lösungen sowie die Umsetzung der Anforderungen durch sie zu diskutieren und zu hinterfragen.

Dieses Kapitel stellt diese Erstanwendung vor und gibt dabei einen Überblick der wichtigsten Aspekte bezogen auf die vorliegende Arbeit. Abbildung 5-1 dient zur Veranschaulichung und ordnet diese Aspekte den jeweiligen Elementen zu.

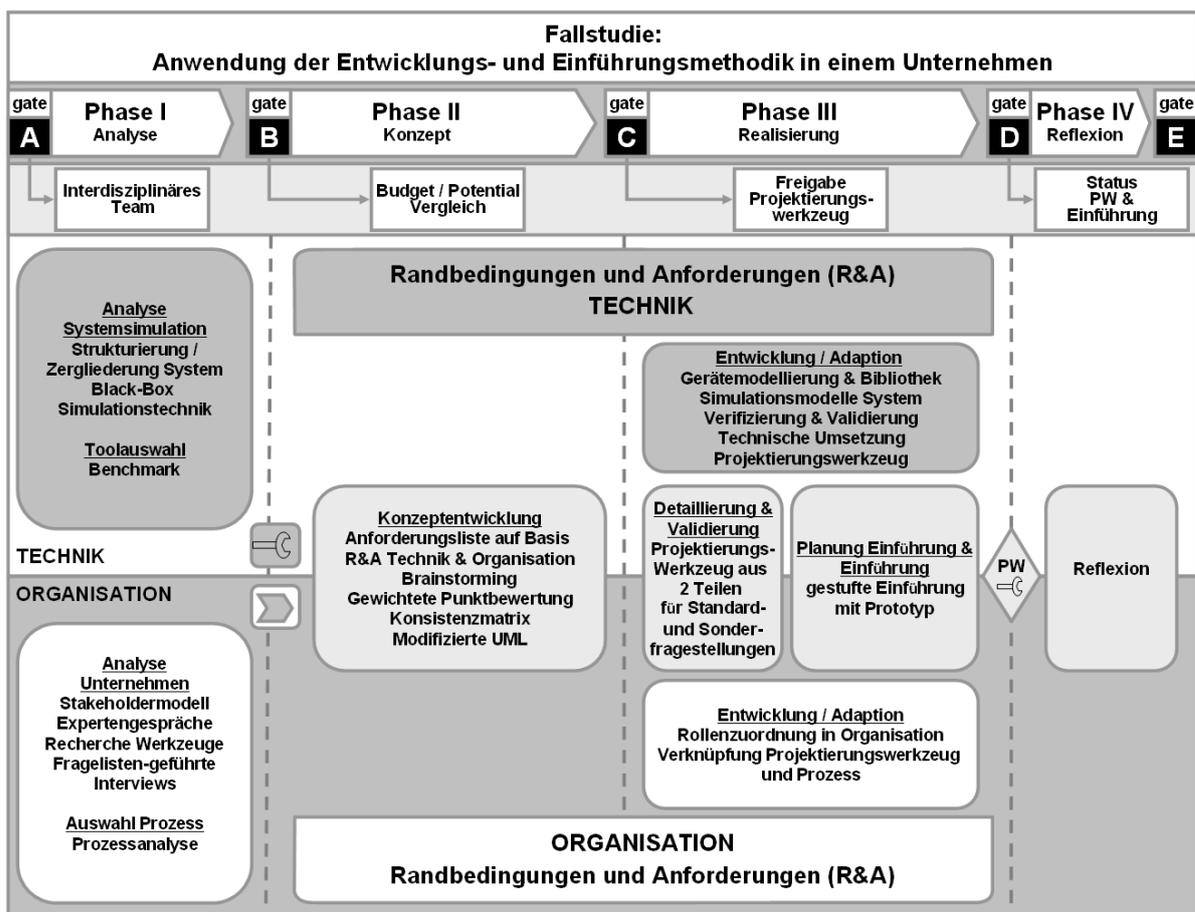


Abbildung 5-1: Fokussierte Aspekte der Fallstudie

Das am Forschungsprojekt beteiligte Unternehmen⁴² ist ein Systemlieferant vollständiger Bremssysteme und kann damit als ein repräsentativer Vertreter des Maschinen- und Anlagenbaus⁴³ angesehen werden. Dadurch eignet es sich als Umfeld für die erste Anwendung der Methodik und als Reflexionsobjekt für deren praxistaugliche Gestaltung. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde als ein Ziel die Entwicklung und Einführung eines Projektierungswerkzeuges auf Basis der Systemsimulation formuliert. Auf dieser Basis lässt sich die Eignung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das industrielle Umfeld diskutieren.

5.1 Phase I - Analyse

Die eingangs erwähnten Veränderungen im Bahnsektor, hervorgerufen durch Globalisierung und branchentypische Entwicklungen, zeigen sich vor allem in kürzeren Projektierungs- und Entwicklungszeiten und steigendem Konkurrenzdruck bei gleichzeitig erhöhter Komplexität innerhalb der Systeme. Dies führte auch im Beispielunternehmen zu der Erkenntnis, dass unter anderem die technische Auslegung im Rahmen der Projektierung zu verbessern ist. Weiter wurden Überlegungen angestellt, inwieweit dieser Prozess durch den Einsatz der Pneumatiksimulation unterstützt werden kann. Nachdem unternehmensinterne Expertenschätzungen eine positive Prognose ergaben, wurde die Entwicklung eines Projektierungswerkzeuges auf Basis der numerischen Simulation pneumatischer Systeme als Teilziel eines Forschungsprojektes festgelegt.

Das daraus abgeleitete Teilprojekt „Entwicklung und Einführung eines Projektierungswerkzeuges“ wurde mit einem erweiterten interdisziplinären Team aus Mitarbeitern relevanter Bereiche des Unternehmens (Management, Projektmanagement, Systementwicklung, Geräteentwicklung, Projektierung, Berechnung und Versuchsabteilung) und externen Wissenschaftlern durchgeführt. Die genannte Zielvorgabe und die vorangegangenen Aufwand/Nutzen-Schätzungen bildeten die Grundlage für den ersten Phasenübergang (*gate A*) im Zuge des *Kick offs*. Im Folgenden wurden die Arbeiten im Rahmen der Analysephase aufgenommen.

5.1.1 Analyse Technik

Für den Bereich Technik wurden die in der Modellvorstellung vorgeschlagenen vier Schwerpunkte untersucht, wobei zum besseren Verständnis des Umfeldes dieser Fallstudie vor allem

⁴² Die Knorr-Bremse AG ist der weltweit führende Hersteller von Bremssystemen für Schienen- und Nutzfahrzeuge. Mit weltweit ca. 15000 Mitarbeitern erwirtschaftete der Konzern im Geschäftsjahr 2008 einen Umsatz von über 3,38 Mrd. Euro (KNORR-BREMSE GESCHÄFTSBERICHT 2008). Das Produktspektrum der Knorr-Bremse AG umfasst neben Bremssystemen für alle Arten von Schienen- und Nutzfahrzeugen unter anderem auch Klimaanlage, Toiletten, Kupplungen und Scheibenwischer für die Bahnindustrie oder Drehschwingungsdämpfer für Nutzfahrzeuge.

⁴³ Durch die hohe Komplexität derartiger Systeme (Anlagen) und die kundenspezifische Projektierung kann das Unternehmen Knorr-Bremse SfS GmbH in die Unternehmensklasse der Hersteller von Maschinen und Anlagen eingeordnet werden (FÖRSTER 2003).

die Analyse der Systeme als Objekt der Projektierung und mögliche Potentiale von Interesse sind. Aus diesem Grund werden diese Themen fokussiert. Der aus dem Stand der Technik und der Systemanalyse ausgewählte Simulationsansatz wird nur kurz vorgestellt. Auf Simulationswerkzeuge kann an dieser Stelle verzichtet werden, da dieser Analyseblock für die Anwendung der erarbeiteten Methodik nur geringe Bedeutung hatte.

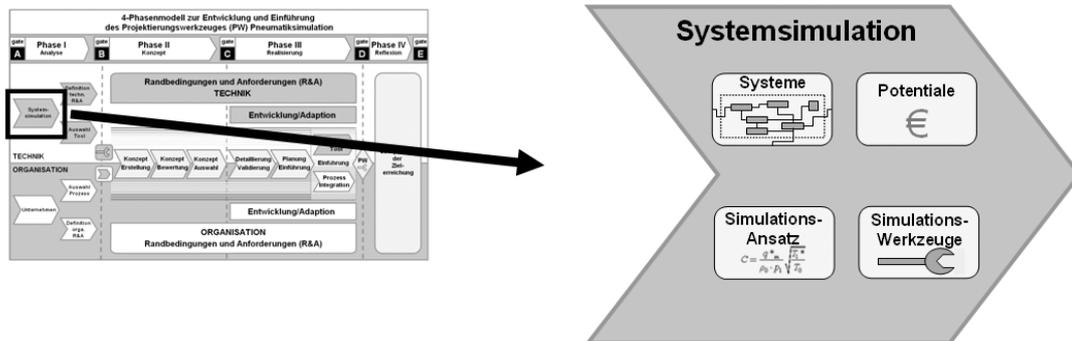


Abbildung 5-2: Analyseschwerpunkte im Bereiche TECHNIK

Systeme (Objekt der Projektierung)

Das Beispielunternehmen verantwortet als Systemlieferant vollständige Bremssysteme. Diese komplexen, teils mechatronischen Systeme mit einer hohen Anzahl zusammenwirkender Elemente sind stark individualisierte Anlagen, die fahrzeug-, betreiber-, landes- und auch projektspezifisch eine hohe Varianz aufweisen. Sie werden in der Regel in die technischen Systemschwerpunkte System- sowie Bremssteuerung, Luftbeschaffung und Drehgestellausrüstung gegliedert (Abbildung 5-3).

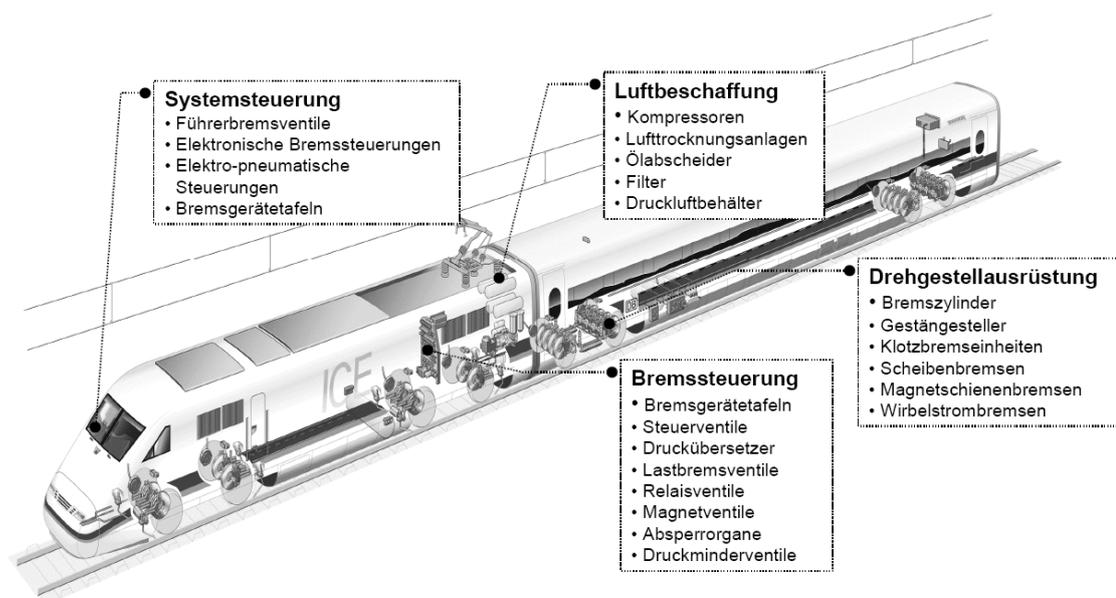


Abbildung 5-3: Überblick eines Schienenfahrzeugbremssystem (KNORR-BREMSE 2003)

Zum besseren Verständnis der weiteren Ausführungen wird an dieser Stelle kurz das grundsätzliche Funktionsprinzip der Druckluftbremse⁴⁴ als Herzstück derartiger pneumatischer Bremssysteme erläutert: Abbildung 5-4 zeigt hierzu schematisch ein indirekt wirkendes Bremssystem mit seinen für die Funktion relevanten Komponenten, wie es seit Anfang des 20. Jahrhunderts Anwendung findet. Ein Kompressor (1) stellt die Druckluft für das Bremssystem zur Verfügung und füllt im Fahrbetrieb den Hauptluftbehälter (3) und über die Hauptluftleitung (HL - 7) die Hilfsluftbehälter (4) in der Lok und den einzelnen Wagen. In der dargestellten Lösestellung verbinden dazu die Druckteller der Steuergeräte die Hauptluftleitung jeweils mit den Hilfsluftbehältern.

Zur Bremsung legt der Lokführer das Führerbremsventil (2) in die Bremsstellung und reduziert dadurch das Druckniveau der Hauptluftleitung. Dieser Druckunterschied wird durch die Steuergeräte erkannt, die daraufhin Druckluft aus den Hilfsluftbehältern zu den Bremszylindern (4) leiten. Der sich in den Bremszylindern einstellende Druck und die daraus folgende Bremsung des Zuges verhalten sich entsprechend des Druckabfalls in der Hauptluftleitung, so dass eine vollständige Entlüftung der Hauptluftleitung zu einer Schnellbremsung führt. Daraus ergibt sich, dass auch im Falle eines Zugabrisses die am schnellsten mögliche Bremsung beider Zugteile eingeleitet wird.

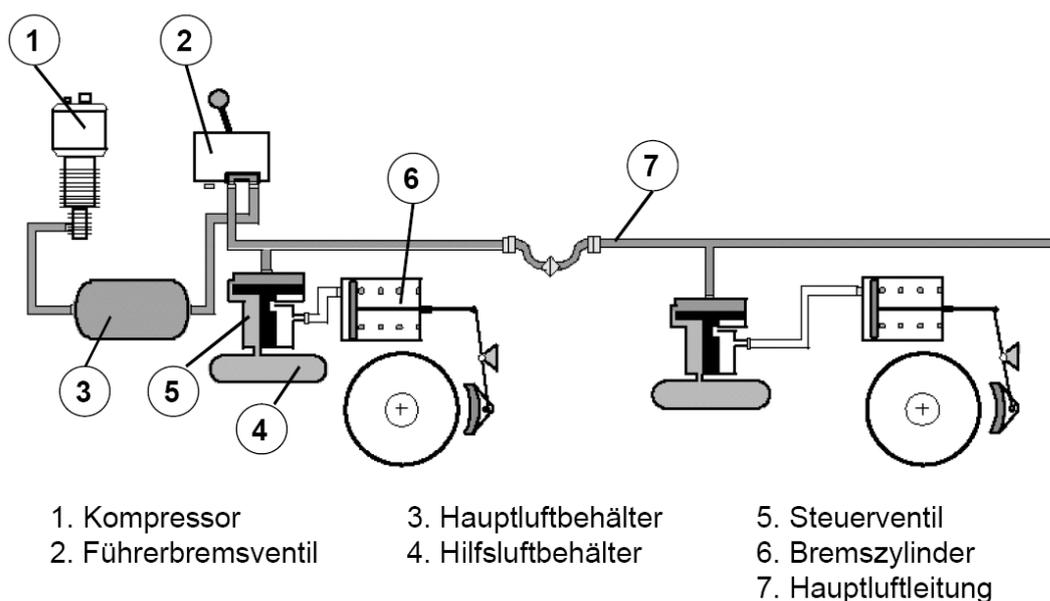


Abbildung 5-4: Indirekte automatische Bremse (KNORR-BREMSE 2003, S. 14)

Auch aktuelle hochmoderne Systeme bauen in der Regel auf diesem Grundprinzip auf. Zur Analyse von Bremssystemen müssen sie in ihre Teilsysteme und weiter in ihre Komponenten (z.B. Ventile, Aktuatoren oder Verrohrungselemente) zerteilt werden. Damit wird in der Rich-

⁴⁴ George Westinghouse entwickelte die Druckluftbremse in den USA um 1869 speziell für den Bahnbetrieb. Auf seine Erfindung erhielt er am 5. März 1872 ein US-Patent. Georg Knorr war nach der Gründung der Knorr Bremse AG im Jahr 1905 maßgeblich für die spätere Weiterentwicklung der Druckluftbremse verantwortlich. (POHL 2005, S. 12ff)

tung „Top-Down“ die Systemebene erreicht, auf der die Systemauslegung (in Richtung „Bottom-Up“) erfolgt. Diese wiederum bildet aus einzelnen Elementen Teilsysteme und Systeme, indem aus einem Pool Ventile, Bremszylinder und andere Funktionselemente ausgewählt und mittels Trägersystemen, Verrohrung und Schläuchen verbunden werden.

Am Beispiel des Teilsystems „Leistungsteil Bremszylinder-Druck“ lässt sich der angewendete Top-Down Ansatz anschaulich zeigen (Abbildung 5-5). Dieses Vorgehen wurde zum einen zur Systemanalyse (Optimierungspotential etc.) und zum anderen zur Ermittlung des Bedarfs an Modellen für die Systemsimulation verwendet. Für das genannte Teilsystem ergibt sich z.B. Bedarf für Modelle der Systemelemente Bremszylinder, Verrohrung, Gleitschutzventil⁴⁵ und Relaisventil. Die Systemgrenze liegt in diesem Fall auf der Eingangsseite des Relaisventils (Input: Vorsteuerdruck) und zwischen Pneumatikteil und mechanischem Teil des Bremszylinders (Output: Bremszylinderdruck am Kolben).

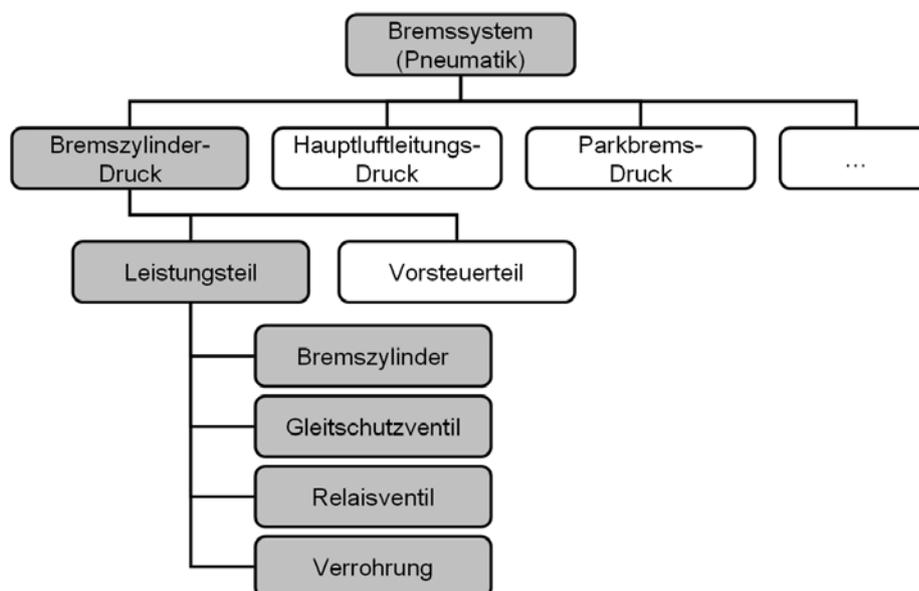


Abbildung 5-5: Beispielhafter Top-Down-Ansatz zur Systemanalyse

Mit Hilfe einiger derartiger Zergliederungen von Teilsystemen der pneumatischen Bremse wurde ermittelt, wie sich die Systemelemente dieser zu projektierenden Systeme, aus pneu-

⁴⁵ Gleitschutzsysteme von Schienenfahrzeugen sind in der Funktion Antiblockiersystemen (ABS) von Kraftfahrzeugen ähnlich. Ihre Notwendigkeit resultiert aus der Gefahr des plötzlichen Achsstillstands beim Abbremsen eines Schienenfahrzeugs, durch den, bei verlängertem Bremsweg, eine Flachstelle [am Radreifen] entstehen kann. (STÜTZLE ET AL. 2006, S. 139) Derartige Flachstellen schädigen die Laufruhe des Rades und führen so zu unerwünschten Vibrationen, die auf das Gesamtsystem des Drehgestells, bzw. der Achse unabsehbare Effekte haben können. Darüber hinaus wird mit Gleitschutzsystemen eine verbesserte Bremswirkung und somit eine Verkürzung des Bremsweges für das Fahrzeug erreicht. Zu den Anforderungen einer Gleitschutzanlage gehört es, die Radsätze des Zuges unter allen Witterungsbedingungen vor dem Blockieren zu schützen. Auch bei niedrigen Haftwerten werden kurze Bremswege erzielt. (SAUMWEBER & WINKLE 1981, S. 2)

matischer Sicht, bezogen auf Grundelemente (hier vor allem pneumatische Widerstände, Volumen und Regelungsverhalten) zusammensetzen.

Hierfür ist ein geeigneter Modellierungs- und Simulationsansatz auszuwählen. Bezüglich der zu untersuchenden Fragestellungen im Rahmen der Projektierung ergab die Systemanalyse der Experten, dass es sich im Kern um zwei Themenblöcke handelt. Diese sind die Leistungsfähigkeit der Systeme (bezogen auf den möglichen Durchsatz) und das dynamische Systemverhalten im Kontext der Druckregelung.

Potentiale

Im Beispielunternehmen werden im Jahr mehrere hundert Kundenprojekte vom relativ einfachen und meist standardisierten Güterzugwagen bis hin zum höchst komplexen und stark projektspezifischen Hochgeschwindigkeitstriebzug abgewickelt. In der Regel sind mehrere Schleifen in der Angebotslegung bei verschiedenen Fahrzeugbauern erforderlich. Daraus ergibt sich eine sehr große Anzahl an Angebotsausarbeitungen, für die jeweils eine technische Auslegung benötigt wird. Dabei ist es für den Unternehmenserfolg entscheidend, eine möglichst hohe Angebotsqualität bei möglichst niedrigem Aufwand zu erzeugen.

Die eigentliche Systemoptimierung während der Projektierung hat in der Vergangenheit in einer Art evolutionärem Prozess auf Basis von weitreichender Betriebserfahrung und Versuchen stattgefunden. Die positiven Erfahrungen aus dem langjährigen umfänglichen Einsatz moderner Berechnungsmethoden wie z.B. FEM und den sofort sichtbaren Vorteilen der im Forschungsprojekt eingeführten CFD-Simulation im Rahmen der Produktentwicklung haben dazu geführt, dass auch in der Projektierung durch den Einsatz von pneumatischer Systemsimulation wesentliche Verbesserungen bezogen auf die Auslegung der pneumatischen Systeme erwartet werden. Dies allerdings nur, wenn ein derartiges Werkzeug flexibel, schnell und kurzfristig anwendbar ist und der Aufwand im Vergleich zur Nutzung vertretbar ist.

Anhand zweier qualitativer Beispiele lässt sich ein Eindruck vermitteln, welches Potential⁴⁶ sich durch ein Projektierungswerkzeug Systemsimulation ergibt:

Eine Auswertung der Unternehmensverkaufszahlen von Gleitschutzventilen ergab, dass sich diese zum allergrößten Teil auf zwei Gerätetypen aufteilen. Bei diesen beiden Standardtypen ergibt sich ein Verhältnis von ca. 17 % auf den Typ A, und 83 % auf den Typ B. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch den pneumatischen Durchsatz und die Herstellkosten (Typ A: große Leistung bei hohen Kosten, Typ B: mittlere Leistung bei geringeren Kosten <50%). Eine Detailanalyse der Typ A-Ventile ergab, dass ca. 30% dieser Ventile eine Bedüsung aufweisen, welche im Leistungsbereich der kleineren Typ B-Ventile liegt. Durch Einsatz eines Projektierungswerkzeuges, welche die Auswahl der Gleitschutzventile verbessert, besteht also die Möglichkeit in 6% aller Einsatzfälle das bezogen auf die pneumatische Leistung ausreichende, aber deutlich kostengünstigere Gleitschutzventil auszuwählen. Damit lassen

⁴⁶ Konkrete Aussagen zu Aufwand, Kosten, Budget und Potentialen können aus Gründen der Geheimhaltung, welche für die Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes zwischen dem Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München und der Knorr-Bremse SFS GmbH vereinbart wurden, nicht genannt werden. Soweit möglich wird dies durch Vergleiche und qualitative Aussagen ersetzt.

sich erhebliche Kostensenkungen für die betroffenen Systeme erreichen, was entweder die Gewinnmarge erhöht oder die Konkurrenzfähigkeit im Vergleich zu anderen Anbietern verbessert. Wenn ein zur Projektierung eingesetztes Werkzeug darüber hinaus nur die beiden genannten Standardventile berücksichtigt, dann kann als positiver Nebeneffekt die weitere Eindämmung der Verwendung von Nicht-Standardventilen erreicht werden. Dies führt zu einer weiteren Verdichtung auf den bevorzugten Standardtypen und dort gegebenenfalls zu weiteren Stückzahleffekten.

Im Rahmen der Projektierung von Schienenfahrzeugen gibt es immer wieder gänzlich neue Fragestellungen. So wurde z.B. für einen Hochgeschwindigkeitszug eine pneumatische Notbremseinrichtung bei Schlauchbruch im System Parkbremse gefordert. Diese Einrichtung sollte auch bei fehlerhaftem Diagnosesystem verhindern, dass während der Fahrt die Parkbremse durch einen Schlauchbruch anlegt und es dadurch zu einer Überhitzung der Bremsanlage im Drehgestell kommt. Abbildung 5-6 zeigt, wie das dazu projektierte Notbremsventil (NBV) verschaltet wurde, um bei einem Schlauchbruch eine Entlüftung der Hauptluftleitung (HL) und damit das Auslösen der Steuerventile im ganzen Zug zu bewerkstelligen. Durch Systemsimulation lässt sich in einem solchen Fall ermitteln, in welcher Größenordnung die Düsen und Volumen intern und extern von Ventilen zu wählen sind, um eine sichere Funktion der Schaltung zu bewerkstelligen. Dabei kann mit der Simulation auch ermittelt werden, inwieweit die Funktion durch übliche Fertigungstoleranzen eingeschränkt sein könnte. Dabei kann ein Ergebnis sein, dass die Entwicklung einer derartigen pneumatischen Schaltung zwar theoretisch möglich ist, aber nicht wirtschaftlich zu fertigen. Außerdem lassen sich in der Simulationsumgebung sämtliche Betriebsvorgänge (Systemauffüllen, Betriebsbremse etc.) untersuchen und damit die Funktion der Schaltung nachweisen. Eine ähnliche Ergebnisqualität lässt sich mit Versuchen nur unter erheblichem Kosten- und Zeiteinsatz erreichen, was in der Angebotsphase aus Wirtschaftlichkeitsgründen nicht sinnvoll erscheint. In einem derartigen Fall stehen sich also wenige Stunden für theoretische Betrachtungen unter Einsatz der Systemsimulation auf der einen und mehrtägige Systemversuche oder, bei Verzicht auf diese Versuche, das Eingehen technischer bzw. kommerzieller Risiken auf der anderen Seite gegenüber.

Diese beiden Beispiele zeigen qualitativ, welche positiven Effekte durch den Einsatz der Systemsimulation als Projektierungswerkzeug erzielt werden können. Die Faktoren wie erhöhte Standardisierung⁴⁷, Reduzierung des Versuchsaufwandes, bzw. Optimierung der Versuche durch vorherige Eingrenzung der Parameter bestärken den dadurch gewonnenen Eindruck noch weiter.

⁴⁷ Die Knorr-Bremse AG ist vor allem um die Jahrtausendwende sehr schnell unter anderem durch Zusammenschlüsse und Übernahmen gewachsen. Dies führte auch im hier fokussierten Tochterunternehmen Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH in einigen Unternehmensbereichen zu erheblichen Standardisierungsbemühungen, die auch für den Kontext dieser Ausführungen Relevanz haben.

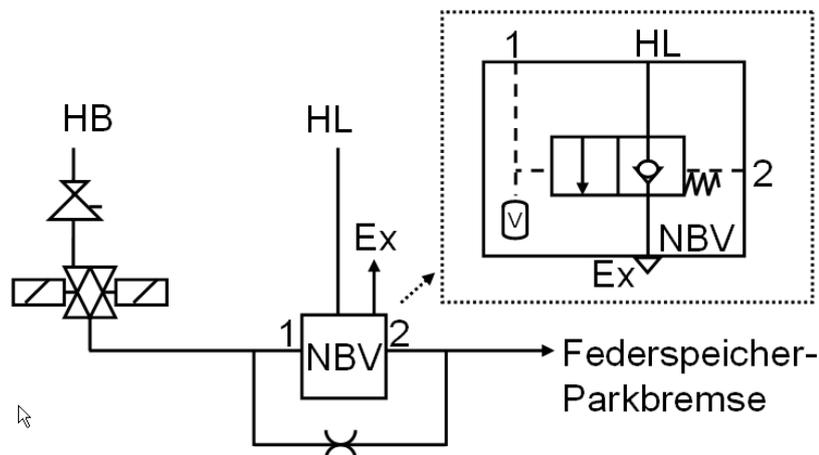


Abbildung 5-6: Pneumatische Schaltung zur Schlauchbrucherkennung (Parkbremse)

Simulationsansatz

Mit Verweis auf den Stand der Technik ist es ausreichend, kurz den Kern des Simulationsansatzes vorzustellen, welcher im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeitet wurde. Dieser Ansatz sieht vor, dass zu den durch Zergliederungen der Teilsysteme ermittelten Systemelementen (siehe Analysepunkt Systeme) zunächst Modelle aus vorab definierten Grundelementen (z.B. pneumatische Widerstände, Volumen oder logische Operatoren) gebildet werden. Idealerweise werden derartige abgesicherte Grundelemente bereits im Simulationstool vorgesehen, um daraus die Simulationsmodelle des Systems zu bilden.

Diese Simulationsmodelle (Black-Boxen) bilden eine Simulationsbibliothek aus der je nach zu simulierendem System die erforderlichen Elemente ausgewählt werden können. Im Folgenden kann dann das System simuliert und damit z.B. die Systemdynamik untersucht werden. Dabei berechnen die Black-Boxen für den Nutzer nicht transparent die jeweiligen Zustände der Systemparameter (bei pneumatischen Systemen Druck, Temperatur, Massenströme etc.), um diese an definierten Schnittstellen mit anderen Elementen auszutauschen⁴⁸. Abbildung 5-7 zeigt den Zusammenhang zwischen Grundelementen des Simulationswerkzeuges, den Simulationsmodellen (Black-Boxen) und den daraus gebildeten Systemen. Zur Beschreibung der pneumatischen Widerstände wurde die ISO 6358:1989 zugrunde gelegt. Hierzu wurde ein automatisierter Prüfstand entwickelt und in Betrieb genommen, um das Produktprogramm zu vermessen. Dieser berücksichtigt beide von MURRENHOF (2006, S. 59f) detailliert beschriebenen Vermessungsverfahren zur Kennwertermittlung nach dieser Norm.

⁴⁸ Bei der Modellierung dieser Black-Boxen liegt der Fokus auf der Wiedergabe des Verhaltens im System, wobei die internen Abläufe bei Untersuchungen zur Systemoptimierung oder Projektierung zweitrangig sind. Bei Systemsimulationen zur Unterstützung der Geräteentwicklung bzw. Geräteoptimierung sind hingegen die internen Vorgänge von entscheidender Bedeutung.

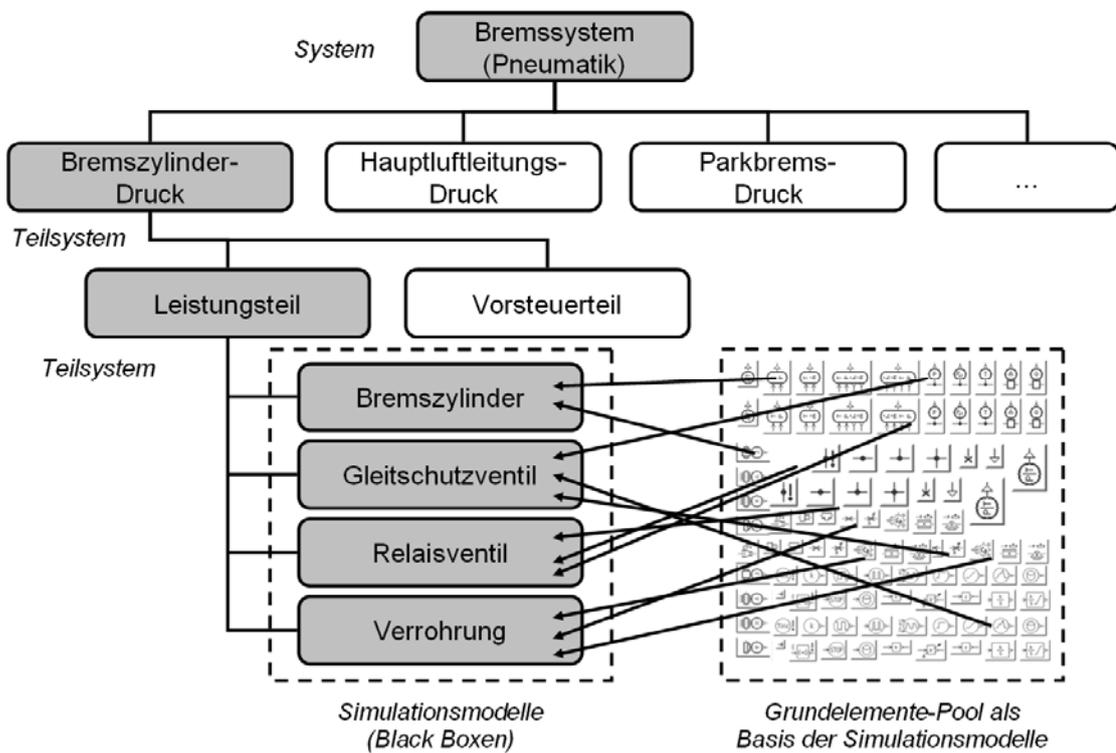


Abbildung 5-7: Zusammenhang zwischen Grundelementen, Black-Boxen (Geräte und Systemkomponenten) und Systemen

5.1.2 Analyse Organisation

Auf der Seite ORGANISATION wurde der Untersuchungsblock Unternehmen wie im 4-Phasenmodell vorgeschlagen strukturiert. Hier soll der Fokus vor allem auf den Menschen innerhalb der Organisation und auf den Prozess gerichtet werden, da sich diese als die dominierenden Aspekte herauskristallisiert haben.

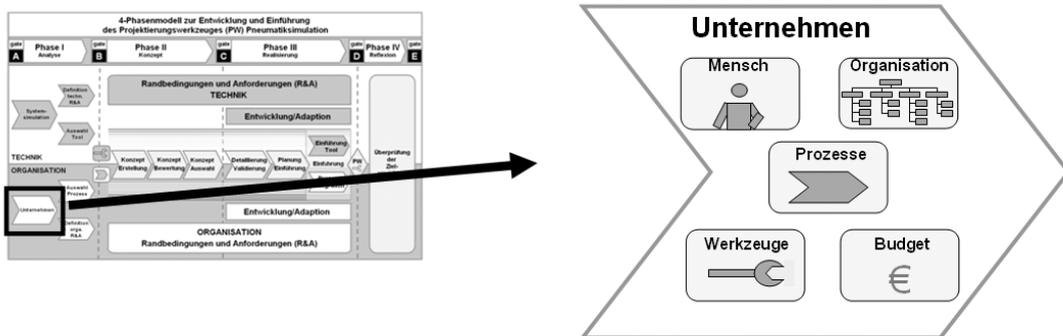


Abbildung 5-8: Aspekte des Analyseblocks Unternehmen

Organisation & Mensch

Die Aufbauorganisation im untersuchten Unternehmen richtet sich zum einen nach den zu bedienenden Märkten und zum anderen nach den produzierten Produktgruppen. Daraus ergibt sich eine Matrixorganisation, welche das Unternehmen standortübergreifend in Vertriebs- und Fachbereiche einteilt. Die Vertriebsbereiche stellen dabei jeweils die Schnittstelle zum Kunden dar. Sie projektieren aus dem Produktsortiment der Fachbereiche die Bremssysteme und tragen die Systemverantwortung. Die Fachbereiche verantworten somit die Entwicklung, die Produktion, den Einkauf und den Versuch für die jeweiligen Produkte.

Die für die Projektierung der Systeme verantwortlichen Vertriebseinheiten sind auf Grund unterschiedlicher Marktbedingungen und Marktgepflogenheiten nicht einheitlich organisiert. Grundsätzlich findet die organisatorische Ausrichtung der Abteilungen nach Märkten, Kunden, Auftragsabwicklung (inklusive Logistik) und technischen Aspekten statt. Für die Bearbeitung der Kundenprojekte werden jeweils Projektorganisationen aus diesen Abteilungen gebildet, wobei Mitarbeiter auf Grund des Multiprojektgeschäftes in der Regel in mehreren Projektteams vertreten sein können. Darüber hinaus sind in den Vertriebseinheiten auch Systemabteilungen integriert, welche die später vorgestellten Systemreviews im Rahmen der Projektierung und der weiteren Projektabwicklung durchführen und freigeben. Die Systemvalidierung und Freigabe erfolgt durch die übergreifende Abteilung der Inbetriebsetzung. In den Fachbereichen gibt es Entwicklungs-, Produktions-, Einkaufs- und Qualitätsabteilungen. In den Entwicklungsabteilungen und teilweise vorhandenen Systementwicklungsabteilungen werden grundlegende Auslegungsfragen bezogen auf die jeweiligen Produkte bearbeitet. Darüber hinaus gibt es eine bereichsübergreifende Berechnungsabteilung, welche als Dienstleister Berechnungen aller Art für Fachabteilungen der Entwicklung und des Vertriebes durchführen.

Somit liegt die zukünftige Nutzung des Projektierungswerkzeuges in den Vertriebseinheiten, welche gleichzeitig das Know-how zum System bündeln, die Detailkenntnis zu den Systemkomponenten in den Fachabteilungen und die Berechnungskompetenz bei einem bereichsübergreifenden Dienstleister. Diese Aufteilung musste bei der Entwicklung berücksichtigt werden.

Unter dem Aspekt Mensch werden die Mitarbeiter im Unternehmen fokussiert, die von einem neuen Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation erkennbar tangiert werden. Im Rahmen jeder Angebotsbearbeitung, die ein technisches System als Lieferumfang enthält, wird ein Systemingenieur für das pneumatische System bestimmt. In der Regel verantwortet dieser Systemingenieur das ihm zugewiesene Projekt über den gesamten Projektablauf, in jedem Fall aber über die komplette Angebotsphase. Er kann neben dieser Aufgabe je nach Projektumfang und Komplexität der technischen Inhalte auch weitere Rollen, wie die Projektleitung, übernehmen. Umfasst das System neben der Pneumatik auch Leittechnik, stimmen sich Systemingenieur und Leittechniker ab. Um die jeweiligen Systemreviews durchzuführen, müssen sich beide wiederum mit einem für die Reviews Verantwortlichen abstimmen, der die Freigabe erteilt. Wenn später vom Projektierer die Rede sein wird, dann ist damit der hier vorgestellte Systemingenieur gemeint.

Auf Grund der positiven Geschäftsentwicklung der letzten Jahre sind zu den sehr erfahrenen Mitarbeitern viele neue Ingenieure eingestellt worden. Gerade für diese Mitarbeiter scheinen unterstützende Werkzeuge sehr wichtig. Bei dem ebenfalls großen Anteil an Mitarbeitern mit

hohem Erfahrungsschatz und Expertenwissen ist dagegen mit weniger Verständnis für den Bedarf zusätzlicher Projektierungswerkzeuge zu rechnen, was gegebenenfalls zu einer ablehnenden Haltung führen kann. Eine weitere Erkenntnis aus den Analysen und Gesprächen ist, dass die meisten Mitarbeiter, geprägt durch die hohen Anforderungen an die projektierten Systeme, vor allem bezüglich Sicher- und Zuverlässigkeit eher konservativ handeln. Bewährte Vorgehensweisen, Ansätze und Hilfsmittel werden bevorzugt.

Projektierungsprozess

Der hier untersuchte Projektierungsprozess wird im Unternehmen als „Auftragserringung“ bezeichnet und ist in einer international verbindlichen Prozessdokumentation festgeschrieben. Diese behandelt den gesamten Prozess von der Kundenanfrage über die Angebotserstellung bis – im Erfolgsfall – zur Beauftragung durch den Fahrzeugbauer. Damit entspricht dieser Prozess der in Kapitel 2.2.2 gegebenen Definition. Prinzipiell ist er in zwei Phasen unterteilt.

In der ersten Phase werden Anfragen von verschiedenen Fahrzeugbauern, die an Ausschreibungen von Betreibern oder Leasingunternehmen teilnehmen, bearbeitet. Hier ist eine Koordination der Angebotstätigkeiten erforderlich, um ein einheitliches Preisniveau für vergleichbare Leistungen sicherzustellen. Zunächst wird im Rahmen der Projektakquisition eine Kundenanfrage gestellt. Daraufhin wird geprüft, ob es sich lediglich um ein Produktgeschäft oder um ein Projektgeschäft⁴⁹ handelt. Falls die Anfrage dem Projektgeschäft zugeordnet wird, wird für diese ein Kundenprojekt angelegt und anschließend entschieden, ob ein Angebot erstellt wird oder nicht. Ferner wird der Umfang des Angebotes (Budgetangebot, Optionsangebot oder Vollangebot) festgelegt. Das Vollangebot enthält bereits ein technisch ausgearbeitetes Bremssystem, zu dessen Erstellung wie folgt vorgegangen wird:

Nachdem die Spezifikation des Kunden geprüft und kommentiert wurde, wird im ersten Review die technische Strategie für das Projekt festgelegt. Neben der Auswahl der Hauptkomponenten beinhaltet diese unter anderem eine Zielvorgabe des technischen Standardisierungsgrades sowie die Spannweite des Dokumentationsumfangs. Im Anschluss wird mit der Ausarbeitung des Bremssystems begonnen. Dazu wird im Austausch zwischen den jeweiligen Vertriebs- und den betroffenen Fachbereichen das System detailliert und die Eigenschaften der noch zu entwickelnden Komponenten ermittelt. Die entstehenden Systemdokumente werden im PLM-System CADIM⁵⁰ hinterlegt und daraus die notwendigen Entwicklungsaufträ-

⁴⁹ Ein interner Kriterienkatalog unterscheidet in Produkt- und Projektgeschäft. Vereinfacht ausgedrückt handelt es sich beim Produktgeschäft um Aufträge, die weder Entwicklungs- noch Projektierungsaufwand erfordern.

⁵⁰ Die Produktfamilie CADIM der Fa. Eigner+Partner AG bietet Software-Werkzeuge zur Unterstützung des Informationsmanagements im Produktentwicklungsprozess. CADIM besteht aus verschiedenen Funktionsmodulen, die gemäß den Anforderungen des Kunden zu einer Gesamtlösung – vom einfachen Dokumentmanagement bis hin zum Produkt-/Prozeß- und Lifecycle-Management – konfiguriert werden. CADIM verfügt über Integrationschnittstellen zu PPS-Systemen, Office-Applikationen und zahlreichen CAD-Systemen. (TANNERDOKUMENTS GMBH+CO 1999) - (Anm. des Autors: Eigner wurde im Jahr 2003 von der Agile Software GmbH übernommen)

ge⁵¹ (EA) angelegt. Durch die Bearbeitung dieser Entwicklungsaufträge ergeben sich Schätzungen, Einbauzeichnungen, Produktdokumentation und Untersuchungen mit zugehörigen Berichten. Auf dieser Basis kann ein technischer Angebotsentwurf erarbeitet werden, für den im zweiten Review die Systemfreigabe für das Angebot erteilt wird. Zum Abschluss dieser Phase wird das Angebot mit allen Sonderleistungen kalkuliert und schließlich nach der kaufmännischen Freigabe dem Kunden übergeben. Abbildung 5-9 zeigt den hier beschriebenen Prozess.

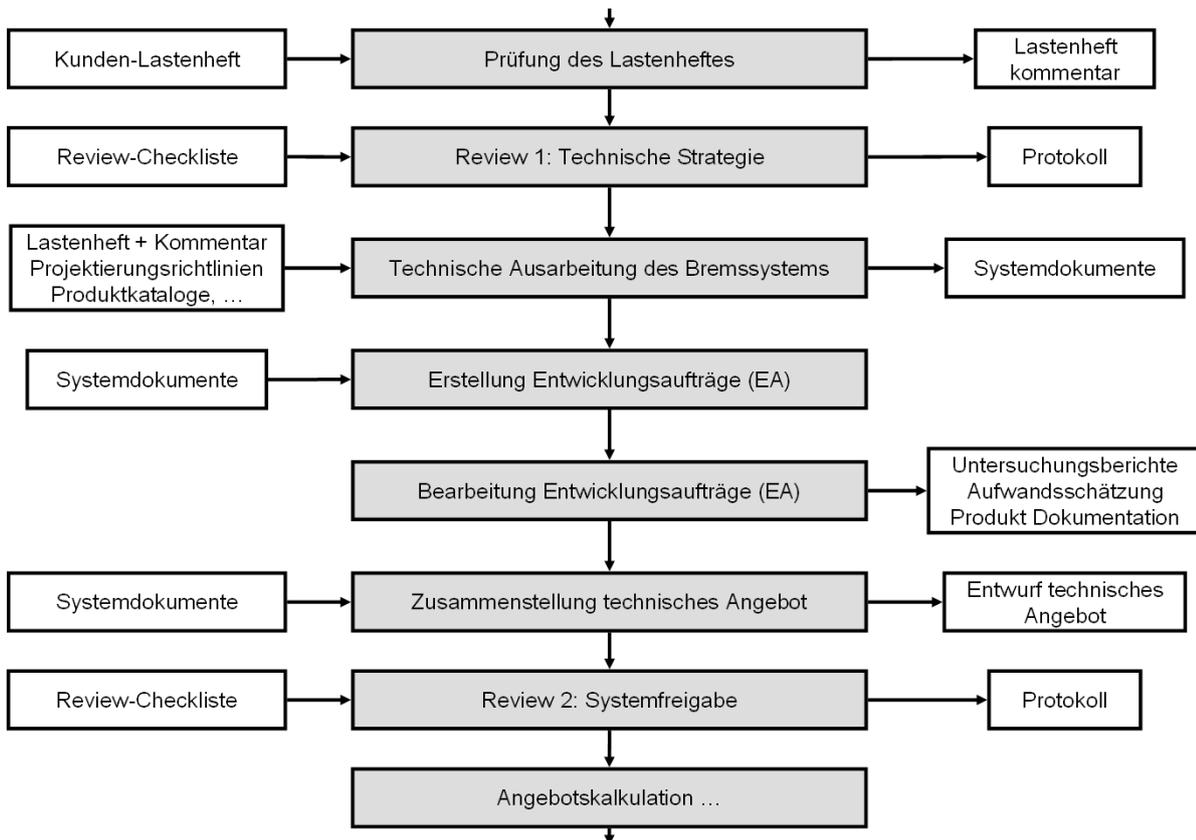


Abbildung 5-9: Ausschnitt des Projektierungsprozesses

Mit der Erteilung des Zuschlags an einen Fahrzeugbauer beginnt die zweite Phase, in deren Kern die Angebotsverhandlungen mit diesem Hersteller stehen. Ergeben sich dabei Änderungen an Systemumfang oder Ausprägung, kann es notwendig sein in der Prozesskette zurückzuspringen und das technische System zu modifizieren oder neu zu projektieren. Sobald Einigung erzielt wurde, folgt der Vertragsabschluss und der nächste Prozess „Auftragsabwick-

⁵¹ Entwicklungsaufträge, kurz EA, dienen der Abwicklung und Steuerung (über Reviews) von Entwicklungsaufgaben. Es wird zwischen „Bauanträgen“ (Typ BAU), „Untersuchungsanträgen“ (Typ UNT) und „Betreuungsanträgen“ (Typ BETR) unterschieden. Ziel eines Bauantrages ist die Erzeugung einer verkaufsfähigen Sachnummer. Ein Untersuchungsauftrag führt zu einem Dokument (Versuchsbericht, Gerätebeschreibung, Berechnung u.ä.). Betreuungs - EA's dienen zur Erfassung von Zeiten, die keinem spezifischen, bereits existierenden EA zugeordnet werden können. (KNORR-BREMSE 2009, S. 7)

lung“ kann gestartet werden. Bei negativem Ausgang der Verhandlungen muss nach den Gründen für den Auftragsverlust gesucht werden.

Werkzeuge

Im Rahmen der Projektierung von Bremssystemen werden viele zum Teil sehr unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt, um ein hohes Maß an Auslegungsqualität zu erreichen. Als Beispiel hierfür kann die sogenannte werkzeuggestützte Bremsberechnung herangezogen werden. Aus fahrzeugspezifischen Parametern wie Fahrzeugmasse bezogen auf Drehgestelle bzw. Radsätze, Raddurchmessern (Laufkreisdurchmesser), projektiertem Bremssystem (Bremsaktuatorik und Steuerung), Fahrwiderstand und Beladungszuständen (nach DIN25008:2005-10) werden unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Bremskonzepten, Bremsdruckaufbau- und Abbauzeiten sowie dem erwarteten Rad-Schiene-Kontakt die erforderlichen maximalen Bremszylinderdrücke für unterschiedliche Bremsfälle berechnet. Beispiel sind dafür neben der Schnellbremsung als wichtigsten Bremsfall diverse Ausfallszenarien. Als Anforderungen liegen all diesen Berechnungen im Wesentlichen Bremswege aus verschiedenen Bremsausgangsgeschwindigkeiten zu Grunde. Dieses und andere untersuchte Werkzeuge arbeiten ohne wesentliche Verknüpfung zueinander mit Ausnahme von Schnittstellen zum PLM-System, welches bereits im Rahmen der Prozesse erwähnt wurde. Letztlich ergab die Analyse der im Unternehmen eingesetzten Projektierungswerkzeuge keine direkten Anforderungen für das hier beschriebene Projekt.

5.1.3 Ergebnisse der Analysephase

Entsprechend der Entwicklungs- und Einführungsmethodik ergeben sich aus der Analysephase, neben den Randbedingungen und Anforderungen für das weitere Vorgehen, die Entscheidung für das Simulationswerkzeug als technische Basis sowie die Definition der Ansatzpunkte als Anker im Projektierungsprozess.

Im Rahmen des bereits erwähnten Forschungsprojektes wurde die Simulationssoftware AMESim über einen technischen Benchmark (Kriterien waren unter anderem Genauigkeit der Ergebnisse, Modellierungs- und Validierungsaufwand bei repräsentativen Fragestellungen aus dem Umfeld pneumatischer Bremssysteme) als Tool für die 1D-Pneumatiksimulation zur Systemauslegung ausgewählt. Im Zuge der Toolauswahl wurde untersucht, inwieweit sich dieses Werkzeug als Basis für ein Projektierungswerkzeug eignet. Auf Grund der erwarteten Synergien mit der bereits beschlossenen Nutzung dieses Werkzeuges im Unternehmen und der hohen Flexibilität fiel die Entscheidung auf AMESim. Die Alternative einer intern oder extern zu programmierenden Individuallösung wurde vor allem aus erwartetem Pflegeaufwand und Kostengründen verworfen.

Als Ansatzpunkte im Projektierungsprozess wurden durch die Prozessanalyse und ein Stakeholdermodell folgendes ermittelt: Die „technische Ausarbeitung des Bremssystems“ ließe sich durch ein zur Verfügung gestelltes Projektierungswerkzeug direkt unterstützen. Die Absicherung der Systementwürfe könnte durch eine Beauftragung von Simulationsrechnungen im Rahmen der „Erstellung der Entwicklungsaufträge“ erfolgen. Außerdem bestünde die Mög-

lichkeit, die Nutzung eines Projektierungswerkzeuges im Rahmen der „Systemfreigabe“ im zweiten Review abzufragen.

5.1.4 gate B – Potentialbewertung

Der Entscheidung über den Eintritt in die Konzeptphase wurde eine Gegenüberstellung von erwarteten positiven Effekten (siehe Analyse-Element Potentiale im Bereich der TECHNIK) und dem dafür erforderlichen Aufwand (siehe Analyse-Element Budget im Bereich der ORGANISATION) zugrunde gelegt. Dabei musste berücksichtigt werden, dass in diesem Fall die pneumatische Systemsimulation nicht ausschließlich zum Zweck der Projektierungsunterstützung, sondern vor allem auch zur Unterstützung der Produkt- und Systementwicklung eingeführt wird. Dadurch reduziert sich der Anteil des anfallenden Aufwandes, welcher der Entwicklung des Projektierungswerkzeuges zugeordnet werden kann, erheblich. Die Gegenüberstellung von Aufwand (Aufwand für Entwicklung und Einführung sowie zur laufenden Nutzung, Pflege und Weiterentwicklung) und Nutzen (erwartete erhöhte Qualität der Projektierung – kostenoptimierte Systeme und daraus folgende Umsatz- bzw. Gewinnerhöhung) begründete die Entscheidung zur Freigabe des *gate B – Potentialbewertung* und damit den Eintritt in die Konzeptphase.

5.2 Phase II - Konzept

Die Konzeptentwicklung und -auswahl bildet den Kern der Phase II. Bevor darauf detailliert eingegangen werden kann, sollen zum besseren Verständnis einige der definierten Randbedingungen und Anforderungen vorgestellt werden, aus denen eine Anforderungsliste für die Konzeptbewertung und -auswahl entwickelt wurde.

5.2.1 Randbedingungen und Anforderungen

Grundsätzlich gelten bei jeder Anwendung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik die dort allgemein formulierten Anforderungen (siehe Kapitel 3.2). Darauf aufbauend ergaben sich in der Fallstudie als Leitplanken der Konzeption und Umsetzung des Werkzeuges verschiedene Anforderungen und Randbedingungen, die im Folgenden an Hand von Beispielen kurz vorgestellt werden:

Mit der Entscheidung für die Simulationssoftware AMESim und den im Forschungsprojekt ausgewählten Simulationsansatz sowie den daraus resultierenden Vorgaben (Strukturierung der Systeme, Bibliothek, Ablauf einer Simulation) sind die wesentlichen Randbedingungen auf technischer Seite vorgegeben. Hinzu kommt die mögliche Nutzung der bestehenden technischen Systeme, wie z.B. die Anbindung an das vorhandene PLM-System, welches eine Verknüpfung zwischen technischem und organisatorischem Ablauf des Projektes darstellt.

Darüber hinaus ist es die Aufgabe dieser Werkzeugentwicklung, die am Projektierungsprozess beteiligten Rollen (Projektierer, Projektleiter, Berechner, etc.) bei der Definition der Abläufe zur Nutzung des Projektierungswerkzeuges entsprechend ihrer bisherigen Aufgaben zu

berücksichtigen. Die Matrixorganisation gilt dabei grundsätzlich als nicht änderbar. Daraus muss abgeleitet werden, dass das Werkzeug in die aktuelle Aufbauorganisation eingefügt werden muss.

Aus der Analyse in Phase I ergab sich unter anderem, dass das Thema Sicherheit der Systeme bei den betroffenen Mitarbeitern den höchsten Stellenwert genießt. Daraus ergibt sich eine klare Präferenz für bewährtes Vorgehen und auch im Weiteren eher konservative Betrachtungsweisen. Hieraus lassen sich verschiedene Anforderungen an das Werkzeug und dessen Entwicklung ableiten. So gilt es, erfahrene Mitarbeiter einzubinden, um sie als Multiplikatoren zu nutzen, und damit Widerstände von Anfang an zu vermeiden. Dabei ist es wichtig, das Werkzeug, seine Nutzung und das Thema Absicherung der Ergebnisse möglichst transparent zu gestalten. Die Verantwortung für die Simulationsergebnisse und deren Interpretation muss klar und eindeutig geregelt sein und die jeweiligen Fähigkeiten der betroffenen Rollen dürfen nicht überschritten werden. Es muss letztlich den Nutzern leicht möglich sein, zu erkennen, welche Ergebnisqualität sie erwarten dürfen, da dadurch Akzeptanz oder sogar Vertrauen entwickelt werden kann.

Diese und weitere Themen wie z.B. die einfache Handhabbarkeit oder ein geringer Schulaufwand wurden für die Konzeptauswahl zu konkreten Anforderungen verdichtet.

5.2.2 Formulierung konkreter Anforderungen zur Konzeptauswahl

Auf Basis der oben beschriebenen Randbedingungen und Anforderungen aus den Bereichen TECHNIK und ORGANISATION wurden für die später durchzuführende Konzeptauswahl konkrete Anforderungen zur besseren Vergleichbarkeit gebildet. Es ergaben sich folgende Anforderungsgruppen, welche wiederum in Einzelkriterien untergliedert werden konnten:

Kosten & Personalaufwand: Es gibt nahezu keinen Bereich, in dem nicht der Wirtschaftlichkeit einer Neuerung sehr hohe Bedeutung zugemessen wird. Das führt in diesem Fall dazu, dass zur Konzeptbeurteilung die Themen Kosten und Personalaufwand besonders wichtig sind. Dabei müssen die Kosten bzw. der Aufwand für die Erstellung des Projektierungswerkzeuges (Erstsystem) ebenso verglichen werden wie die laufenden Kosten zur Pflege und Weiterentwicklung. Darüber hinaus kann die Frage nach den erforderlichen Softwarekosten für Lizenzen ein entscheidendes Kriterium für die Entscheidung für oder gegen ein Konzept sein. In diesem Bereich wurden außerdem Obergrenzen als KO-Kriterien festgelegt.

Qualität der Simulationsergebnisse ist, was eine sinnvolle Verwendung des Werkzeuges angeht, das wichtigste Entscheidungskriterium. Idealerweise sind das Gesamtmodell des Systems sowie die gegebenenfalls auszuwählenden Komponenten, die im Projektierungswerkzeug verwendet werden, bereits vorab vollständig verifiziert und validiert. Andererseits ist es auch möglich, jeweils nach der Simulation die Ergebnisse zu validieren. Dies kann allerdings zu hohem Aufwand führen und möglicherweise einen flächendeckenden Einsatz des Projektierungswerkzeuges verhindern, da es die Anwendung in die Länge ziehen würde und auch hohen Personalaufwand erfordert. Mit dem ausgewählten Simulationsansatz ist es wahrscheinlich, dass im Rahmen der Systemsimulation eine Komponentenbibliothek zum Einsatz kommt. Ebenfalls aus Gründen der Qualität und der Problematik der Validierung der Ergebnisse muss es möglich sein, eine Vorauswahl der Bibliothekskomponenten bei deren Verwen-

dung während der Anwendung des Projektierungswerkzeuges zu treffen. Darüber hinaus ist die Möglichkeit die Parametrisierung des Systemmodells bzw. seiner Systemelemente einzuschränken ein wichtiges Entscheidungskriterium.

Flexibilität: Wenn eben erwähnt wurde, dass das Projektierungswerkzeug diverse Einschränkungsmöglichkeiten besitzen soll, um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen, dann steht dies im Konflikt zum nun folgenden Wunsch nach Flexibilität. Flexibilität steht dabei für den Wunsch, jede mögliche Systemkonfiguration mit dem Projektierungswerkzeug untersuchen zu können. Auf weitere ähnliche Konflikte wird später eingegangen. Dabei wird neben den angesprochenen Sonderfällen auch die Eignung für wiederkehrende, sogenannte Standardfragestellungen beurteilt.

Zeitaufwand: Die Beurteilung des Zeitaufwandes wurde in drei Teilaspekte unterteilt. Zunächst wird verglichen, wie viel Zeit die Einarbeitung in das Werkzeug benötigt. Ein hoher Aufwand hier kann die Einführung erschweren und dadurch auch die Akzeptanz von vornherein einschränken. Daraus ergibt sich, dass eine möglichst kurze Einarbeitungszeit angestrebt werden sollte, um den Nutzer in das Werkzeug einzuweisen. Unter Zeitaufwand wird weiter die benötigte Zeit der Bedienung verglichen. Darunter ist die Zeit zu verstehen, welche benötigt wird, um das Projektierungswerkzeug dahingehend mit Informationen zu versorgen, dass die im Mittelpunkt stehende Frage damit untersucht werden kann. Als letzter Untersuchungspunkt wird darüber hinaus die Gesamtzeit zwischen der Problemerkennung und dem Ergebnis aus den Untersuchungen mit dem Projektierungswerkzeug erfasst und bewertet.

Benutzerfreundlichkeit: Unter diesem Schwerpunkt werden allgemeine Kriterien für die Bewertung gesammelt, die mit der Anwendung zusammenhängen. Dabei handelt es sich um die Frage, wie das jeweilige Konzept bezogen auf die visuellen Darstellungsmöglichkeiten ausgestattet ist. In Kombination mit der Frage nach einer einheitlichen, möglichst automatisierten Dokumentation steht dieser Punkt für die korrekte Darstellung der Berechnungsergebnisse aus der Systemsimulation. Selbstverständlich wird auch die Nutzerführung, soweit vorhanden, bzw. die Navigation und Bedienung im Allgemeinen bezüglich Ergonomie und Verständlichkeit verglichen.

Für die Konzeptbewertung wurde der qualitative Vergleich der jeweiligen Ausprägungen als ausreichend eingeschätzt. Auftretende Extremwerte wurden darüber hinaus zusätzlich untersucht und berücksichtigt. Um mögliche Zielkonflikte früh zu identifizieren, ist eine Konsistenzmatrix erstellt worden, welche die Abbildung 5-10 zeigt.

Die für eine Konsistenzmatrix übliche Darstellung von variierenden Zusammenhängen wurde aus Übersichtlichkeitsgründen nicht verwendet. Variierende Zusammenhänge sind dabei Konsistenzen, welche bei der Beurteilung nicht außer Acht gelassen werden sollten, aber keinen entscheidenden Einfluss für die Bewertung der Konzepte haben. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden und der Fokus auf die ermittelten Zielkonflikte gerichtet werden.

Ein Zielkonflikt ergibt sich in der Regel zwischen den Kosten bzw. dem Aufwand für die Ausarbeitung des Projektierungswerkzeuges und seines Erstsystems auf der einen Seite, und den Kosten und dem Aufwand für Nutzung, Pflege und Weiterentwicklung auf der anderen Seite. Ein reduzierter Aufwand in der Entwicklungsphase wird in der Regel zu erhöhten Kos-

ten in der späteren Nutzungsphase führen. Die dort zu erwartende Multiplikationswirkung (mehrere Nutzer etc.) führt dazu, dass im Konfliktfall zwischen diesen beiden Kriterien der Aufwand für das Erstsysteem als weniger wichtig beurteilt wird.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Kosten & Personalaufwand	Entwicklung des Erstsystems	1												
	Systempflege & Weiterentwicklung	2	Z											
	Softwarelizenzen	3									Z			
Qualität der Ergebnisse	Gesamtsystem	4					Z							
	Wahl der Parameter	5					Z							
Flexibilität	Sonderlösungen	6											Z	
	Standardlösungen	7												
Zeitaufwand	Einarbeitungszeit	8												
	Dauer der Simulation insgesamt	9												
	Zeit zur Anwendung	10												
Benutzerfreundlichkeit	Aussagekraft der Visualisierung	11												
	Dokumentation	12												
	Bedienung und Menüführung	13												

Z: Zielkonflikt

Abbildung 5-10: Konsistenzmatrix zur Darstellung von Zielkonflikten zwischen den Bewertungskriterien

Das Ermöglichen von Sonderlösungen als Unterpunkt der Flexibilität steht wahrscheinlich im Konflikt mit mehreren anderen Kriterien. Die Einschränkung beim Zugriff auf die Bibliotheken steht im Widerspruch zur Flexibilität, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit für Sonderlösungen benötigt wird. Diese Sonderlösungen führen außerdem dazu, dass eine Verifikation des Modells im Vorfeld, also während der Erstellung des Projektierungswerkzeuges nicht möglich ist – was somit entgegen dem Unterpunkt Gesamtsystem im Bereich Qualität spricht. Mit der negativen Beeinflussung im Bezug auf die standardisierte Ergebnisdokumentation, welche für Sonderlösungen nur bedingt realisierbar ist, wurde die Bedeutung der Anforderung nach Abbildung von Sonderlösungen geringer eingestuft, um den anderen als wichtiger beurteilten Anforderungen gerecht zu werden.

Es muss davon ausgegangen werden, dass eine reduzierte Anzahl an Softwarelizenzen zur Folge haben kann, dass die zeitliche Dauer bis zum Erhalt der Simulationsergebnisse aus Ressourcenengpässen negativ beeinflusst wird. Dies ist allerdings stark konzeptabhängig und die Verlängerung durch diese Engpässe ist bezogen auf die Gesamtdauer als gering einzuschätzen. Darüber hinaus sind derartige Verzögerungen, solange sie im Bereich weniger Tage liegen, in der Regel unkritisch, da der Projektierer anderen Tätigkeiten nachgehen kann. Die Erfahrungen aus der Systemsimulation mit AMESim hatten im Vorfeld außerdem gezeigt, dass die Berechnungszeiten bei den hier relevanten Fragestellungen maximal im Minutenbereich verbleiben, so dass die Lizenzeinsparung im Rahmen der Kriterienbewertung den Vorzug erhalten kann.

Bei der späteren Bewertung werden diese Kriterien verwendet, um das am Besten geeignete Konzept auszuwählen. Es bleibt zu beachten, dass die ermittelten Randbedingungen und Anforderungen aus den Bereichen TECHNIK und ORGANISATION zwar nicht vollumfänglich in den hier genutzten Bewertungskriterien aufgeführt sind. Sie haben dennoch volle Gültigkeit und werden dadurch berücksichtigt, dass nur Konzepte zur Auswahl zugelassen wurden, die diesen Vorgaben entsprechen.

5.2.3 Konzepterstellung

Im Rahmen der *Konzepterstellung* wurden unter Zuhilfenahme verschiedener Methoden (Brainstorming, Expertengespräche, morphologischer Kasten, systematische Variation, Stakeholder-Modell etc.) in einem iterativen Prozess fünf erfolgversprechende Konzepte erarbeitet. Abbildung 5-11 (Darstellung in angepasster UML) veranschaulicht, dass der entscheidende Unterschied zwischen den Konzepten in der Zusammenarbeit und Aufteilung der Projektierungs- und Simulationsschritte zwischen Projektierer und Simulationsteam liegt.

Dargestellt sind die Informationsflüsse zwischen diesen beiden Parteien und die Werkzeuge bzw. Schnittstellen, mit denen die Kommunikation zu Modellen auf der einen und zur Simulation auf der anderen Seite stattfindet. Die Abbildung zeigt, wer die erforderlichen Systemmodelle erstellt, bzw. bearbeitet und wer die Simulationen durchführt und auswertet. Hierzu ist ein Blick in den artverwandten Bereich der FEM-Simulation sinnvoll. Im Bereich der Konstruktion werden häufig das Erstellen der Geometrie und der Aufbau der Modelle, sowie der eigentliche Festigkeitsnachweis strikt voneinander getrennt. Das geht soweit, dass die FEM-Simulation oftmals von einer anderen Person oder sogar Firma durchgeführt wird (HERFELD 2007). Man erkennt, dass dieses Vorgehen bei einigen der im Folgenden vorgestellten Konzepte ebenfalls berücksichtigt wurde, da dort die Modellierung und die Simulation teilweise, bzw. vollständig voneinander getrennt wurden.

Es hat sich gezeigt, dass die Schnittstellen zwischen den Nutzern der Simulation und der Simulation selbst von entscheidender Bedeutung für die Ausarbeitung möglicher Projektierungswerkzeuge sind. Sie dienen außerdem dazu die Konzepte zu unterscheiden. Die beiden Rollen Projektierer und Simulationsteam sind durch einfache Symbole wiedergegeben. Damit lässt sich die Interaktion untereinander und im Bezug auf die Simulation darstellen. Die Darstellung des Themas Simulation (unten) umfasst dabei die in AMESim verwirklichten und in eckigen Kästen dargestellten Aspekte „Modell“ und „Simulation“. Die unterschiedlichen Pfeile repräsentieren die fünf im Rahmen der Konzeptphase erarbeiteten Konzepte, welche in den folgenden Absätzen vorgestellt werden. Der Fokus liegt dabei auf Modellerstellung, Parametrisierung sowie der Möglichkeit zu deren Einschränkung, Simulationsdurchführung, Auswertung, Berichtserstellung und Ressourcenbedarf. Allen Konzepten ist gemein, dass die Auslegung der Systeme, bzw. Subsysteme über Simulation am Rechner stattfindet.

AMESim-Konzept: Der Projektierer übernimmt die komplette Simulationsaufgabe und erhält hierzu vollständigen Zugriff auf die Simulationsumgebung AMESim. Zur Auslegung erstellt er ein Modell für das zu projektierende System aus Ventilen einer Modellbibliothek (z.B. Ventile) und zusätzlichen Systemkomponenten (z. B. Leitungen und Signale). Falls bereits vorhanden kann er auf Modelle ähnlicher Systeme und deren Auslegung zurückgreifen. Die Modellerstellung, wie auch die Definition der Parameter und die abschließende Analyse der Ergebnisse, ist in keiner Weise eingeschränkt, was die Validierung der Ergebnisse vorab nahezu unmöglich macht. Dies hat zur Folge, dass ein derartiges Projektierungswerkzeug dem Projektierer zwar die Möglichkeit gibt, konkrete Fragestellungen während der Systemauslegung zu untersuchen, er aber hierzu, neben seinen Fähigkeiten als Projektierer, auch Fachmann für die Themen Modellbildung und Systemsimulation sowie Fluidodynamik sein muss. Dem Simulationsteam obliegt in diesem Konzept lediglich die Pflege der Modellbibliothek.

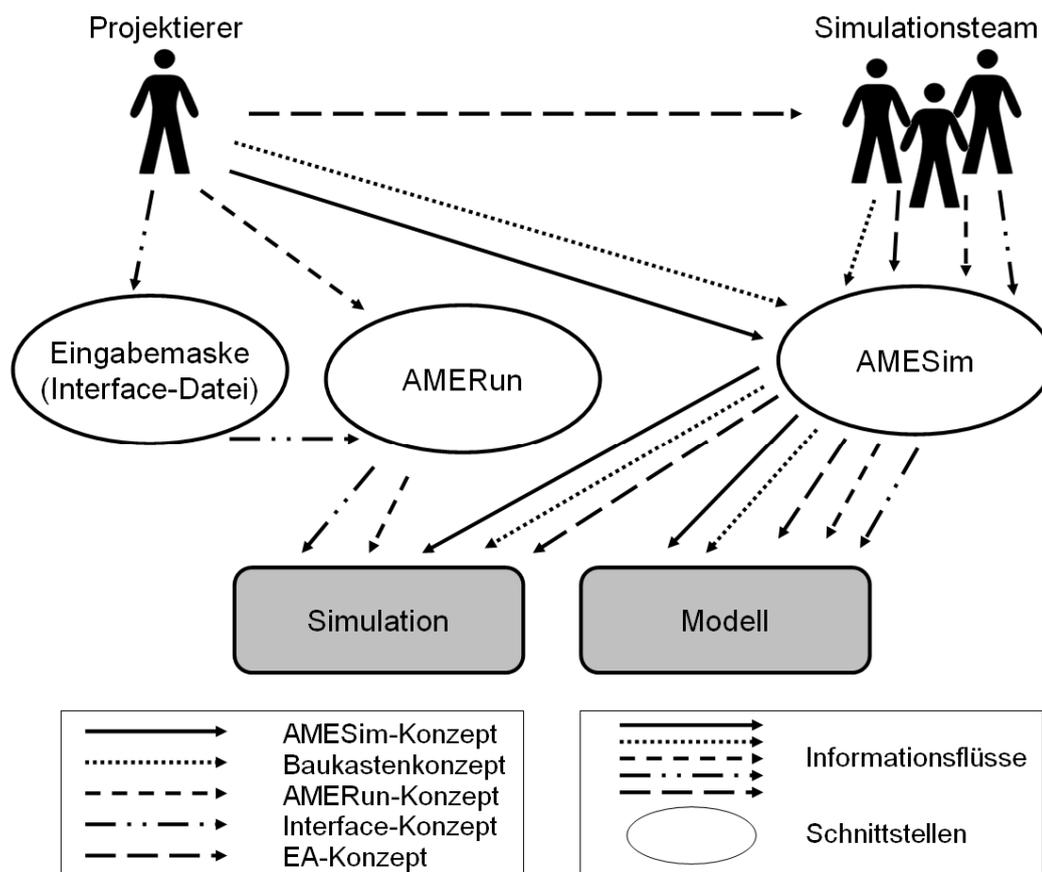


Abbildung 5-11: Mögliche Zusammenarbeit zwischen Projektierer und Simulationsteam

Baukastenkonzept: Dieses Konzept unterscheidet sich zum vorangegangenen dadurch, dass dem Projektierer während seiner Arbeit mit AMESim an Stelle der Modellbibliothek aus Ventilen und Systemelementen ein Systembaukasten mit vorgefertigten Systemen und Teilsystemen zur Verfügung steht. Diese Module bestehen aus mehreren Komponenten und sind, bezogen auf vorab definierte Parameterbereiche, verifiziert und validiert, was einen hohen Aufwand während der Erstellung und Pflege durch das Simulationsteam bedeutet. Die Module kann der Projektierer mit Elementen aus den Standardbibliotheken von AMESim erweitern, was zu einer Einschränkung der vorangegangenen Systemvalidierung führen kann. Über die Parametrisierung wird das im Wesentlichen aus Systembausteinen bestehende Modell an die Realität angepasst. Da eine Parametereinschränkung auf abgesicherte Wertebereiche in AMESim nicht vorweg zu bewerkstelligen ist, muss der Projektierer auf die vorab abgesicherten Wertebereiche hingewiesen werden. Absolute Sicherheit, dass er diese berücksichtigt, kann nicht hergestellt werden. Nach Simulation kann der Projektierer die für ihn relevanten Systemgrößen auswählen und mit AMESim analysieren oder in andere Programme zur Untersuchung exportieren. Automatisierte Berichte sind nur mit Einschränkungen möglich, da die Systeme große Varianz beinhalten. Standardberichtsvorlagen sind denkbar.

AMERun-Konzept: Der Projektierer verwendet in diesem Konzept zur Systemsimulation durch das Simulationsteam vorher erstellte Modelle, welche er in AMERun durch Parametrisierung an sein System anpasst. Die durch das Simulationsteam entwickelten, verifizierten und abgesicherten Systemmodelle müssen dazu dem realen System im Aufbau entsprechen.

Hierfür sind wegen der hohen Varianz im Aufbau der Systeme sehr viele Systemmodelle erforderlich, was zu sehr hohem Aufwand für Erstellung, Verifikation und Validierung im Vorfeld, bzw. im Bedarfsfall ad hoc führt. Ein hoher Wiedererkennungseffekt und damit ein einfacher Einstieg für den Projektierer in das Werkzeug ergeben sich durch die Anpassung der grafischen Darstellung (AMECustom) an die pneumatischen Übersichtspläne der Projektierungsabteilung. Das Simulationsteam kann in AMERun bei diesen Systemmodellen die durch den Projektierer zu definierenden Parameter vorgeben, dabei aber nicht die Wertebereiche einschränken. Dadurch bleibt die Möglichkeit, dass während der Parametrisierung der abgesicherte Bereich des Systemmodells verlassen wird. Der Projektierer kann die Simulation selbstständig durchführen und auch deren Ergebnisse auswerten (in AMERun oder über Datenexport). Standardroutinen in anderen Programmen können vom Simulationsteam zur automatischen Berichtserstellung zusätzlich erzeugt werden.

Interface-Konzept: Die vollständige Trennung von Projektierer und Simulationsprogramm erfolgt in diesem Konzept. Das Simulationsteam erstellt ein möglichst flexibles Systemmodell in AMESim und erzeugt dazu eine Interfacedatei, welche der Projektierer mit den Fahrzeugdaten füllt. Da auch für ein flexibles Systemmodell Strukturen festzulegen sind, kann dieses Konzept nur bekannte Fragestellungen bedienen. Die Wertebereiche lassen sich dabei durch das Simulationsteam entsprechend der vorangegangenen Versuche zur Validierung einschränken. Die z.B. in Microsoft Excel erzeugte Interfacedatei (Vorteil: bekanntes Programm) kann über automatische Abläufe den Projektierer durch die Dateneingabe führen und dann auf Knopfdruck den Datenaustausch sowie die Simulationsdurchführung in AMESim oder AMERun (Abbildung 5-11 zeigt Lösung mit AMERun) automatisch durchführen und dabei gleichzeitig standardisierte Berichte erzeugen. Die Simulation wird, wie oben erwähnt, automatisch von außen gesteuert. Eine Einarbeitung in das verwendete Simulationsprogramm ist ebenso nicht zwingend erforderlich wie besondere Kenntnisse zum Thema Systemsimulation.

EA-Konzept: Die Verwendung des bereits vorhandenen EA-Prozesses bildet den Kern dieses Konzeptes. Der Projektierer veranlasst die Systemsimulation, indem er einen Entwicklungsauftrag (EA) stellt. Dabei beschreibt er das System und die Fragestellungen und liefert die erforderlichen Fahrzeugparameter in Form eines Pflichtenheftes. Um die Pflichtenhefterstellung effizient zu gestalten, sind Vorlagen denkbar, die die erforderlichen Informationen abfragen. Nach gegebenenfalls erforderlicher Klärung der Pflichtenheftinhalte zwischen Simulationsteam und Projektierer kann dieser auf Basis einer Aufwandsschätzung (für Modellierung, Simulation, Validierung und Dokumentation) die Simulation beauftragen. Das Simulationsteam modelliert das System (soweit möglich aus bestehenden Komponenten), simuliert die gegebene Fragestellung und dokumentiert die Ergebnisse in einem Bericht. Bevor dieser freigegeben werden kann, müssen je nach Neuheitsgrad der Fragestellung die Unschärfen angegeben und möglicherweise Validierungsversuche durchgeführt werden. Mit den durch Vorvalidierung und automatisierten Abläufen im Bedarfsfall deutlich schnelleren und kostengünstigeren vorangegangenen Konzepten kann dieser Entwurf bezogen auf Zeitaufwand und Kosten nicht konkurrieren.

5.2.4 Konzeptbewertung und -auswahl

Aus den Beschreibungen der Konzepte lassen sich die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Lösungen erkennen. Abbildung 5-12 zeigt das Ergebnis der zur Entscheidungsfindung durchgeführten gewichteten Punktbewertung, welche auf Basis der aus den Anforderungen und Randbedingungen erarbeiteten Kriterien erfolgte. Die Tabelle stellt die jeweilige Bewertung bereits multipliziert mit dem vorab definierten Gewichtungsfaktor dar. Das Ergebnis ist in der Tabelle unten angetragen.

		Kriterium	Gewichtungsfaktor	AMESim-Konzept	Baukastenkonzept	AMERun-Konzept	Interface-Konzept	EA-Konzept
Kosten & Personalaufwand	Entwicklung des Erstsystems	1	2	4	2	4	0	2
	Systempflege & Weiterentwicklung	2	3	0	3	0	6	0
	Softwarelizenzen	3	2	0	0	0	4	4
Qualität der Ergebnisse	Gesamtsystem	4	2	0	2	2	4	4
	Wahl der Parameter	5	3	0	6	3	6	6
Flexibilität	Sonderlösungen	6	1	2	1	0	0	1
	Standardlösungen	7	3	0	3	3	6	3
Zeitaufwand	Einarbeitungszeit	8	3	0	3	3	6	6
	Dauer der Simulation insgesamt	9	1	0	1	1	1	1
	Zeit zur Anwendung	10	3	0	3	6	6	6
Benutzerfreundlichkeit	Aussagekraft der Visualisierung	11	3	0	3	3	6	6
	Dokumentation	12	2	2	2	2	4	4
	Bedienung und Menüführung	13	3	3	3	3	6	3
Summe				11	32	30	55	46
Rang				5.	3.	4.	1.	2.

Abbildung 5-12: Bewertungsergebnis Konzeptauswahl

Nach dieser Bewertung stellt das Interface-Konzept hinsichtlich der Anforderungen die am besten geeignete Lösung dar. Besonders hervorzuheben als positive Eigenschaften sind die Einschränkungsmöglichkeiten bei der Parametereingabe, das Thema Benutzerfreundlichkeit, Automatisierbarkeit der Berichte, die im Vorfeld mögliche Absicherstellung der Ergebnisqualität und die kurze Einarbeitungszeit. Sehr negativ sind der Aufwand zur Erstellung der Erstsyste-me, sprich der Systemmodelle, und die fehlende Eignung als Analysewerkzeug für neue Systeme bzw. Sonderlösungen. Dennoch fand sich keine andere Lösung, welche insgesamt besser bewertet wurde. Eine Sensitivitätsanalyse dieser Bewertung mit anderen Gewichtungsfaktoren bestätigte das Ergebnis. Es bleibt die Möglichkeit, das Konzept mit einem anderen Konzept zu kombinieren, um die Schwachpunkte in einer Doppellösung auszugleichen. Dies erscheint durchaus sinnvoll zu sein, wenn das Konzept auf Rang 2 betrachtet wird. So schneidet das EA-Konzept gerade in den Schwachpunkten des Interface-Konzeptes sehr gut ab. Derartige Entscheidungen werden, die Phase abschließend, im *gate C - Konzeptfreigabe* diskutiert.

5.2.5 gate C – Konzeptfreigabe

Wie in der Vorstellung des 4-Phasenmodells bereits beschrieben, ist der Eintritt in Phase III, bezogen auf den Aufwand des Projektes, der entscheidende Übergang, da im Folgenden das Projektierungswerkzeug entwickelt und eingeführt werden muss. Auch die Veränderungen auf Seiten der TECHNIK und der ORGANISATION werden hier im Normalfall freigegeben. Bevor damit begonnen wird, sollte im *gate C - Konzeptfreigabe* die Auswahl des Konzeptes hinterfragt und bestätigt werden. Da im Forschungsprojekt die Einführung der Systemsimulation zu Entwicklungszwecken bereits vorab gestartet wurde, ist die Tragweite dieses *gates* hierfür von geringer Relevanz. Es war somit an dieser Stelle nur der Aufwand zur Erstellung des Projektierungswerkzeugs auf Basis der parallel entwickelten Simulationsansätze mit AMESim dessen Einführung und die organisatorischen Änderungen zu legitimieren.

Die Konzeptauswahl favorisiert in ihrem Ergebnis die Lösung „Interfacekonzept“. Um die Eingewöhnung für die Gruppe der Projektierer, die zahlenmäßig deutlich größer ist als das Simulationsteam, zu vereinfachen, wurde die Ausprägung des Konzeptes mit AMESim für die ersten Systeme ausgewählt. Somit werden die Projektierer zunächst nur mit den Schnittstellen zum Projektierungswerkzeug Kontakt haben. Zu einem späteren Zeitpunkt kann dann auf AMERun als Simulationsbaustein des Projektierungswerkzeuges umgestiegen werden, was zur Folge hätte, dass das Simulationsteam entlastet würde. Die dazu erforderlichen zusätzlichen Lizenzen von AMERun lassen sich entsprechend der Anwendung des Projektierungswerkzeuges rechtfertigen. Da die Fähigkeit, auch Sonderfragestellungen zu untersuchen, als zusätzliches Begeisterungsmerkmal bei den Nutzern eingeschätzt wurde, soll das EA-Konzept als Ergänzung zum Interfacekonzept eingeführt werden.

Darüber hinaus wird die Forderung nach Unterstützung der Standardisierung an das Projektierungswerkzeug erneuert. Diese allgemeine Anforderung kann nun bei der Ausgestaltung des Werkzeuges berücksichtigt werden.

Damit wurde das *gate C - Konzeptfreigabe* durchschritten und die Realisierungsphase des 4-Phasenmodells zur Einführung der numerischen Simulation als Projektierungswerkzeug erreicht.

5.3 Phase III – Realisierung

Die Realisierungsphase ist geprägt durch die Detaillierung und Validierung des Werkzeuges, sowie die technische und organisatorische Umsetzung. Außerdem erfolgen im Zuge der Realisierung die Planung der Einführung und deren Umsetzung.

5.3.1 Ausarbeitung des Werkzeuges und Validierung

Da im *gate C - Konzeptfreigabe* schließlich die Entscheidung zu Gunsten der Kombination zweier Lösungskonzepte gefällt wurde, sind für das Projektierungswerkzeug zwei Teile ausgearbeitet worden. Beiden ist gemein, dass der Projektierer als Nutzer kein Fachmann für Systemsimulation pneumatischer Systeme sein muss, und dass der Aufwand zur Einarbeitung auf seiner Seite verhältnismäßig gering ist. Die beiden Ansätze fokussieren jeweils unter-

schiedliche Fragestellungen und können so gemeinsam alle wesentlichen relevanten Probleme, welche während der Auslegung der Pneumatik von Bremssystemen erwartet werden, analysieren. Der Anteil aus dem Interfacekonzept beschäftigt sich dabei mit wiederkehrenden Fragestellungen. Dort lassen sich Teilsysteme untersuchen, deren Varianz, bezogen auf den Systemmodellaufbau begrenzt ist, so dass mit einer überschaubaren Anzahl an Systemmodellen die Simulation zur Untersuchung der Fragestellungen durchgeführt werden kann. Das EA-Konzept deckt parallel dazu Anfragen ab, deren jeweilige Systemmodellstrukturen nicht wiederkehrend sind, so dass die Anzahl der erforderlichen Systemmodelle zu groß wäre, sie vorab verifiziert und validiert bereitzustellen. Im EA-Ansatz erfolgt die Systemsimulation dann in der Form wie auch die Systemversuche, die je nach Bedarf durchgeführt und verifiziert werden. Bevor die Integration beider Ausprägungen in den Prozess erläutert wird, werden sie zunächst in Kombination mit den erforderlichen Rollen genauer beschrieben.

Für die folgende Beschreibung des Projektierungswerkzeuges sind die Rollen Projektierer und Simulationsteam ausreichend. Erstgenannter legt das System entsprechend den Anforderungen des Kunden aus (gegebenenfalls wird er von einem Leittechniker unterstützt). Die hierbei auftretenden Fragestellungen zum pneumatischen System, welche mit Hilfe der Systemsimulation untersucht werden sollen, teilen sich, wie oben beschrieben, auf die beiden Werkzeugausprägungen auf.

Das Simulationsteam, welches das komplette Thema Simulation verantwortet, erstellt im Rahmen des Interfacekonzeptes ein oder mehrere Systemmodelle für eine wiederkehrende Fragestellung. Diese werden derart aufgebaut, dass die wiederkehrenden Systemstrukturen in diesen Modellen so als Rahmen vorgegeben sind, dass durch die Parametrisierung sämtliche fahrzeugtypischen, bzw. kundenprojekttypischen Eigenschaften zugeordnet werden können. Im Rahmen der Systemmodellparametrisierung wählt der Projektierer dabei neben diesen Systemparametern zu verschiedenen Funktionen, wie z.B. *Druck schalten* oder *Druck mindern*, die projektierten Gerätetypen aus.

Für diese Parametrisierung werden durch das Simulationsteam Eingabeformulare und Abfrageroutinen in einem Schnittstellenprogramm erstellt. Im vorliegenden Fall wurde dies in Microsoft Excel mit Hilfe von Visual-Basic-Programmen umgesetzt. Die Systemmodelle werden mit Hilfe von Systemversuchen und Interpolation derer Ergebnisse für einen bestimmten Wertebereich der Parameter verifiziert und validiert, so dass der Projektierer innerhalb dieses Wertebereiches mit dem Projektierungswerkzeug arbeiten kann und eine weitere Validierung in der späteren Anwendung nicht mehr erforderlich ist.

Gerade das Interfacekonzept eignet sich sehr gut dazu, parallel das Thema Standardisierung voranzubringen. Die oben erwähnten Wertebereiche lassen sich so aufbauen, dass sie den in der Standardisierung festgelegten Größenordnungen entsprechen. Außerdem entsprechen die Wahlmöglichkeiten bei der Gerätetyp-Definition dem Kernsortiment des Produktbereiches.

Die in Microsoft Excel erstellten Interface-Dateien erhalten außerdem weitere Programmrou-tinen mit denen zum einen die Interaktion mit AMESim bzw. AMERun und zum anderen die automatisierte Berichtserstellung gesteuert wird. Die Interface-Datei wird dem Projektierer in geschützter Form entweder im Intranet oder in Form von EA-Pflichtenheften zur Verfügung gestellt. Der Vorteil der Variante Bereitstellung im EA-Formular wäre die Ähnlichkeit zu anderen Untersuchungsbeauftragungen, wie sie z.B. für Versuche oder FEM-Simulationen

über das gleiche System verwendet werden. Darüber hinaus lässt sich die Erfassung des Aufwandes, der für die Untersuchung erforderlich war, über den EA-Ablauf auf die jeweiligen Kundenprojekte verrechnen.

Der Projektierer kann im Bedarfsfall die Interface-Datei entsprechend seiner fahrzeug- und projektspezifischen Verwendung des Teilsystems ausfüllen und an das Simulationsteam senden, oder über den EA dorthin weiterleiten. Für das Simulationsteam sind nur wenige, später auch automatisierbare Bearbeitungsschritte erforderlich, um über die entsprechende Programmroutine in der Interface-Datei die Parametrisierung des Modells, die Simulation und die Rückführung der Simulationsergebnisse vorzunehmen, bevor durch Auslösen der automatischen Berichtserstellung und deren Versendung an den Projektierer die Bearbeitung dieser Fragestellung aus Sicht des Simulationsteams abgeschlossen wird. Vor der Rücksendung dieses Berichtes ist vor allem zu Beginn des Werkzeugeinsatzes ein zusätzlicher Plausibilitätscheck der Ergebnisse im Simulationsteam sinnvoll.

Die Interface-Datei wird gemeinsam mit dem zugehörigen Modell durch das Simulationsteam versioniert, so dass an Hand des Simulationsberichtes nachvollzogen werden kann, welches Systemmodell verwendet wurde.

Bei entsprechender Nutzung des Projektierungswerkzeuges soll das Interfacekonzept dahingehend modifiziert werden, dass das Simulationsteam nicht mehr in den Prozess der Projektierung eingebunden werden muss. Dem Projektierer würde hierzu AMERun in Kombination mit einer Bibliothek freigegebener Systemmodelle zur Verfügung gestellt, welche mit den entsprechenden Microsoft Excel Interface-Dateien korrespondieren. Die Schritte Interaktion und Anstoß der automatisierten Berichtserstellung werden dann selbst durch den Projektierer ausgeführt. Dies sollte allerdings nur nach ausreichender Erfahrung mit der Simulation dieses Teilsystems über das Projektierungswerkzeug erfolgen, da in diesem Fall die Plausibilitätsprüfung durch das Simulationsteam entfallen würde. Das eben beschriebene Projektierungswerkzeug für Standardsubsysteme soll im Folgenden mit *PW-Standard (Projektierungswerkzeug-Standard)* abgekürzt werden.

Um Fragestellungen, welche nicht vorhergesehen werden können, bzw. deren Varianz innerhalb möglicher projektspezifischer Ausführungen einen zu hohen Modellierungsaufwand im Vorfeld erfordern würden, mit dem Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation bearbeiten zu können, ist die zweite Werkzeugausprägung erforderlich. Mit Hilfe der Beauftragung über einen EA kann die Systemsimulation in die Auslegung eingebunden werden. Dies erfolgt parallel zur Beauftragung von Entwicklungstätigkeiten und notwendigen Versuchen im Rahmen des Projektierungsprozesses. Es bietet sich dabei an, ähnlich wie zur Komponentenentwicklung, Pflichtenheftvorlagen zu erstellen, welche die Anforderungsklärung unterstützen. Diese sollten mindestens folgende Informationen einfordern:

- Systemkonfiguration – Elemente und Verbindungen (Skizze oder Schaltplan)
- Systemkomponenten (z.B. Volumen in Form von Behältern, Geräten inkl. Sachnummer oder Funktionen mit gegebenenfalls bekannten Geometriedaten)
- Informationen über Verrohrung bzw. Tafelgeometrien und andere Verbindungen wie z.B. Durchmesser und Länge von Rohren oder Anzahl und Art von Krümmern oder anderen Rohrverbindungselementen

- Systemparameter zu Beginn (z.B. Druck, Temperatur, Zustände etc.)
- zu betrachtende Systemgrößen (z.B. Druck, Temperatur oder Massenfluss)
- zu untersuchende bzw. zu ermittelnde Größen (z.B. Druckanstiegszeit, Massenfluss, Gradienten im Druckverlauf oder maximal zulässige pneumatische Widerstände)
- zu untersuchende Parametervariationen in Form von Tabellen
- spezielle Anforderungen / Besonderheiten des zu untersuchenden Subsystems

Mit diesen Informationen kann das Simulationsteam das System modellieren und die Untersuchung mit Hilfe der Simulation aufnehmen. Die Bearbeitung derartiger Fragestellungen benötigt ungleich mehr Aufwand und erfordert gegebenenfalls zusätzliche Versuche zur Absicherung. Dies ist fallbezogen abzuwägen. Sinnvoll kann es sein, mit Hilfe der Systemsimulation die beste mehrerer Lösungen auszuwählen. Eine Bestätigung der Anforderungserfüllung kann, falls erforderlich, durch Versuche erreicht werden.

Das Ergebnis der Simulation wird mit einer Abschätzung der Genauigkeit bzw. mit einem Verweis auf erforderliche zusätzliche Absicherungsversuche in Form eines Berichtes dokumentiert und dem Projektierer zur Verfügung gestellt. Für diesen Bericht sind eine Standardstruktur sowie ein Datenablagekonzept für Bericht, Modelle und Simulationsergebnisse zu erarbeiten. Dieser Teil des Werkzeuges wird mit *PW-Sonder (Projektierungs-Werkzeug-Sonderfall)* abgekürzt.

Auf Basis der Beschreibung des Projektierungswerkzeuges in seinen beiden Ausführungen kann die Anknüpfung an den Projektierungsprozess detailliert werden.

Verankert werden muss das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation an drei Punkten des Projektierungsprozesses. Im Review 1 wird die technische Strategie festgelegt, was bedeutet, dass zunächst das Systemkonzept für das Bremssystem diskutiert und festgelegt wird. Im Anschluss daran erfolgt im nächsten Prozessschritt die technische Erstausrüstung eines Bremssystems auf dem jeweils vorliegenden Kenntnisstand über die Anforderungen des zu projektierenden Fahrzeuges. Dafür sind diverse Hilfsmittel verwendbar wie z.B. Lastenhefte, Projektierungsrichtlinien, Produktstandarddefinitionen und Standardsubsysteme. Diese Hilfsmittel werden zukünftig um das Projektierungswerkzeug *PW-Standard* zur Auslegung der Standardsubsysteme erweitert.

Im Projektierungsprozess werden weiter auf Basis der Systemausarbeitung die notwendigen Entwicklungsaufträge ausgearbeitet. Dies umfasst bislang die Beauftragung von Kundendokumentation, Versuch und Entwicklung. Diese sollen zukünftig um die Beauftragung der Simulation über *PW-Sonder* erweitert werden.

Eine weitere Neuerung ergibt sich im Zuge des zweiten Reviews, welches als technische Freigabe des Angebots verstanden werden kann. Dabei könnte zukünftig abgefragt werden, welche Ergebnisse durch das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation ermittelt wurden und prüfen, ob diese bei der Auslegung berücksichtigt wurden.

Abbildung 5-13 zeigt zusammenfassend den relevanten Teil des Projektierungsprozesses inklusive der drei Ansatzpunkte, an denen die beiden Ausführungen des Projektierungswerk-

zeuges Pneumatiksimulation angreifen. Zur Validierung des Werkzeuges wurden intensive Expertengespräche geführt und eine Prototypenphase für die Einführung vereinbart.

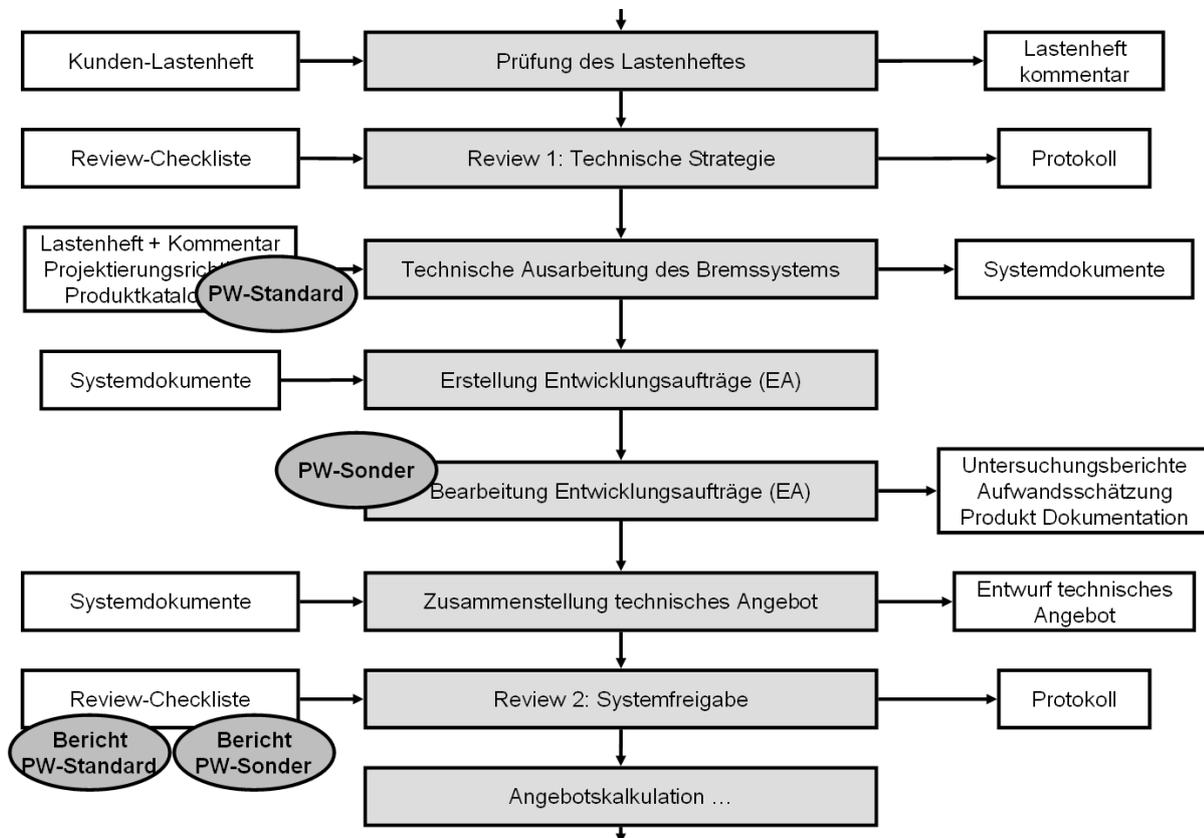


Abbildung 5-13: Integration des Projektierungswerkzeuges in den Prozess der Projektierung

5.3.2 Planung der Einführung

Für den Erfolg einer Einführung ist das Erreichen einer möglichst hohen Anwenderakzeptanz gegenüber dem neuen Werkzeug sehr wichtig. Da dessen Verwendung im vorliegenden Fall optional ist, sollte versucht werden, eine Art Begeisterung für das neue Tool zu wecken. In dieser Phase sollten die Wünsche und Anregungen der späteren Nutzer aufgenommen werden, um Ablehnung nach dem Motto „not-invented-here“ zu vermeiden. Dem Vorschlag der Entwicklungs- und Einführungsmethodik (Kapitel 4) folgend, wurde die Vorgehensweise von BESKOW ET AL. (1999) mit einem Prototypeneinsatz kombiniert. Durch die zusätzliche Prototypenphase wird erreicht, dass eine große Gruppe von Nutzern die Möglichkeit erhält, die Werkzeuganwendung vorab zu testen, und vor der eigentlichen Einführung noch Änderungen einzubringen.

In der Entwicklungs- und Einführungsmethodik wird neben der Einbindung der späteren Nutzer auch ein gestuftes Vorgehen empfohlen. Aus der Entscheidung für den Prototypenansatz und der gestuften Einführung ergeben sich folgende Schritte zum Ziel der vollständigen Einführung (Abbildung 5-14):

- Vorstufe: Einführung eines Prototypen *PW-Standard* (Excel - AMESim) für ein zu definierendes Teilsystem mit Feedback zur Validierung, sowie abgeleiteten Anpassungen am Werkzeug
- Einführung der ersten *PW-Standard* -Anwendung (Excel - AMESim)
- Integration der Standardlastenhefte „Simulation“ im PLM-System CADIM
- Einführung weiterer Ausprägungen von *PW-Standard* (Excel - AMESim) und Verknüpfung *PW-Standard* mit EA-Ablauf (Interface-Datei als Pflichtenheft des EA)
- Umstellung auf AMERun als Ersatz für AMESim in allen *PW-Standard*-Anwendungen

Im Rahmen der Einführungsplanung wurde neben der Abfolge- und der zugehörigen Zeitplanung auch das Thema Schulungen thematisiert. Das ausgewählte Konzept verkörpert ein zweiteiliges Werkzeug, welches ohne besondere Vorkenntnisse in Eigenschaftsfrüherkennung oder Systemsimulation genutzt werden kann. Die Schulung fokussiert deshalb neben der Werkzeuganwendung die Themen Einsatzmöglichkeiten und Vorteile durch die Anwendung. Für die Prototypenphase wurde für die Anwendung des Prototypenwerkzeuges eine schriftliche Handlungsanweisung als ausreichend beurteilt.

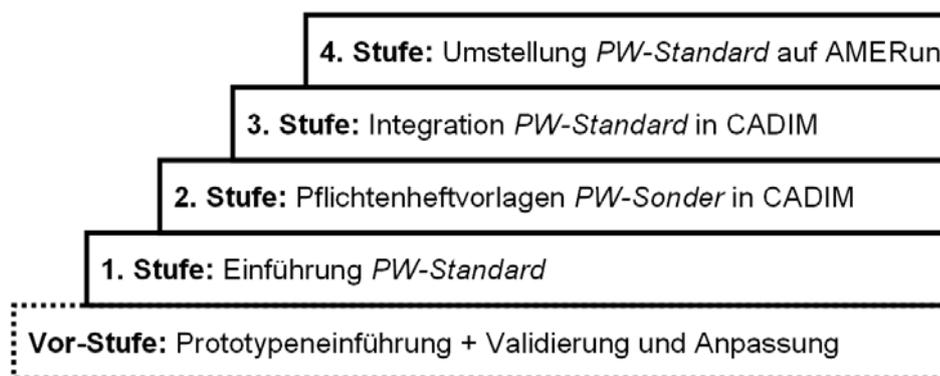


Abbildung 5-14: Stufeneinführung Projektierungswerkzeug

5.3.3 Adaption / Entwicklung Technik

Das 4-Phasenmodell-Element Entwicklung / Adaption TECHNIK ist von besonderer Bedeutung und beinhaltet in der Regel den größten Aufwand. Dies liegt an den beiden Schwerpunkten, die hier vereinigt werden. Zum einen fällt in dieses Element die allgemeine Entwicklung der Systemsimulation, und zum anderen muss auf dieser Basis anschließend das Projektierungswerkzeug ausgearbeitet werden. Da im Rahmen des Forschungsprojektes die Einführung der Systemsimulation auch zu Entwicklungszwecken und zum Aufbau von System-Know-how, sozusagen parallel zur Einführung eines Projektierungswerkzeuges, erfolgte, wurde die allgemeine Systemsimulationsentwicklung, welche die technische Basis dieses Werkzeuges ist, autark von den *gate*-Entscheidungen vollzogen.

Während den Ausführungen zur Einführung wird der im 4-Phasenmodell-Element *Entwicklung / Adaption TECHNIK* entwickelte *PW-Standard*-Prototyp vorgestellt. Zum besseren in-

haltlichen Verständnis dieses Werkzeuges und zur Abschätzung des Aufwandes einer derartigen Entwicklung wird das grundsätzliche Vorgehen zum Aufbau der Pneumatiksimulation im Beispielunternehmen kurz vorgestellt. Im Wesentlichen besteht es aus den folgenden fünf Schritten:

- Systemanalyse
- Zergliederung zur Ermittlung des Modellbedarfs
- Modellierung, Simulation, Verifikation und Validierung von Systemkomponenten
- Aufbau einer Modellbibliothek pneumatischer Komponenten als Basis der Systemsimulation
- Modellierung, Simulation, Verifikation und Validierung von Systemen

Die ersten beiden Schritte können an dieser Stelle mit dem Verweis auf die Ausführungen zur Analysephase in Kapitel 5.1.1 übersprungen werden. Die Abbildung 5-15 veranschaulicht den Zusammenhang der drei weiteren Schritte (1-3) Komponentmodellierung (1) und Aufbau einer Bibliothek (2) als Basis der Systemmodellierung (3). Auf diese Weise kann durch mehrere parallel laufende Modellentwicklungen eine Bibliothek erstellt werden, welche wiederum die Basis für die Modellierung von Systemen ist.

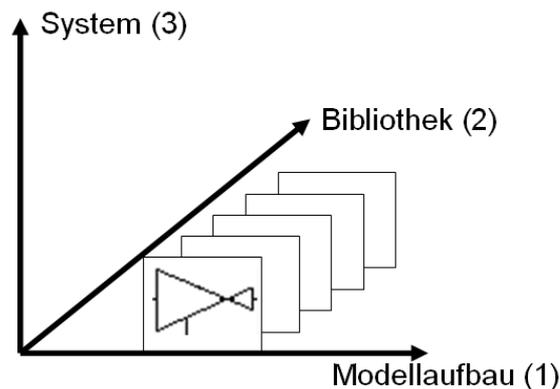


Abbildung 5-15: Modellaufbau, Bibliothek und System

Das Thema Verifikation und Validierung spielt beim Einsatz von Modellen eine entscheidende Rolle. BENDER & SCHILLER (2009) erläutern, wie in Kapitel 2.3.1 erwähnt, grafisch unterstützt die Zusammenhänge von Realität, Modell und Simulationsmodell und die dazwischen liegenden Verifikations- und Validierungsschleifen. Diese Darstellung eignet sich, um den Einsatz von Versuchen für den Abgleich zwischen Modell, Simulationsmodell und Realität zu beschreiben. Dies gilt sowohl für Systemkomponenten, als auch für die Systemsimulation selbst. Abbildung 5-16 zeigt den Regelkreis nach BENDER & SCHILLER (2009) erweitert um die durch System- und Geräteversuche gestützten Schritte.

Bei der Modellbildung und Implementierung der realen Geräte und Systeme werden Versuche benötigt, um Kennwerte, Parameter und Verhalten von Komponenten zu bestimmen und in die Modelle einbringen zu können. Für die Validierung des Simulationsmodells werden Versuche dazu verwendet, die Simulationsergebnisse zu überprüfen und die simulierten Ergeb-

nisse mit der Realität abzugleichen (vgl. Erläuterung zu Verhaltens-, Struktur- und empirische Gültigkeit in Kapitel 2.3.1).

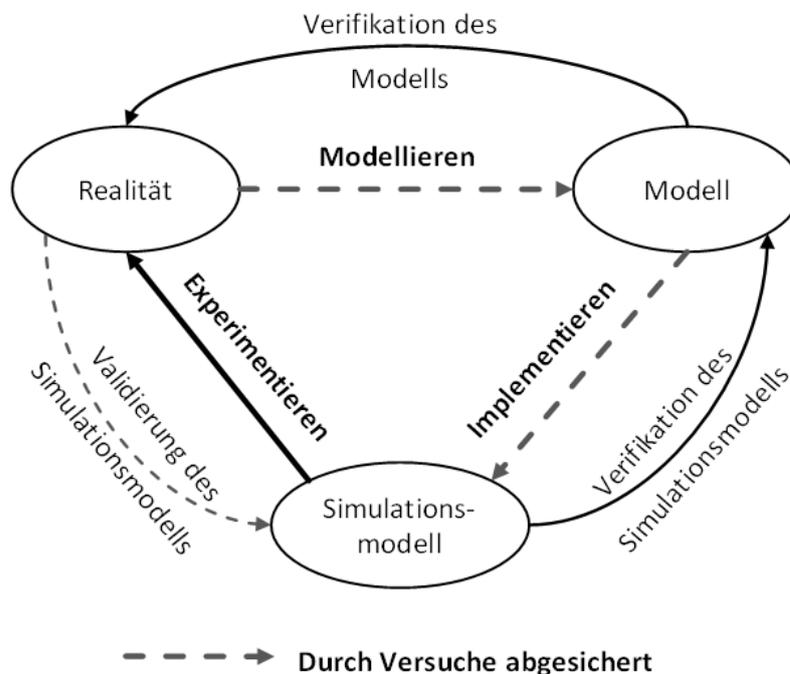


Abbildung 5-16: Ansatz zum Aufbau der Systemsimulation

Am Beispiel eines Relaisventils lässt sich die Art der angewandten Modellierung von Systemelementen anschaulich beschreiben. Dies vermittelt einen Eindruck vom Aufwand, der erforderlich wird, wenn mit derartigen Modellen eine Simulationsbibliothek aufgebaut werden soll.

Für die Funktion *Druck übersetzen* werden in Bremssystemen Relaisventile eingesetzt. Dabei gibt es Ausführungen mit konstantem, einstufigem, mehrstufigem oder stufenlosem Übersetzungsverhältnis. Diese Einstellung kann vordefiniert sein oder mechanisch, elektropneumatisch oder pneumatisch erfolgen. Beim hier vorgestellten Relaisventil handelt es sich um die einfachste Ausführung eines Relaisventils mit konstantem Druckverhältnis.

An diesem Relaisventil liegen vier Drücke an. Dabei handelt es sich um den Atmosphärendruck am Anschluss 0, den Versorgungsdruck R , den Vorsteuerdruck C_v und den Verbrauchsdruck C . Abhängig vom Vergleich der Druckniveaus von C und C_v am mit Membran gedichteten Ventilteller werden die Ventilsitze V_1 und V_2 geöffnet bzw. geschlossen. Solange der Vorsteuerdruck über dem zu steuernden Druck liegt, wird über den Ventilsitz V_1 (V_2 ist dabei geschlossen) der Verbrauchsdruck C mit dem Versorgungsdruck R verbunden. Liegt der umgekehrte Fall vor ($C_v > C$), so verbindet V_2 (V_1 ist dabei geschlossen) den Verbrauchsdruck C mit der Umgebung. Bei Druckausgleich am Ventilteller sind beide Ventilsitze geschlossen.

Abbildung 5-17 zeigt nebeneinander eine Funktionsdarstellung des Ventils und das zugehörige Simulationsmodell in AMESim. Es sind jeweils die Druckanschlüsse, interne Volumen,

sowie die beiden Ventilsitze gekennzeichnet. Wie in der Realität werden je nach anliegender Druckdifferenz C und C_v die Ventilsitze derart gesteuert, dass sich ein relativer Druckausgleich (entsprechend der wirksamen Flächen) am Hauptkolben einstellt. Dies wird im Simulationsmodell mittels Signalschaltung (Strich-Punkt-Linie) erreicht. Das pneumatische Verhalten ergibt sich durch die gesteuerten Düsen, welche die pneumatischen Widerstände im Gerät repräsentieren.

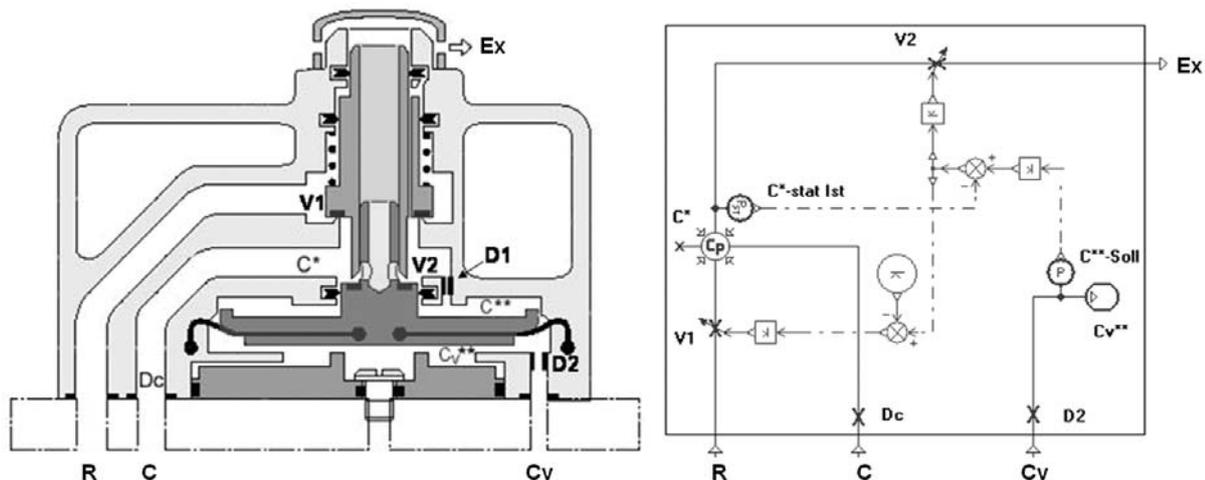


Abbildung 5-17: Funktionsdarstellung und Simulationsmodell eines Relaisventils

Die Parametrisierung und Verifizierung des Modells erfolgte über Durchflussmessungen an der realen Komponente und Kräfte- bzw. Volumenberechnungen an Hand der technischen Dokumentation. Die Ergebnisse von Be- und Entlüftungsversuchen an unterschiedlichen Volumina dienten der Validierung des Modells. Das hier vorgestellte Grundmodell lässt sich mit Hilfe entsprechender Parametersätze, welche z.B. empirisch über Versuche oder über Strömungssimulation ermittelt werden, auch für andere einstufige Relaisventile verwenden.

5.3.4 Adaption / Entwicklung Organisation

Die Anwendung des 4-Phasenmodells im Rahmen der Fallstudie beinhaltet, bezogen auf den Modell-Bereich ORGANISATION, wenig Veränderungsbedarf. Dies resultiert vor allem aus der Gestaltung des Konzeptes, welches nur sehr geringe Eingriffe in die Organisation erfordert und sich mit keinem anderen als dem Projektierungsprozess auseinander setzt. So ist lediglich die Dokumentation des Projektierungsprozesses um das Projektierungswerkzeug, z.B. in dort zitierten Checklisten und ähnlichem, zu erweitern.

Die Ausgestaltung des Projektierungswerkzeugkonzeptes erforderte für die jeweiligen Rollen weder die Schaffung eigener Teams noch neuer Positionen innerhalb der bestehenden Organisation. Die Funktionen Simulationsteam und Projektierungswerkzeugverantwortliche werden zunächst aus dem Team des Forschungsprojektes besetzt und sollen im Anschluss in die Berechnungsabteilung überführt werden.

5.3.5 Einführung des Projektierungswerkzeuges

Mit Eintritt in das Phasenmodell-Element Einführung (bestehend aus Tooleinführung und Prozessintegration) startet in der ersten Stufe die Anwendung eines Prototyps der Projektierungswerkzeugausprägung *PW-Standard*. Als Beispielsystem wurde auf Grund des einfachen Aufbaus und den klaren Schnittstellen das Teilsystem Sandungssteuerung⁵² ausgewählt. Die Ausprägung des Projektierungswerkzeuges nennt sich aus diesem Grund *PW-Standard-Sandung*.

Systemmodell Sandungsansteuerung

Je nach Fahrzeugprojekt werden Sandungssteuerungssysteme unterschiedlich ausgeführt (z.B. einstufig, zweistufig und stufenlos geschwindigkeitsabhängig). Gesteuert wird jeweils die Sandmenge über den eingebrachten Druck. Bei dem mit dem Projektierungswerkzeugprototypen auszulegenden Sandungssteuerungen handelt es sich um die am weitesten verbreiteten einstufigen Systeme.

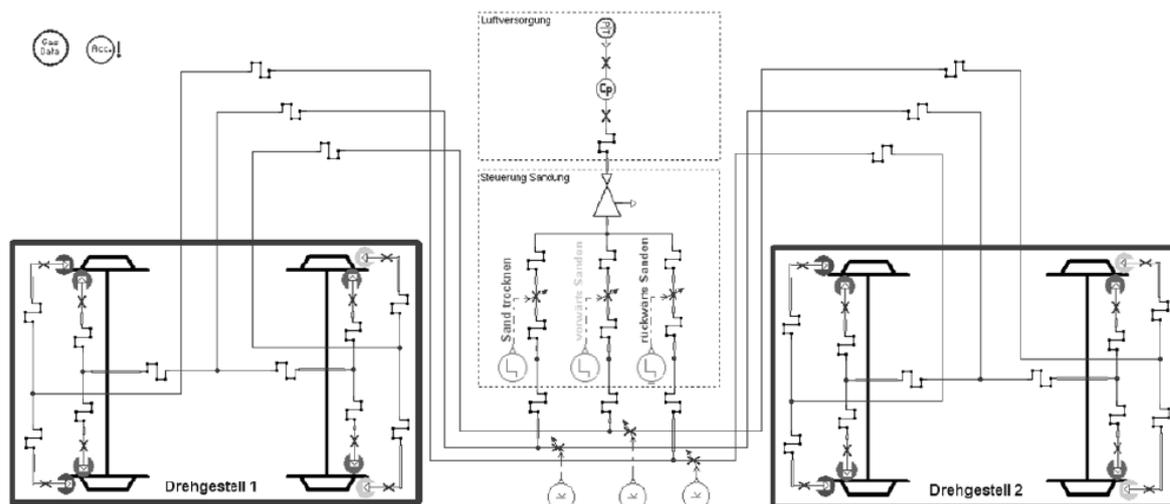


Abbildung 5-18: AMESim Modell Sandungsanlage

Das Systemmodell (siehe Abbildung 5-18) lässt über die Parametrisierung vielfältige Variationsmöglichkeiten zu, so dass es auf eine große Anzahl von Fragestellungen angepasst werden kann. Es besteht aus einer Gerätetafel, die an die Versorgungsleitung des Schienenfahrzeuges angeschlossen ist. Über ein Druckminderventil, wird der Versorgungsdruck auf das für die Sandungseinrichtung erforderliche Niveau reduziert und an drei parallel geschaltete 3-2-Wege-Magnetventile geleitet. Diese Ventile regeln den erforderlichen Volumenstrom durch

⁵² Sandungssysteme: Bereits bei Dampflokomotiven wurde damit begonnen durch den Einsatz von Sandstreuung auf die Schiene den Haftwert Rad / Schiene zu erhöhen. Dies diente dem Zweck, einerseits ein problemloses Anfahren unten allen Witterungsbedingungen, und andererseits eine Verkürzung der Anhaltewege der Schienenfahrzeuge zu erreichen. Das heute übliche Schienenfahrzeugteilsystem Sandung besteht aus Sandungsansteuerung, Sandkastendeckel, druckdichtem Sandkasten, Sandungseinrichtung mit Trocknung, Sandschlauch (oder Sandrohr) und Sandrohrheizung (KNORR-BREMSE 2002).

Öffnen oder Schließen zu den jeweiligen Düsen der Funktionen „vorwärts Sanden“ bzw. „rückwärts Sanden“ und „Trocknen“. Zwischen den Komponenten finden sich diverse pneumatische Widerstände. Über Verrohrungen werden diese Luftströme zu den Sandungen in den beiden Drehgestellen geleitet, wobei Drehgestell 2 abgesperrt werden kann. Die Sandungseinrichtung wird auf die für die Auslegung der Sandungsansteuerung relevanten Düsen für Sanden und Trocknen reduziert.

Um den Projektierer mit der Darstellung des Systemmodells aus AMESim nicht zu verwirren, wird in die Interfacdatei des Projektierungswerkzeuges eine vereinfachte schematische Darstellung des Systems (Abbildung 5-19) eingeführt. Diese zeigt lediglich die für den Projektierer relevanten und durch ihn zu spezifizierenden Elemente. Außerdem wird zur Darstellung der Elemente auf die Symbolik der Pneumatikpläne zurückgegriffen, welche dem Projektierer aus seiner täglichen Arbeit geläufig sind.

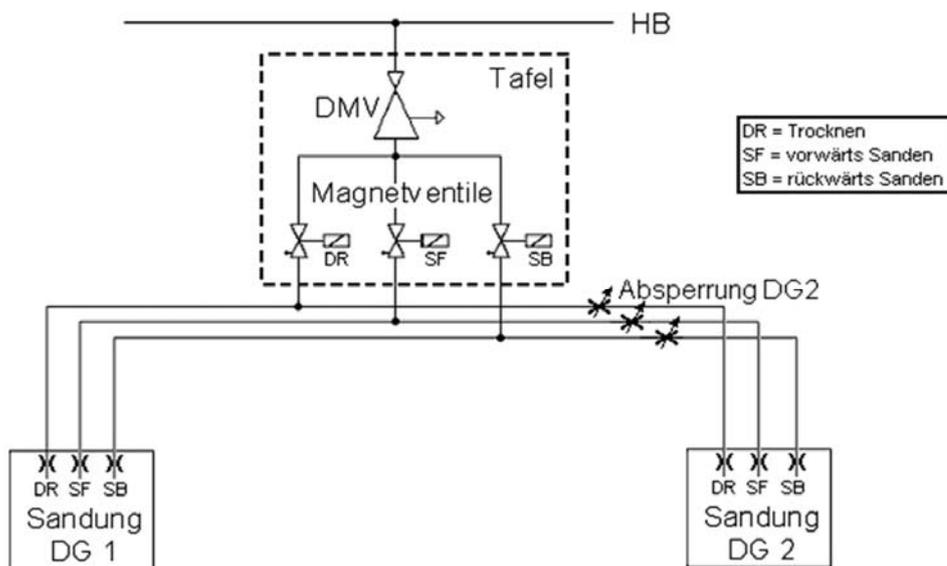


Abbildung 5-19: Schematische Darstellung des Sandungssystems

Um das oben vorgestellte AMESim-Modell auf das Fahrzeug anzupassen, kann der Projektierer folgende Systemgrößen festlegen: Versorgungsdruckniveau, Druckminderventiltyp und Einstellung, Magnetventiltyp und Zustand, Anzahl der Drehgestelle, Eigenschaften der Verrohrungen sowie die jeweiligen Düsendurchmesser der Sandungseinrichtung. Hierzu wird er durch die in der Interfacdatei implementierte schematische Darstellung unterstützt (Abbildung 5-19).

Interface-Datei des Prototyps

Ausgangspunkt für die Interfacdatei (Basis Microsoft Excel) des Prototypen-Projektierungswerkzeuges ist das beschriebene AMESim-Modell der Sandungssteuerung, die schematische Darstellung und die oben genannten Variationsmöglichkeiten über die Parametrisierung. Die Anwendung der Interfacdatei erfordert folgende Schritte durch den Projektierer (Abbildung 5-20): Zunächst wird das zu untersuchende Teilsystem Sandung ausgewählt (im Prototypen besteht keine Alternative zu dieser Auswahl). Im nächsten Schritt

passt der Projektierer das Systemmodell auf seinen Anwendungsfall an, indem er die oben vorgestellten Systemparameter (Gerätetypen, Drücke, Durchmesser etc.) benennt. Dabei erhält er zum einen erklärende Kommentare, zum anderen wird die Eingabe auf vorgegebene Wertebereiche beschränkt. Der Benutzer (Projektierer) wird automatisch durch die Dateneingabe geführt an deren Ende er darauf hingewiesen wird, die abgespeicherte Interface-Datei nun per E-Mail an das Simulationsteam zu senden.

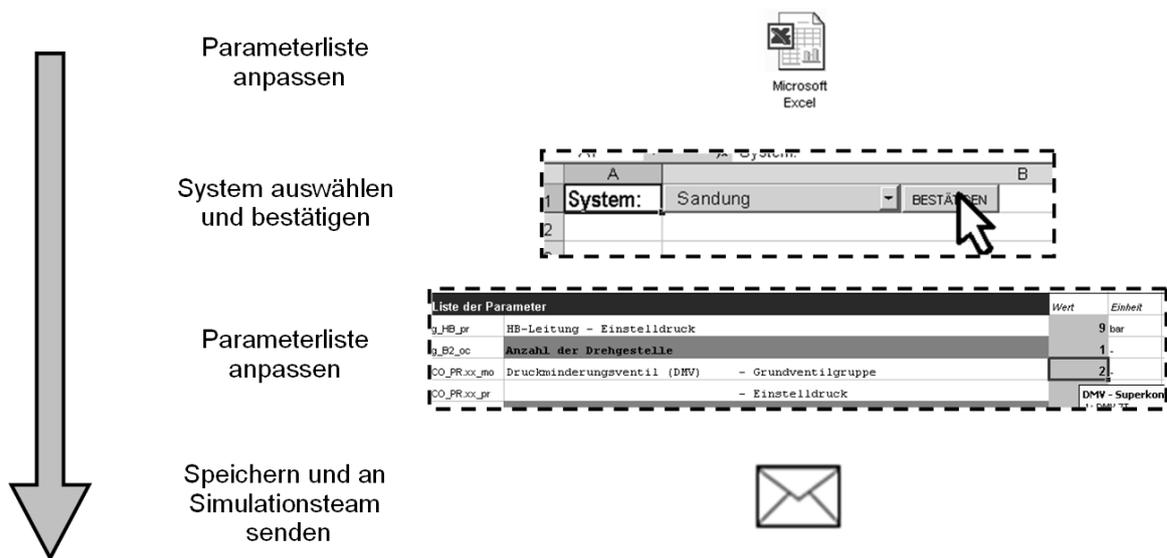


Abbildung 5-20: Benutzerführung des Projektierungswerkzeug-Prototypen

Das Simulationsteam öffnet parallel zur Interface-Datei das referenzierte Systemmodell in AMESim (alternativ AMERun) und startet mittels einer in der Interface-Datei implementierten Programmroutine die Übertragung der vom Projektierer eingegebenen Parameter über eine AMESim-Schnittstelle auf das Systemmodell. Anschließend wird die Simulation ebenfalls extern gestartet und nach der Berechnung die Ergebnisse auf diesem Wege ausgelesen. An dieser Stelle kann ein Experte aus dem Simulationsteam die Ergebnisse auf Plausibilität prüfen. Da es in der ersten Einführungsstufe (mit Prototyp) vorrangig um das Thema Interaktion von Projektierer und Simulationsteam mit der Excel-Interface-Datei und AMESim/AMERun geht und weniger um die Qualität möglicher Simulationsergebnisse ist diese Plausibilitätsprüfung nicht zwingend erforderlich. Der nächste automatisch gesteuerte Ablauf ist die Erstellung eines Berichtes, der an den Projektierer übersendet werden kann. Er enthält neben dem Systemmodell und den zugehörigen Informationen, Ergebnis-Diagramme der relevanten Systemparameter sowie sämtliche durch den Projektierer eingegebenen Modellparameter und Projektinformationen. Mit der Aufgabenverteilung zwischen Projektierer und Simulationsteam und dem hier beschriebenen Ablauf wurde trotz der Vielzahl von Funktionalitäten eine einfache und intuitive Anwendung des Projektierungswerkzeugs erreicht. Die Excel-Interface-Datei als Kern des Projektierungswerkzeuges *PW-Standard* gewährleistet durch die Kommentare und die schematischen Darstellungen, welche in Art und Form wie die üblicherweise verwendeten Systemplänen ausgeführt sind, eine gute Übersichtlichkeit.

Testphase Prototyp

Bei der Auswahl der Testpersonen für den Prototypentest wurde darauf geachtet, dass Projektierer aus allen Fachbereichen einbezogen wurden. Außerdem wurden sowohl erfahrene, als auch neue Mitarbeiter ausgewählt, um auch hier die Diversität im Unternehmen zu berücksichtigen. Damit sollte sichergestellt werden, dass ein repräsentatives Ergebnis des Tests vorliegt.

Für die Prototypenanwendung wurde eine Anleitung erarbeitet und gemeinsam mit der Excel-Interface-Datei an die Testpersonen versendet. Diese Anleitung führte in das Thema ein und nannte die Ziele des Einsatzes eines Projektierungswerkzeuges auf Simulationsbasis. Anhand einer Beschreibung des gesamten Ablaufs und der Vorstellung der durch den Projektierer auszuführenden Einzelschritte wurde die Bedienung erläutert. Nach der Erstanwendung durch die späteren Nutzer wurde das Feedback über Fragebögen geführte Interviews eingeholt.

Das Feedback war vielfältig und hatte erheblichen Einfluss auf die eigentliche Einführung und die Gestaltung des ersten real einzuführenden Projektierungswerkzeuges *PW-Standard*. Die Ergebnisse der Befragungen lassen sich mit folgenden repräsentativen Aussagen beschreiben:

- Das Werkzeug wird als hilfreich beurteilt und sollte eine Vielzahl von Subsystemen beinhalten. Ein maximales Maß an Variationsmöglichkeiten im Rahmen der Systemarchitektur ist anzustreben.
- Die Handhabung ist einfach und die Benutzerführung verständlich. Für großflächige Einführung ist dennoch eine persönliche Schulung mit Demonstration und Diskussion sinnvoll.
- Es sollten nur die Daten abgefragt werden, die zur Simulation benötigt werden. Das heißt eine Eingabeaufforderung für das zweite Drehgestell sollte vermieden werden, wenn dieses Drehgestell vorher abgesperrt wurde, also keine Relevanz hat.
- Im Rahmen der Projektierung liegen noch keine genauen Daten über die Fahrzeugverrohrung vor. Dies muss berücksichtigt werden.
- Auf Grund des in den Systemabteilungen vorhandenen Expertenwissens ist ein derartiges Werkzeug nicht erforderlich.
- Vor Einführung von Projektierungswerkzeugen ist das Vorgehen zur Absicherung der Ergebnisse zu erläutern. Dies ist bei Bremssystemen von Schienenfahrzeugen aus Gründen der Sicherheit erforderlich.

Im Vergleich zwischen erfahrenen und weniger erfahrenen Mitarbeitern fällt auf, dass die Mitarbeiter, welche nicht auf einen großen Erfahrungsschatz in der Projektierung zurückgreifen können, deutlich positiver auf dieses neue Unterstützungswerkzeug reagieren. Dies war im Vorfeld erwartet worden.

Projektierungswerkzeug *PW-Standard* und dessen Absicherung

Auf Basis der Erkenntnisse der Prototypenphase wurde die erste *PW-Standard*-Ausführung für den Einsatz im realen Projektierungsprozess umgesetzt. Es handelt sich dabei um ein Aus-

legungswerkzeug zur Abschätzung der Entlüftungsleistung der eingesetzten Ventile im Gleit-schutzsystem.

Bevor dieses Werkzeug eingesetzt werden kann, ist eine möglichst umfassende Validierung erforderlich. Hierzu wurde ein Kennfeld zu den später freigebenden Parameterbereichen erarbeitet. Anschließend wurden geeignete Stützpunkte dieses Kennfeldes ermittelt, um es durch Systemversuche abzusichern. Im hier vorliegenden Fall wurden in diesen Versuchen Behälteranzahl und -größen, Verrohrungselemente, Gerätetypen und Düsendurchmesser variiert. Auf dieser Basis lassen sich Aussagen zur erwarteten Genauigkeit der damit durchgeführten Simulationen geben.

Schulungskonzept für die Einführung

Für die Einführung wurde ein Schulungskonzept ausgearbeitet. Der geplanten Bekanntmachung über einen Infobrief an die Nutzer (Projektierer) soll eine Einladung zu einer Informations- und Schulungsveranstaltung folgen. Da das Projektierungswerkzeug aus Sicht des Nutzers einfach gehalten wurde, wird ein Schulungstermin geplant, in dem sequentiell folgende Fragen beantwortet werden:

- Wofür kann man im Rahmen der Projektierung Systemsimulation einsetzen?
- Was ist ein systemsimulationsbasiertes Projektierungswerkzeug?
- Wie ist das Projektierungswerkzeug aufgebaut und wie ist es zu verwenden?
- Wo sind die Grenzen des Projektierungswerkzeuges?
- Wo finde ich das Projektierungswerkzeug?
- Wer sind meine Ansprechpartner?

Ein Themenspeicher während den Schulungen soll Fragen und Anregungen sammeln, um sie gezielt vor den weiteren Einführungsstufen adressieren zu können.

5.4 Phase IV – Reflexion

Zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Arbeit war, wie eingangs erwähnt, das dieser Arbeit zugrunde liegende Einführungsprojekt noch nicht abgeschlossen. Es wurde aber mit Abschluss des Forschungsprojektes eine Reflexion durchgeführt, welche die Erkenntnisse aus der Anwendung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik des 4-Phasenmodells im Bezug auf die Projektierung kritisch diskutierte. Auf dieser Basis erfolgt für die vorliegende Arbeit eine vorgezogene Reflexion.

Einführung des Projektierungswerkzeuges

Zwei Entscheidungen treten als Erfolgsgaranten auf: So kann davon ausgegangen werden, dass gerade die Testphase dazu beiträgt, dass die Akzeptanz für das Projektierungswerkzeug im Unternehmen deutlich höher ausfällt, als es eine Einführung ohne diese Zwischenphase hätte erreichen können. Zwar wurden spätere Nutzer auch während der Konzeptphase eingebunden, aber die zusätzliche Möglichkeit, einen Prototypen als Ergebnis der Werkzeugkon-

zeption noch beeinflussen zu können, unterstützt das Gefühl der Mitwirkung und, daraus folgend, der Identifikation. Derart beeinflusste Personen bilden als Sprachrohr die erforderlichen Multiplikatoren, die einem Werkzeug, welches freiwillig eingesetzt werden soll, zum Durchbruch verhelfen können.

Die zweite Erfolg versprechende Entscheidung war die Abstufung der Einführung über die Testphase hinaus. So wurde der häufig auftretende Fehler, neue Werkzeuge sofort mit sämtlichen Funktionen auszurollen, vermieden. Auch hier ist der psychologische Effekt nicht zu vernachlässigen, wenn man berücksichtigt, dass sich davon Mitarbeiter durchaus überrumpelt und überfordert fühlen können.

Negativ im Rahmen der Einführung ist die Kommunikation während der Testphase aufgefallen. Dort hätten diejenigen Nutzer, welche sich bereit erklärt haben an der Testphase teilzunehmen, ebenfalls mit einer Informationsveranstaltung eingeführt werden müssen. Dies hätte einige Missverständnisse und daraus folgende zeitaufwändige Klärungen reduzieren können.

Zusammenfassend ist die Einführung bis zum dokumentierten Zeitpunkt als positiv zu beurteilen, wengleich die Ergebnisse noch nicht ausreichen, die Durchdringung und somit auch den Erfolg der Einführung abbilden zu können.

Integration des Projektierungswerkzeuges in Prozess und Organisation

Die Reflexion der Prozessintegration ist zum aktuellen Zeitpunkt auf Grund des fehlenden Projektabschlusses nur eingeschränkt möglich. In der Beschreibung des 4-Phasenmodells wurden Indikatoren zur Messung des Integrationsgrades des Projektierungswerkzeuges genannt. Eine Möglichkeit ist die Beurteilung der Akzeptanz des Werkzeuges als Hinweis auf dessen Durchdringung des Unternehmens (bezogen auf Nutzer und Organisation). Eine weitere Betrachtungsgröße ist der Unterschied zwischen beschriebenen und gelebten Prozessen. Was das Thema Akzeptanz angeht sei an dieser Stelle nochmals auf die Feedbackgespräche verwiesen. Dort wurde ein grundsätzlich positives Urteil über das Projektierungswerkzeug abgegeben. Die vereinzelt geäußerten Vorbehalte, vor allem erfahrener Mitarbeiter, können sukzessive durch weitere Einbindung der Nutzer während der Einführung aufgeweicht werden. Bereits die Diskussion der aus dem Prototypeneinsatz abgeleiteten Anpassungen am Werkzeug hat eine deutliche Akzeptanzsteigerung gezeigt. Dies berücksichtigend kann davon ausgegangen werden, dass letztlich die entsprechende Akzeptanz vorhanden sein wird und dadurch das Werkzeug im Alltag auch eingesetzt werden wird. Bezüglich des zweiten Aspektes, der Frage ob realer und dokumentierter Projektierungsprozess in Bezug auf das Werkzeug zukünftig in Deckung sein werden, kann die Beurteilung erst nach einer gewissen Betriebserfahrung erfolgen. Gleiches gilt für die ebenfalls interessante Auswertung der Nutzungsfrequenz bezogen auf Nutzergruppen und Organisationseinheiten.

Projektierungswerkzeug

Diese Betrachtung prüft ab, inwieweit das Projektierungswerkzeug die gestellten Anforderungen erfüllt. Die zu beurteilende Lösung wurde auf Basis der Simulationssoftware AMESim in zwei Teilen verwirklicht. Für wiederkehrende Fragestellungen wird *PW-Standard*, für Sonderfälle *PW-Sonder* verwendet. Nur in Kombination der beiden Werkzeugeile wird eine ökonomische und praxistaugliche Nutzung der Systemsimulation zur Steigerung der Projektie-

rungsqualität möglich. *PW-Standard* kann von Projektierungsingenieuren ohne Kenntnisse in Modellbildung und Simulation und mit geringem Aufwand in Projektierungs- und Simulationsabteilungen verwendet werden, um wiederkehrende Systemstrukturen für unterschiedliche Fahrzeuge auszulegen. Die Nutzung dieses Werkzeuganteils ist dabei ohne Einsatz primärer Intelligenz möglich, wenn im Vorfeld die zugrunde liegenden Simulationsmodelle entsprechend der gewünschten Ergebnisgenauigkeit verifiziert und validiert wurden. Werden allerdings bislang unbekannte oder seltene Systeme projektiert, ist das Werkzeug *PW-Standard* nicht verwendbar. Diese Lücke schließt *PW-Sonder*, welches die zur Verfügung stehende Systemsimulation im Rahmen der Projektierung voll nutzbar macht. Hierfür ist allerdings hoher Aufwand, sowohl während der Definition der Aufgabe auf Seiten des Projektierers, als auch während Modellierung, Simulation, Verifizierung und Validierung auf Seiten des Simulationsteams erforderlich.

Damit liegen die Schwächen im Bereich von *PW-Standard* im großen Absicherungsaufwand im Vorfeld und beim *PW-Sonder*, wie oben bereits beschrieben, im Bearbeitungsaufwand während der Anwendung. In Kombination bilden diese beiden Teile einen guten Kompromiss. Durch ihr Zusammenfügen entsteht ein zukunftsfähiges, erfolversprechendes Projektierungswerkzeug Systemsimulation. Weiter ist am Projektierungswerkzeug positiv zu erwähnen, dass *PW-Standard* gezielt zur Unterstützung der Standardisierung eingesetzt werden kann. Hierzu ist lediglich erforderlich bei den auswählbaren Geräten nur Produkte des Standardprogramms zur Auswahl freizugeben. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die im Projektierungswerkzeug verwendeten Systemkonfigurationen zukünftig häufiger Verwendung finden werden, wenn der Projektierer den Vorteil sieht, ein Auslegungstool zur Verfügung zu haben.

5.5 Fazit der Anwendung des 4-Phasenmodells

Die Reflexion in Phase IV des 4-Phasenmodells zeichnet ein sehr positives Bild vom Ergebnis der Anwendung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik. Bereits zum hier abgebildeten Zeitpunkt können durch die gemachten Erfahrungen wesentliche Annahmen und Festlegungen bestätigt werden. Einige davon sind bereits oben im Rahmen der Reflexion erwähnt worden. Darüber hinaus sind vor allem folgende Punkte als Fazit hervorzuheben:

Die Einbindung der Mitarbeiter kann an erster Stelle bei den Erfolgsfaktoren einer derartigen Entwicklungs- und Einführungsaufgabe genannt werden. Der Analyseaspekt Mensch erhält absolute Berechtigung, wenn man die Erfahrungen dieses Projektes aufsummiert. Nur so ist es möglich, den Nutzer selbst zu verstehen und seine Anliegen bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Im hier vorliegenden Fall zeigt sich, dass es gerade bei sicherheitsrelevanten Systemen unabdingbar ist, bei den handelnden Personen Vertrauen zu schaffen. Die Einbindung in Form eines interdisziplinären Projektteams und die Einflussmöglichkeiten durch die durchgeführte Prototypenphase steigern die Akzeptanzchancen signifikant. Darüber hinaus führt die Einbindung von Erfahrungswissen zu einem qualitativ höherwertigen Werkzeug, welches die Anforderungen des realen Prozesses besser erfüllen kann. Aus den Diskussionen mit den beteiligten Personen wurde außerdem der Aspekt Transparenz mehr in den Vordergrund geschoben als erwartet.

Die Erfahrungen aus dem Projekt zeigen außerdem, dass eine Festlegung auf das Simulationstool vor der Konzeptphase äußerst sinnvoll ist. Auch mit dieser Einschränkung verbleiben vielfältige Lösungsvariationen und es verbleibt eine weiterhin herausfordernde Entwicklungsaufgabe. Durch das Einschränken des Lösungsraumes wird es möglich, dem Abgleich zwischen technischen und organisatorischen Aspekten die notwendige Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Somit wird eine zielgerichtete Lösungsfindung für eine als solche bearbeitete soziotechnische Aufgabenstellung möglich.

Die Erfahrungen aus der Fallstudie bestätigen darüber hinaus, dass das Werkzeug einfach in der Handhabung sein muss. Andernfalls wird ein derartiges Werkzeug in einem konservativen Umfeld nicht erfolgreich sein. Die Vorteile müssen klar aufzeigbar sein und im Verhältnis zum Aufwand offensichtlich überwiegen.

Langfristige Themen, wie z.B. die Nachhaltigkeit des Werkzeuges, können noch nicht beurteilt werden. Dennoch können die Erfahrungen aus dem realen Einsatz der Methodik in einem repräsentativen Unternehmen herangezogen werden, um im Rahmen von Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick im folgenden Kapitel zu diskutieren, inwieweit die erarbeitete Methodik die an sie gestellten Anforderungen erfüllt, und inwieweit sie als allgemeingültig bezeichnet werden kann.

6. Zusammenfassung, Reflexion und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Erarbeitung einer Methodik zur Entwicklung und Einführung von Pneumatiksimulation als Projektierungswerkzeug im Maschinen- und Anlagenbau. Hierzu wurden die Problemstellung vorgestellt, der Stand der Technik und der Forschung erarbeitet und daraus der Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Methodik abgeleitet. Auf dieser Basis konnten hierfür allgemeine, werkzeugspezifische und einführungsrelevante Anforderungen definiert werden.

Die erarbeitete Entwicklungs- und Einführungsmethodik besteht im Wesentlichen aus einem Vorgehensmodell in 4-Phasen (4-Phasenmodell) mit detaillierter Beschreibung der Phasenelemente, Methoden- und Werkzeugempfehlungen, Hinweisen auf wichtige Aspekte und weiterführender Literatur sowie einem Managementwerkzeug auf Basis eines Meilensteinplans (*gates*). Das 4-Phasenmodell wird eröffnet mit dem Eintritt in die Analysephase. Darin wird auf Basis von Analysen zu den beiden Schwerpunkten *Systemsimulation* und *Unternehmen* das Simulationsprogramm als Kern des Projektierungswerkzeuges, die Prozessanker sowie die Randbedingungen und Anforderungen zu TECHNIK und ORGANISATION als Leitplanken für die folgenden Phasen definiert. Eingerahmt durch ebendiese aufeinander abzustimmenden Leitplanken folgen im Kern der Konzeptphase die Konzeptentwicklung und -auswahl, sowie in der Realisierungsphase die Detaillierung, Validierung und Umsetzung des Werkzeuges. Abgerundet werden die Entwicklungs- und Einführungstätigkeiten durch Tooleinführung und Prozessintegration. Den Abschluss bildet die Reflexionsphase zur Prüfung der Projektziele. Durch das Projektmanagementwerkzeug *gate* wurde in der Methodik ein Mechanismus installiert, der an den entscheidenden Stellen des Projektes, z.B. vor dem Eintritt in die Realisierungsphase, die Möglichkeit schafft, Korrekturen vorzunehmen bzw. einzufordern. Als letzte Konsequenz kann auch der Abbruch des Projektes erfolgen. Die Methodik wird vervollständigt durch Erläuterungen und Anwendungshinweise wie z.B. Vorschläge für geeignete, unterstützende Methoden und Hilfsmittel.

Das 4-Phasenmodell basiert auf dem Münchener Vorgehensmodell und bedient sich an dessen Inhalten. Angelehnt an das diskursive Vorgehen von WULF (2002) und dem Krisenmanagement von LINDEMANN ET AL. (2007) werden im Modell bewusst Freiheitsgrade einschränkt, um der Komplexität der technischen Fragestellung und den Randbedingungen im industriellen Umfeld einer derartigen Einführungsaufgabe gerecht zu werden. Die dadurch ermöglichte Zielerreichung einer erfolgreichen Einführung des Projektierungswerkzeuges steht im Vordergrund. Gerade dieses Ergebnis zu hinterfragen ist die Aufgabe der äußerst wichtigen Reflexionsphase am Ende des Einführungsprojektes.

Diese Entwicklungs- und Einführungsmethodik stellt erstmalig einen systematischen Rahmen für die kombinierte Aufgabe aus Entwicklung und Einführung eines komplexen technischen Werkzeuges dar. Dabei betont sie das erforderliche Wechselspiel der beiden Bereiche TECHNIK und ORGANISATION innerhalb der Methodik. Die Tatsache, dass es sich bei derartigen Aufgaben um soziotechnische Fragestellungen handelt, wurde daher stark hervor-

gehoben. Die Bedeutung von Robustheit und schneller und einfacher Verfügbarkeit als oberste Maxime für die Nutzung einer Unterstützung der Projektierung von komplexen Anlagen sind darüber hinaus eine wesentliche, zu berücksichtigende Erkenntnis. Diese führt dazu, dass eine optimale Simulationslösung für sich kein Ziel bei der Entwicklung eines Projektierungswerkzeuges darstellt.

Die Validierung der entwickelten Methodik erfolgte durch die Anwendung in einem repräsentativen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus. Wenngleich die Einführung dort noch nicht abgeschlossen werden konnte, sind aus den bereits erlangten Ergebnissen wertvolle Schlüsse zu ziehen. Auf dieser Basis kann im Folgenden beurteilt werden, inwieweit die Methodik die an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Darauf aufbauend kann in einer globaleren Reflexion das Thema Allgemeingültigkeit der Ansätze betrachtet werden.

6.1 Anforderungserfüllung durch die Entwicklungs- und Einführungsmethodik

Im Folgenden wird diskutiert, inwieweit die in dieser Arbeit erarbeitete Entwicklungs- und Einführungsmethodik die in Kapitel 3.2 vorgestellten Anforderungen erfüllt. Dies erfolgt erneut anhand der Anforderungsstruktur in den drei Blöcken allgemeine Anforderungen an die Gesamtmethodik, Anforderungen an das Projektierungswerkzeug und Anforderungen an die Einführung.

Allgemeine Anforderungen an die Methodik:

Zur Beurteilung der Erfüllung der allgemeinen Anforderungen an die Methodik wird jeweils die Umsetzung kurz beschrieben, bevor eine Abschätzung über den Erfüllungsgrad gegeben wird.

Projektmanagement & Controlling: Zur Strukturierung des Projektes ist das Vorgehen in vier Phasen eingeteilt, welche in einem Projekt zu planen sind. Die Grundstruktur wurde vom MVM abgeleitet, da dieses Problemlösungsmodell auf Grund seiner Allgemeingültigkeit sehr gut für eine komplexe Fragestellung wie die hier vorliegende geeignet ist. Die allgemein üblichen, empfohlenen Projektmanagementmaßnahmen werden an den Phasenübergängen durch die sogenannten *gates* erweitert. Dadurch, dass diese den Eintritt in die folgende Phase nur bei positivem Review-Ergebnis gestatten und damit eine echte Korrektur- und Abbruchmöglichkeit geben, wird dieser Anforderung voll erfüllt.

Analyse des Ist-Standes: Der Analyse des Ist-Standes wird in der Entwicklungs- und Einführungsmethodik mit einer eigenen Phase ein großer Stellenwert eingeräumt. Dabei werden die aus Sicht der Aufgabe wichtigsten Themenblöcke explizit adressiert und durch Erläuterungen verständlich gemacht. Damit kann die Forderung als gut erfüllt angesehen werden.

Soziotechnische Aspekte: Das 4-Phasenmodell fokussiert sowohl in der Darstellung als auch im Inhalt die beiden Themenbereiche TECHNIK und ORGANISATION. Dadurch werden, neben dem offensichtlich wichtigen Thema Systemsimulation die zentralen Aspekte im Bezug auf das Unternehmen mit seinen Strukturen, Mitarbeitern, Prozessen usw. berücksichtigt. Die dadurch beim Nutzer der Methodik angeregte Erkenntnis der Vielseitigkeit der Aufgabenstel-

lung führt zu der Einschätzung, dass auch dieser Anforderung durch die Entwicklungs- und Einführungsmethodik entsprochen wird.

Visualisierung: Das 4-Phasenmodell vermittelt in seiner Hauptdarstellung verschiedene wichtige Aspekte: Einteilung in TECHNIK und ORGANISATION, Phasenteilung, *gates*, Leitplanken, sequentielles Vorgehen. Darüber hinaus fehlt eine animierte Darstellung mit Erläuterungstexten und direkten Links zu Methoden, Werkzeugen und weiterführender Literatur, weshalb die Anforderung an die Visualisierung nur bedingt erfüllt ist. Diese Punkte sollten vor der weiteren Nutzung der Methodik ergänzt werden.

Evaluation und Reflexion: Die Absicherung von Zwischenergebnissen und der Zielerreichung, bezogen auf Projektierungswerkzeug und Einführung, werden durch die *gates* und die abschließende Reflexionsphase eingefordert und sichern so den Erfolg der Entwicklungs- und Einführungsmethodik ab. Die Anforderung aus Kapitel 3.2 ist damit erfüllt. Allerdings haben die Erfahrungen in der Fallstudie gezeigt, dass die Reflexion und Evaluation durch Checklisten oder ähnliche Hilfsmittel sinnvoll unterstützt werden könnte.

Vorgehensweise & Entscheider: Die Beteiligung der Anwender an den Entscheidungsprozessen ist nur am Rande der Beschreibungen zu erkennen. Auch die Einbindung aller Entscheidungsebenen sollte über die Erläuterungen zur Entwicklungs- und Einführungsmethodik hinaus adressiert werden. Da so die Gefahr besteht, dass die zugehörigen Entscheidungen verschleppt werden, kann die entwickelte Methode in diesem Bereich noch sinnvoll ergänzt werden, wobei die besondere unternehmensspezifische Ausprägung von solchen Entscheidungsprozessen eine komplexe Aufgabe darstellt. Als sinnvolle Verbesserung bieten sich hier Checklisten für die Phasenübergänge an, die diese Themen explizit einfordern.

Bekannte Erfolgsaspekte werden ebenfalls nur in den Erläuterungstexten erwähnt. Dies erwies sich zwar als ausreichend im Rahmen der Fallstudie, könnte aber in einer detaillierteren Darstellung noch besser hervorgehoben werden.

Die Frage nach der Anforderungserfüllung im Bezug auf einen *wissenschaftlich fundierten und übertragbaren Ansatz* für die breite Anwendbarkeit der Methodik wird im Rahmen der allgemeinen Reflexion der erarbeiteten Ansätze (Kapitel 6.2) und der Diskussion ihrer Allgemeingültigkeit (Kapitel 6.3) erfolgen.

Anforderungen an das Projektierungswerkzeug:

Die Beurteilung der Erfüllung von Anforderungen an das Projektierungswerkzeug beschränkt sich bei der Reflexion der Methodik selbst auf die Frage, inwieweit diese Vorgaben systematisch adressiert werden. Die aus dem Stand der Technik abgeleiteten direkten Anforderungen an das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation wurden unter den Überschriften *Aufwand/Nutzen-Relation, Standardisierung, Verfügbarkeit, Integration, Adaption, Verifikation & Validierung, Sekundäre Intelligenz* und *Simulationskenntnisse* zusammengefasst. Besondere Beachtung muss dabei dem Thema *Aufwand/Nutzen-Relation* gewidmet werden, da hier auf Grund fehlender absoluter Maßstäbe nur Abschätzungen möglich sind. Sie wurden in dieser Form als allgemeine Anforderungen in die Beschreibung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik integriert. Damit wird das Ziel verfolgt, sie als Teil der Anforderungsliste in den Leitplanken zu verankern, mit der Konsequenz, dass sie in der Reflexionsphase unter dem

Punkt Beurteilung des Projektierungswerkzeuges Verwendung finden. Gerade das Thema *Standardisierung* mit seinem sehr unternehmensstrategischen Charakter zeigt, dass die Untersuchung der Erfüllung der Anforderungen an das mit Hilfe der Methodik zu entwickelnde Werkzeug nur fallbezogen erfolgen kann, wie dies z.B. in der Fallstudie erfolgte.

Da keine Checklisten oder mit den Leitplanken verbundene vorgefertigte, Anforderungslisten erstellt wurden, besteht auch hier die Gefahr der Nichtberücksichtigung dieser Aspekte. Derartige Vorlagen würden somit ebenso helfen, wie die bereits erwähnten Verbesserungen in Form verlinkter Darstellungen und Informationen. Die spätere Entwicklungsstufe einer internetbasierten Datenbank, auf welche hilfeschuchende Unternehmen als Dienstleistung zugreifen können, ist bis auf Weiteres wohl eher Utopie.

Anforderungen an die Einführung des Projektierungswerkzeuges:

Planung der Einführung: Der Bedeutung der Einführungsplanung wird die Methodik durch ein eigenes Element im 4-Phasenmodell absolut gerecht. Der Forderung nach einem Projektmanagement für die Einführung selbst wird im Rahmen der Beschreibung der Methodik entsprochen. Damit ist diese Anforderung voll erfüllt.

Schulung: Das Thema Schulung ist in der Entwicklungs- und Einführungsmethodik unter dem Element Planung der Einführung erwähnt. Damit wird auf die Notwendigkeit dieses Themas hingewiesen. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher Widerstandsstufen findet allerdings nur bedingt, in Form der allgemeinen Einbindung der späteren Nutzer, statt.

Lessons learned: Der Rückfluss von Verbesserungsvorschlägen und die Ableitung von notwendigen Maßnahmen wird durch die Empfehlung eines Piloteinsatzes erreicht. Die Betonung der Wichtigkeit fortlaufender Reflexion führt dazu, dass diese Anforderung als erfüllt angesehen werden kann.

Visualisierung: Dieser Aspekt kann nur fallbezogen beurteilt werden. So können z.B. die grafischen Darstellungen in der Fallstudie als ausreichend bezeichnet werden, um den Nutzern die Funktionsweise des Werkzeuges und die Abläufe zur Nutzung eindeutig zu erläutern. Allgemein hilfreiche Visualisierungen zur Unterstützung der Einführung könnten grafische Anleitungen (Erläuterung Schritt für Schritt) oder Schulungsvideos sein.

Management Unterstützung: Die Einbindung des Managements, insbesondere während der Einführung, wurde nur sehr rudimentär beschrieben. In der Methodikbeschreibung sollte darauf mehr eingegangen werden und die Betonung auf Zusicherung der Zustimmung des Managements eingeholt werden.

Zusammenfassend kann erwähnt werden, dass die im Vorfeld erarbeiteten Anforderungen im Wesentlichen erfüllt wurden. Der ermittelte Verbesserungsbedarf bildet einen wichtigen Input für den Ausblick der Arbeit. Auf Basis dieser Beurteilung der Erfüllung der Anforderungen kann eine allgemeine wissenschaftliche Reflexion der erarbeiteten Ansätze erfolgen. Daran anschließend erfolgt die Diskussion der Allgemeingültigkeit.

6.2 Reflexion der entwickelten Ansätze

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Werkzeug Pneumatiksystemsimulation zur Unterstützung des Projektierungsprozesses im Anlagenbau entwickelt. Kern der zu Grunde liegenden Problemstellung ist die Kombination der beiden Wirkungsfelder der Dissertation (vgl. Abbildung 1-3) - *Simulationstechnologie* (Entwicklung komplexes Projektierungswerkzeug) und *Change Management* (Einführung eines Projektierungswerkzeuges).

Zur Lösung dieser Problematik wurde aus der ‚Design Research Methodology Framework‘ (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 29) ein wissenschaftliches Vorgehen entwickelt, um das grundlegende Ziel der Schaffung einer Entwicklungs- und Einführungsmethodik zu erreichen. Von diesem Ziel ausgehend entstand auf Basis des Standes der Forschung und der Technik der Handlungsbedarf der Arbeit und daraus wiederum die Anforderungen an die Methodik. Für die darauf folgende Entwicklung des Lösungsansatzes wurde das Phasenmodell von HEBLING (2006) herangezogen. Die Anwendung und Evaluation erfolgte im letzten Schritt in Form einer Fallstudie. Dieses Vorgehen erwies sich im Nachhinein als zielführend, da damit eine Methodik erarbeitet werden konnte, welche zum einen die gestellten Anforderungen erfüllte, und sich zum anderen im ersten Praxistest (Fallstudie) bewährte. Somit gelingt es dieser Methodik, die beiden Wirkungsfelder der Dissertation erfolgreich zu verbinden und für ein wirksames technisches Werkzeug ein erfolgreiches Change Management zu erreichen.

Zu den besonderen Stärken der erarbeiteten Methodik zählt u.a. der präskriptive Checklistencharakter des 4-Phasenmodells, der bislang vorhandene Teilerkenntnisse zusammenführt. Hinzu kommt der starke Projektmanagementansatz mit dessen Hilfe Fortschritt und Erfolg des Projektes verfolgt und Korrekturen bis zum Abbruch ermöglicht werden. Außerdem ist die Betonung darauf, dass es sich um eine soziotechnische Problemstellung handelt, als sehr positiv zu beurteilen. Daraus resultiert die Ausrichtung der Methodik auf die beiden Bereiche TECHNIK und ORGANISATION, was zur Folge hat, dass kein Bereich übersehen werden kann. So werden z.B. während der Ausarbeitung der technischen Lösung stets auch die Randbedingungen im Unternehmen in Bezug auf Organisation und Prozesslandschaft im Auge behalten. Außerdem muss die Berücksichtigung der großen Bedeutung des Menschen als Nutzer und die daraus abgeleitete Einbindung während Entwicklung und Einführung des Werkzeuges hervorgehoben werden.

Die Schwächen dieser Arbeit liegen vor allem darin, dass die Fallstudie nur bis zur Prototypenphase ausgeführt werden konnte. Darüber hinaus wären weitere Fallstudien zur Validierung wünschenswert. Das Fehlen der erwähnten, vorgefertigten und im Bedarfsfall zu erweiternden Checklisten muss als Mangel der vorliegenden Methodik genannt werden. Ein weniger gewichtiges Defizit ist die bislang eingeschränkte Visualisierung. So bietet die Darstellung des 4-Phasenmodells zwar eine sehr gute Möglichkeit einen Überblick zu erhalten und die wesentlichen Aussagen (Phasenteilung, Ausrichtung TECHNIK und ORGANISATION etc.) zu transportieren. Während der Praxisanwendung wäre jedoch eine sinnvolle Verknüpfung von Vorgehensmodell, Erläuterungen, Methodenhinweisen und Checklisten z.B. in Form einer animierten verlinkten Darstellung hilfreich. Darüber hinaus wäre eine Datenbank gekoppelt mit Situationen (vgl. PONN 2007) eine Möglichkeit zur Weiterentwicklung der Methodik. Durch Auswahl von typischen Randbedingungen der jeweiligen Einführungsaufgabe

erhält der Anwender einen Vorschlag für ein auf Basis zentraler Prinzipien (Organisation, Technik, etc) angepasstes Vorgehen. Die auf Grund der starken Zielrichtung zwangsläufige Einschränkung des Lösungsraumes bei der Anwendung der Methodik ist möglicherweise negativ zu bewerten. Da es aber im beschriebenen Projektierungsalltag des Maschinen- und Anlagenbaus das Ziel ist, nicht zwangsläufig die beste, sondern vielmehr eine für den Zweck ausreichende, aber dafür hochverfügbar und robuste Lösung anzustreben, kann diese Schwäche akzeptiert werden.

6.3 Diskussion der Allgemeingültigkeit

Nach der Anforderungserfüllung und einer allgemeinen Reflexion der entwickelten Ansätze dieser Arbeit folgt die Diskussion der Allgemeingültigkeit. Dazu werden einige wesentliche Eigenschaften der Methodik bezüglich einer möglichen Variation von Umfeld der Einführung, einzuführendem Werkzeug oder zu unterstützendem Prozess beurteilt.

Die Entwicklungs- und Einführungsmethodik wurde für eine soziotechnische Aufgabenstellung entwickelt. Um diese Herausforderung zu meistern, wurde die grundsätzliche Ausrichtung auf die beiden Bereiche TECHNIK und ORGANISATION implementiert. Derartige Fragestellungen finden sich selbstverständlich auch außerhalb des Maschinen- und Anlagenbaus, wie der Stand der Technik bezüglich Werkzeugeinführung zeigt, und abseits des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation. Bei der numerischen Simulation pneumatischer Systeme handelt es sich um eine der unzähligen Anwendungen von Modellbildung und Simulation. Gemein ist diesen das grundsätzliche Verständnis des Zusammenspiels zwischen Realität, Modell und Simulation über die Begriffe Modellierung, Verifikation und Validierung. Es ist anzunehmen, dass sich die erarbeitete Methodik auch dazu eignen würde, andere Simulations-Werkzeuge und darüber hinaus ganz allgemein andere Werkzeuge zur Projektierung einzuführen, auch wenn ein Nachweis in dieser Arbeit nicht erbracht werden konnte. Die größten, dann gegebenenfalls erforderlichen Adaptionen sind bei den Schwerpunkten der Analyse auf Seiten der TECHNIK zu erwarten. Diese richten sich auf das zu entwickelnde Werkzeug und dessen technisches Umfeld. Gleiches gilt für eine Variation des zu unterstützenden Prozesses auf Seiten der ORGANISATION. Interessanterweise kommt HERFELD (2007) zu ähnlichen Schlüssen für die zielorientierte Organisation von Konstruktion und Simulation.

Die Einteilung in Phasen und die Steuerung der zugehörigen Phasenübergänge eröffnen vor allem für komplexe Einführungsaufgaben ein Projektmanagement mit tatsächlichen Korrekturmöglichkeiten. Dies ist ebenso allgemein gültig wie die zusätzliche Priorisierung einer ständigen Reflexion in Form der *gates*. In Kombination mit der Tatsache, dass für das 4-Phasenmodell mit dem MVM ein allgemein verwendbares Vorgehensmodell zur Problemlösung als Vorlage diente, kann die beschriebene Methodik mit großer Wahrscheinlichkeit auch für andere Einführungsprojekte angewendet werden und ist dabei unabhängig von Umfeld und dem einzuführenden Objekt / Werkzeug.

Abschließend lässt sich folgendes Fazit ziehen: Wesentliche Teile der Entwicklungs- und Einführungsmethodik lassen sich in vielen Fällen verwenden; je komplexer die Aufgabe ist, desto sinnvoller ist die Anwendung einer derartigen Methodik. Je weiter man die ursprüngliche Ausrichtung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik (Pneumatiksimulation als

Werkzeug zur Unterstützung der Projektierung im Anlagenbau) verlässt, desto mehr Anpassungen sind erforderlich. Im Kern verbleiben aber in jedem Fall folgende Grundbausteine: Phasen, *gates*, MVM als Grundlage des Gesamtvorgehens, Berücksichtigung beider Schwerpunktbereiche TECHNIK und ORGANISATION und deren fortlaufende Abstimmung aufeinander, hohe Bedeutung der Reflexion und die Verwendung eines Kern-MVMs zur Lösung einzelner Problemstellungen.

6.4 Ausblick

Bezogen auf die Fallstudie sollte die Einführung in den geplanten Stufen fortgesetzt und zeitnah abgeschlossen werden. Im nächsten Schritt ist eine umfassende Aufwand/Nutzen-Beurteilung möglich, wenn sich die tatsächlich generierten Ratioeffekte ermitteln lassen. Auf Grund der fehlenden absoluten Maße sollte die Bewertung aber mit Vorsicht durchgeführt werden.

Hinsichtlich der erarbeiteten Ansätze sollten zu der hier vorgestellten Fallstudie weitere Anwendungen der Methodik folgen, um sie weiter zu validieren. Dies kann auch zur Bestätigung der Aussagen zur Allgemeingültigkeit unter Variation von Umfeld, Werkzeug und Prozess erfolgen.

Zur Weiterentwicklung der Methodik sind vor allem drei Ansatzpunkte gegeben: So ist zur besseren Anwendbarkeit der Entwicklungs- und Einführungsmethodik die Verknüpfung des 4-Phasenmodells, des Projektmanagementwerkzeugs *gate*, sowie der empfohlenen Methoden und Werkzeuge zu verbessern und eine dazu geeignete Visualisierung auszuarbeiten. Bislang stellt das Kapitel 4 die einzige umfassende Beschreibung der Entwicklungs- und Einführungsmethodik dar. Sie lässt sich leichter anwenden, wenn sie z.B. in eine animierte Darstellungsform überführt wird. In dieser müssten die jeweiligen Phasen und Beschreibungen der Elemente ebenso verlinkt werden wie die Methodenvorschläge und Beispiele aus der Praxisanwendung.

Im zweiten Punkt sollten vorausgefüllte Dokumenten-Vorlagen erzeugt werden, die die Nutzung der Methodik stark vereinfachen. Derartige Dokumente sind für die *gate*-Checklisten ebenso sinnvoll wie für Anforderungslisten oder Beschreibungen der geltenden Randbedingungen.

Der dritte umzusetzende Optimierungsschritt besteht in der Erweiterung der Methodik um eine Datenbank, welche die oben genannten Informationen mit Situationen koppelt. Auf dieser Basis kann zu abgefragten Randbedingungen der jeweiligen Einführungsaufgabe ein angepasstes Vorgehen vorgeschlagen werden. Dieses baut dabei auf den zentralen Prinzipien der Methodik auf.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gegebenheiten bei den Anlagen-, Maschinen-, Geräte- sowie Apparatebauunternehmen und deren Auswirkungen auf diese Unternehmen.(nach BAUMANN & LOOSCHELDERS 1982).....	2
Abbildung 1-2: Widerspruch zwischen Systemoptimierung und Systemstandardisierung	9
Abbildung 1-3: Die Wirkungsfelder der Dissertation	11
Abbildung 1-4: Thematische Abgrenzung der wesentlichen Schwerpunkte für die Arbeit.....	13
Abbildung 1-5: Design Research Methodology Framework (BLESSING & CHAKRABARTI 2009)	14
Abbildung 1-6: Aufbau der Arbeit	17
Abbildung 2-1: Wichtige positive und negative Faktoren für einen Einführungsprozess nach VIERTLBÖCK (2000, S. 98), zusammengefasst aus RITZÉN S ET AL. (1999)	22
Abbildung 2-2: Erfolgsrelevante Aspekte für die Methoden- und Hilfsmiteleinführung (VIERTLBÖCK 2000, S. 94)	24
Abbildung 2-3: Widerstandspyramide nach GALPIN (1996) und Maßnahmen den Widerstand zu überwinden nach STETTER (2000, S. 116).....	25
Abbildung 2-4: Modell des Wandels nach SCHMITZ (1999).....	31
Abbildung 2-5: Darstellung des generellen Modells eines Änderungsprozesses nach BESKOW ET AL. (1999, S. 438)	32
Abbildung 2-6: Modell zur Unterstützung der strategischen Planung der Methodeneinführung nach VIERTLBÖCK (2000, S. 107).....	32
Abbildung 2-7: Modell zur Unterstützung der operativen Planung nach VIERTLBÖCK (2000, S. 117)	33
Abbildung 2-8: Iterative Implementierungsstrategie nach USHER (1996).....	34
Abbildung 2-9: Vorgehensplan für die Einführung der Konstruktionsmethodik nach EHRENSPIEL (2007, S. 270).....	35
Abbildung 2-10: Modell der fünf Ebenen einer Methodenimplementierung nach STETTER (2000, S. 35).....	35
Abbildung 2-11: Schritte zur Einführung eines PDM-Systems nach VDI-Richtlinie 2219	36
Abbildung 2-12: 3-Phasen-Konzept zur PPS-Einführung nach HIRT (1990).....	37
Abbildung 2-13: Das Münchner Methodenmodell (BRAUN 2005)	38
Abbildung 2-14: Münchner Vorgehensmodell nach LINDEMANN (2007).....	40
Abbildung 2-15: Modell zur Erläuterung des Systembegriffs nach EHRENSPIEL (2007).....	42

Abbildung 2-16: Systemhierarchie nach EHRENSPIEL (2007).....	43
Abbildung 2-17: Black Box am Beispiel des Systems Druckmaschine nach LINDEMANN (2007).....	44
Abbildung 2-18: Strukturen von Maschinen und Anlagen (FÖRSTER 2003).....	45
Abbildung 2-19: Produktfamilie, Variante und Typ (FÖRSTER 2003).....	45
Abbildung 2-20: Systematisches Projektieren technischer Systeme (nach BAUMANN & LOOSCHELDERS 1982).....	47
Abbildung 2-21: Tätigkeiten und Ablauf der Angebotsbearbeitung nach VDI2222.....	49
Abbildung 2-22: Teilaufgaben der Projektierung nach ABMANN (1996).....	50
Abbildung 2-23: Bestandteile eines Angebotes nach VDI2222.....	51
Abbildung 2-24: Rechnerunterstützung bei der Projektierung nach WEULE UND LEMBKE (1999).....	52
Abbildung 2-25: Eigenschaften und Besonderheiten der Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus nach FÖRSTER (2003).....	55
Abbildung 2-26: Merkmale der kundenspezifischen Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen nach LINNHOF (1993).....	56
Abbildung 2-27: Trefferquote im Maschinen- und Anlagenbau 1999-2006 nach VDMA (2007).....	57
Abbildung 2-28: Modellbildung und Simulation nach BENDER & SCHILLER (2009, S. 1-26). 62	
Abbildung 2-29: Beispielsimulation eines pneumatischen Systems mit AMESim.....	67
Abbildung 2-30: Ergebnis der Beispielsimulation mit AMESim.....	68
Abbildung 2-31: Y- und T-Stücke als Verteiler der Druckluftströme (ELVERS 2009).....	69
Abbildung 2-32: Singleport- und Mulitport-Modellierung (RHOTE-VANEY ET AL. 2002).....	72
Abbildung 2-33: Modellierungs- und Simulationsprozess in AMESim.....	73
Abbildung 3-1: Grobstruktur des entwickelten Vorgehensmodells.....	83
Abbildung 4-1: 4-Phasenmodell zur Entwicklung und Einführung des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation.....	86
Abbildung 4-2: Deskriptive Bezeichnungen der gates.....	88
Abbildung 4-3: Zusammenhang zwischen 4-Phasenmodell und dem MVM.....	90
Abbildung 4-4: Kapitelstruktur der Vorstellung des 4-Phasenmodells.....	91
Abbildung 4-5: Analyseschwerpunkte im Bereich TECHNIK.....	93
Abbildung 4-6: 5 Aspekte des Analyseblocks Unternehmen.....	95
Abbildung 4-7: Darstellung des Kernprozesses in der Phase II - Konzepterstellung.....	100
Abbildung 4-8: Realisierungsphase.....	103

Abbildung 4-9: Durch Prototypentest erweiterter Einführungsablauf nach BESKOW ET AL. (1999)	107
Abbildung 5-1: Fokussierte Aspekte der Fallstudie	111
Abbildung 5-2: Analyseschwerpunkte im Bereiche TECHNIK	113
Abbildung 5-3: Überblick eines Schienenfahrzeugbremssystem (KNORR-BREMSE 2003)....	113
Abbildung 5-4: Indirekte automatische Bremse (KNORR-BREMSE 2003, S. 14).....	114
Abbildung 5-5: Beispielhafter Top-Down-Ansatz zur Systemanalyse	115
Abbildung 5-6: Pneumatische Schaltung zur Schlauchbruchererkennung (Parkbremse).....	118
Abbildung 5-7: Zusammenhang zwischen Grundelementen, Black-Boxen (Geräte und Systemkomponenten) und Systemen.....	119
Abbildung 5-8: Aspekte des Analyseblocks Unternehmen.....	119
Abbildung 5-9: Ausschnitt des Projektierungsprozesses	122
Abbildung 5-10: Konsistenzmatrix zur Darstellung von Zielkonflikten zwischen den Bewertungskriterien	127
Abbildung 5-11: Mögliche Zusammenarbeit zwischen Projektierer und Simulationsteam...	129
Abbildung 5-12: Bewertungsergebnis Konzeptauswahl	131
Abbildung 5-13: Integration des Projektierungswerkzeuges in den Prozess der Projektierung	136
Abbildung 5-14: Stufeneinführung Projektierungswerkzeug.....	137
Abbildung 5-15: Modellaufbau, Bibliothek und System	138
Abbildung 5-16: Ansatz zum Aufbau der Systemsimulation.....	139
Abbildung 5-17: Funktionsdarstellung und Simulationsmodell eines Relaisventils.....	140
Abbildung 5-18: AMESim Modell Sandungsanlage.....	141
Abbildung 5-19: Schematische Darstellung des Sandungssystems	142
Abbildung 5-20: Benutzerführung des Projektierungswerkzeug-Prototypen	143

8. Abkürzungsverzeichnis

b_{krit}	kritisches Druckverhältnis (Durchfluss)
C	Bremszylinderdruck (Druck und Druckanschluss)
C_L	Leitwert (Durchfluss)
CAx	Computer aided x
CFD	Computational Fluid Dynamics
C_v	Vorsteuerdruck des Bremszylinderdruckes (Druck und Druckanschluss)
DMV	Druckminderventil
EA	Entwicklungsauftrag (CADIM)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Resource Planning
Ex	Exhaust / Entlüftung (Druckanschluss)
FEM	Finite Elemente Methode
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse
FVM	Finite Volumen Methode
GV	Gleitschutzventil
HB	Hauptbehälterleitung
HiL	Hardware in the loop
HL	Hauptluftleitung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KSS	Knorr-Bremse System-Simulation
MVM	Münchener Vorgehensmodell
NBV	Notbremsventil
PDM	Produktdaten-Management
PLM	Product Lifecycle Management
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem
PS	Projektsteuerungssysteme
PW-Sonder	Projektierungs-Werkzeug-Sonder
PW-Standard	Projektierungs-Werkzeug-Standard

R	Reservoir-Druck / Versorgungsdruck (Druck und Druckanschluss)
SADT	Structured Analysis and Design Technique
UML	Unified Modeling Language
V1, V2	Ventilsitz 1, Ventilsitz 2
VR	Virtual Reality
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer

9. Literatur

AKADEMISCHER VEREIN HÜTTE E. V. (HRSG.); EVERSHEIM, W.; SCHUH, G. (HRSG.)
Produktion und Management Teil 1, 7. Auflage.
Berlin: Springer, 1996.

AHLBRECHT, R.:
Komplexität im Unternehmensplanspiel.
Göttingen: U, Diss. 2002.

AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: TU, Diss. 2002.

AMFT, M.; ANTON, TH.; CANALES, F.; ENGLBRECHT, M.:
PEP BC OE – Prozessnavigator.
Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge – CoC Brake Control.
München: 2008 – Firmenschrift.

AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 1996.

ANDERHEIDEN, M.:
Gemeinwohl in Republik und Union.
Tübingen: Mohr Siebeck, 2006.

ANGERMANN, A.; BEUSCHEL, M.; RAU, M.; WOHLFAHRT, U.:
Matlab-Simulink-Stateflow. Grundlagen, Toolboxen, Beispiele.
München: Oldenbourg, 2005.

ANTON, TH.; GAAG, A.:
Optimierung von pneumatischen Bremssystemen durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen (KSS Abschlussbericht).
München: Knorr Bremse / TU München Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2008.

ARNOLD, V.; DETTMERING, H.; ENGEL, T.; KARCHER, A.:
Product Lifecycle Management beherrschen. – Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand.
Berlin: Springer, 2005.

- ABMANN, S.:
Methoden und Hilfsmittel zur abteilungsübergreifenden Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen.
Aachen: RWTH, Diss.1996.
- BADKE-SCHAUB, P.; FRANKENBERGER, E.:
Management kritischer Situationen.
Berlin: Springer, 2004.
- BAUER, F.:
Maßnahmen und Methoden zur Flexibilisierung pneumatischer Greifsysteme.
Aachen: RWTH, Diss. 2002.
- BAUMANN, H.G.; LOOSCHELDERS, K.H.:
Rechnerunterstütztes Projektieren und Konstruieren.
Berlin: Springer, 1982.
- BENDER, K.; SCHILLER, F.:
Modellbildung und Simulation.
München: TU, Lehrstuhl für Informationstechnik, Umdruck zur Vorlesung Modellbildung und Simulation 2009.
- BESKOW, C.; JOHANSSON, J.; NORELL, M.:
Changing the product development process: a study of four QFD implementations.
In: Lindemann, U.; Birkhofer, H.; Meerkamm, H.; Vajna, S. (Eds.): Proceedings of the 12th International Conference of Engineering Design ICED, Vol. 2, München, 24.-25.08.1999.
München: TU 1999, S. 1065-1068 (Schriftenreihe WDK 26).
- BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.; WALLACE, K. M.:
An Overview of Descriptive Studies in Relation to a General Design Research Methodology. In: Frankenger, E.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H. (Eds.): Designers – The Key to Successful Product Development.
London: Springer, 1998, S. 42-56.
- BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.:
DRM, a design research methodology.
Berlin: Springer, 2009.
- BIRK, A.:
Konzeption und Realisierungsentwurf eines PMS auf der Basis einer Wissensdatenbank für die Projektierung von Extrusionsblasteilen für die Automobilzulieferindustrie.
Essen: GH, Diss. 2004.

- BOARDMAN, J.; SAUSER, B.:
System of Systems – the Meaning of of.
In: (Hrsg.): IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering, Los Angeles, 2006, S. 6-12.
- BÖHNKE, E.; LANG, A.; ROSENSTIEL, L.V.:
Schritte einer SAP-Einführung aus psychologischer Sicht – Eine empirische Untersuchung.
In: Kohnke, O.; Bungard, W. (Hrsg.): SAP-Einführung mit Change Management. 1. Auflage
Wiesbaden: Gabler, 2005, S. 169-200.
- BOSSEL, H.:
Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme, 2. Auflage.
Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1994.
- BRAUN, T.:
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.
München: TU, Diss. 2005.
- BROCKHAUS (BEGR.):
Brockhaus. Enzyklopädie in 30 Bänden; 21 Auflage.
Leipzig: Bibliographische Institut & F. A. Brockhaus AG, 2000.
- BROWNING, T.R.; DEYST, J.J.; EPPINGER, S.D.; WHITNEY, D.E.:
Adding value in product development by creating information and reducing risk.
IEEE Transactions on Engineering Management Volume 48 Issue 4, pp. 443-458, 2002.
- BURKHARDT, W.; KRAUS, R.:
Projektierung von Warmwasserheizungen, 7. überarbeitete Auflage.
München: Oldenbourg, 2006.
- BUNGARD, W.:
Einführung unternehmensweiter Standard-Software-Pakete: Eine gefährliche Gratwanderung zwischen wirtschaftlichem Höhenflug und existenzbedrohendem Absturz.
In: Kohnke, O.; Bungard, W. (Hrsg.): SAP-Einführung mit Change Management. 1. Auflage
Wiesbaden: Gabler, 2005, S. 13-35.
- COOPER, R.:
Top oder Flop in der Produktentwicklung. Erfolgsstrategien: von der Idee zum Launch.
Weinheim: Wiley-VCH, 2002.
- DAENZER, W.F.; HUBER, F. (HRSG.); HABERFELLNER, R.; NAGEL, P.; BECKER, M.; BÜCHEL, A.; VON MASSOW, H.:
Systems Engineering. 11. Auflage.
Zürich: Verlag Industrielle Organisation, 2002.

- DEMMEERER, S.:
Simulation von Schallfeldern am Kraftfahrzeug.
München: TU, Diss. 2002.
- DEUBZER, F.; KREIMEYER, M.; HERFELD, U.; LINDEMANN, U.:
A structured holistic approach for the integration of CAD and CAE environments.
In: Proceedings of ProSTEP iViP Science Days 2005.
Darmstadt: Cross-Domain-Engineering, 2005.
- DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR):
Abteilung Flugdynamik und Simulation, Institut für Flugsystemtechnik, Flugdynamik und Simulation.
[entnommen am 11.05.2009, http://www.dlr.de/ft/desktopdefault.aspx/tabid-1358/1891_read-3328/]
- DETTMERING, H.:
PDM und Engineering-Informationssysteme.
München: TU, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, Umdruck zur Vorlesung PDM und Engineering-Informationssysteme 2005.
- DIN25008:2005-10
Schienenfahrzeuge - Grundsätze für die Bestimmung der Fahrzeugmassen - Begriffe, Formelzeichen, Werte.
Berlin: Beuth, 2005.
- DIN69901:2009-01
Projektmanagement - Projektmanagementsysteme – Teil 1: Grundlagen.
Berlin: Beuth, 2009.
- DIN EN ISO 9000:2005
Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe.
Berlin: Beuth, 2005.
- DOBBERKAU, K.:
Aufgabenorientierte Methodenanpassung in der Produktentwicklung am Beispiel des Qualitätsmanagements.
Kaiserslautern: Univ., Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, Diss. 2002.
- DOPPLER, K.; LAUTERBURG, C.:
Change Management. Den Unternehmenswandel gestalten, 11. Auflage.
Frankfurt/Main: Campus, 2005.
- DÖRNER, D.:
Die Logik des Mißlingens. Strategisches denken in komplexen Situationen.
Reinbeck: Rowohlt/rororo, 2003.

- DRUCKER, P.:
The Practice of Management.
Amsterdam: Elsevier, 2007.
- DUDEN (BEGR.):
DUDEN - Das Fremdwörterbuch.
Mannheim: Bibliographisches Institut, 1974.
- EHRENSPIEL, K.:
Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion.
München: Hanser, 2007.
- EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.:
Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 2. Auflage.
Berlin: Springer, 1998.
- EIGNER, M.; STELZER, R.:
Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Lifecycle Management, 2. Auflage.
Berlin: Springer, 2009.
- ELVERS, J.:
Modellbildung in der Pneumatik.
Vorstellung Projektidee (VDMA-Arbeitskreis Fluidtechnik - Pneumatik).
Aachen: RWTH, IFAS - Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, 2009.
- FLUIDON GESELLSCHAFT FÜR FLUIDTECHNIK (HRSG.):
Bauteilhandbuch Pneumatik.
Aachen: 2008 – Firmenschrift.
- FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003.
- FRIEDEL, T.:
Numerical Simulation of Production from Tight-Gas Reservoirs by Advanced Stimulation Technologies.
Freiberg: TU Bergakademie, Diss. 2004.
- GALPIN, T.:
The human side of change.
San Francisco: Jossey-Bass, 1996.
- GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.P.:
Kooperatives Produktengineering.
Paderborn: HNI, 2000 (HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 79).

- GERLACH, S.; SQUARR, I.:
Methodenhandbuch für Softwareschulungen.
Berlin: Springer, 2004.
- GIAPOULIS, A. [1999A]:
Introduction of method in Industry.
In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of ICED 99, München.
München: Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, 1999, Vol. 1, S. 241-244
(Schriftenreihe WDK 26).
- GIAPOULIS, A. [1999B]:
Clarification of the task and the human factor.
In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of ICED 99, München.
München: Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, 1999, Vol. 3 S. 1531-1534 (Schriftenreihe WDK 26).
- GIAPOULIS, A. [2000]:
Einsatz von Methoden zur Produktentwicklung in der industriellen Praxis. Tagung: Erfolgreiche Produktentwicklung 2000, Stuttgart.
Düsseldorf: VDI, 2000 (VDI-Berichte 1558, S. 1-9).
- GILLMANN, W.:
Maschinenbau steckt im Auftragstal fest.
Handelblatt online 30.07.2009 [entnommen am 19.11.2009, URL:
<http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/maschinenbau-steckt-im-auftragstal-fest;2438779>].
- GOUVINHAS, R.P.; CORBETT, J.:
A discussion on why design methods have not been widely used within industry.
In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of ICED 99, München
München: Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, 1999, Vol. 2, S. 1167-1170 (Schriftenreihe WDK 26).
- GREEN, M.:
Change Management Masterclass: A Step-by-step Guide to Successful Change Management.
London: Kogan Page Limited, 2007.
- GRIEVES, M.:
Product Lifecycle Management – Driving the Next Generation of Lean Thinking.
New York: McGraw-Hill, 2006.
- HAMACHER, W.; PAPE, D.:
Effiziente PPS-Einführung – Voraussetzung für zukunftssichere Mittelbetriebe.
Köln: TÜV Rheinland, 1991.

HEINE, A.-K.:

Individuelle dreidimensionale Simulation von Weichteilveränderungen im Gesichtsbereich - eine Finite-Elemente-Studie.
München: LMU, Diss. 2005.

HERFELD, U.:

Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und Simulation.
München: TU, Diss. 2007.

HERBIG, B.; MÜLLER, A.; PETROVIC, K.; PECQUET, N.; GRAEBSCH, M.; KREIMEYER, M.:

Implicit knowledge in the product innovation process - Method development and first results.
Berichte aus dem Lehrstuhl für Psychologie der TU München (2006) 83, S. 1-89.

HEBLING, T.:

Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: TU, Diss. 2006.

HIRT, K.:

Das 3-Phasen-Konzept für die PPS-Einführung. In: Hachstein, R. (Hrsg.): Auswahl, Einführung und Überprüfung von PPS-Systemen.
Köln: TÜV Rheinland, 1990, S. 5-23.

HOFFMANN, H.; KOHNHÄUSER, M.:

Wirtschaftliche Blechumformung durch Simulation.
Werkstatt und Betrieb 132 (1999) Nr. 6, S. 70-72.

HUTTERER, P.:

Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2005.

IDELCHIK, I. E.; FRIED, E.:

Flow Resistance: A design guide for engineers.
New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1986.

ISO 6358:

Fluidtechnik, Pneumatik; Bauteile für kompressible Fluide; Bestimmung von Kennwerten der Durchflußmenge. Oktober 1989

KARATZA, H.:

A Comparative Analysis of Scheduling Policies in a Distributed System using Simulation. In: International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology.
Nottingham: Nottingham Trent University, School of Computing and Informatics, 2000, Vol. 1 Nr. 1-2 S. 12-20.

- KARNOPP, D.; MARGOLIS, D.; ROSENBERG, R.:
System Dynamics – Modeling and Simulation of Mechnatronic Systems. Third Edition.
New York: John Wiley & Sons, 2000.
- KIBNER, H.; STÜRING, S.:
Die virtuelle Werkzeugmaschine – Ein Praxisbericht.
In: Schulze, T.; Graham, H.; Preim, B.; Schlechtweg, S. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung
Erlangen: SCS Publishing House e.V., 2005, S. 393-397.
- KLEEDÖRFER, R.:
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 1998.
- KNORR-BREMSE AG (HRSG.):
Business Process Manual – Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge.
München: 2005 – Firmenschrift.
- KNORR-BREMSE SFS GMBH (HRSG.):
Cadim Dokumentation Kapitel 04 – Beschreibung des EA-Ablaufs, Version 05.
München: 2009 – Firmenschrift.
- KNORR-BREMSE AG (HRSG.):
Geschäftsbericht 2008.
München: 2009 – Firmenschrift.
- KNORR-BREMSE SFS GMBH (HRSG.):
Grundlagen der Bremstechnik.
München: 2003 – Firmenschrift.
- KNORR-BREMSE SFS GMBH (HRSG.):
Sandungssysteme.
München: 2002 – Firmenschrift.
- KOCH, R.:
Entwicklung eines modularen Systems für die Projektierung und Angebotskonstruktion.
Aachen: RWTH, Diss. 1985.
- KÖHLER, S.:
Einführung von Projektmanagement in ein mittelständisches Unternehmen.
Düsseldorf: VDI, 2003 (VDI-Berichte 1804, S. 45-52).
- KOHLHOFF, K.:
Simulation und Virtuelle Realität in der Medizin, Thema: Genetik und Medizin.
Karlsruhe: TH, Proseminar, 2002.

KOLLER, R.:

Expertensysteme in der Konstruktion.

Konstruktion Nr.43 (1991), S. 339-343.

KÖRSMEIER, R.:
Kundennahe, rechnergestützte Angebotserstellung im Vertriebsaußendienst für komplexe Investitionsgüter.

Düsseldorf: VDI, 1996 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16 Nr. 89).

KRAFT, A.:

Numerische Simulation von Entrauchungsszenarien.

Intelligente Architektur 11-12 (2003), S. 60 (Themenreport Brandschutz).

KREIMEYER, M.:

A Structural Measurement System for Engineering Design Processes.

München: TU, Diss. 2010.

KREIMEYER, M.; KEIJZER, W.; LINDEMANN, U.:

Methodisches Handeln bei Krisen in der Produktentwicklung.

Konstruktion, 2007, Nr. 9, S. 104-106.

KRUMMHEUER, E.:

Bahntechnik: Die Kleinen kommen.

Handelblatt online 23.09.2008 [entnommen am 19.11.2009, URL:

http://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand_aktuell/bahntechnik-die-kleinen-kommen;2045467]

LÄMMEL, U.; CLEVE, J.:

Künstliche Intelligenz, 3. neu bearbeitete Auflage.

München: Hanser, 2008.

LANGENSCHIEDTS GROßES SCHULWÖRTERBUCH:

Lateinisch-Deutsch.

Berlin: Langenscheidt, 1983.

LIENEMANN, J.:

Complexity Reduction Techniques for Advanced Mems Actuators Simulation.

Freiburg: U, Diss. 2006.

LINDEMANN, U.:

Methodische Entwicklung technischer Produkte, 2. bearbeitete Auflage.

Berlin: Springer, 2007.

LINDEMANN, U.; ANTON, TH.; KREIMEYER, M.:

Krisen in der Entwicklung.

München: TU, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Umdruck zur Übung Krisen in der Entwicklung der Vorlesung Methoden der Produktentwicklung, 2007.

- LINDEMANN, U.; GAAG, A.; SCHNEIDER, S.; WACH, J.; HERDEN, M.; RASEL, T.; ANTON, TH. [2006A]:
Simulation pneumatischer Systeme als Hilfsmittel der Projektierung von Bremssteuerungen für Schienenfahrzeuge.
In: 8. Internationale Schienenfahrzeugtagung.
Dresden: Eurailpress Tetzlaff-Hestra, 2006.
- LINDEMANN, U.; SCHNEIDER, S.; WACH, J.; HERDEN, M.; ANTON, TH. [2006B]:
Optimisation of brake systems by the implementation of pneumatic simulation.
In: 5th International Fluid Power Conference Aachen.
Aachen: Shaker, 2006.
- LINGAU, V.:
Variantenmanagement.
Berlin: Schmidt, 1994.
- LINNHOF, M.:
Konzeption eines Instrumentariums zur Konfiguration von Funktionalen Auftragsnetzen.
Aachen: RWTH, Diss. 1993.
- LIPSON, H.; POLLACK, J.:
Automatic Design and Manufacture of Robotic Lifeforms.
Nature Vol. 406 (2000), S. 974-978.
- LMS INTERNATIONAL (HRSG.):
Multi-Physics System Simulation for Vehicle Energy Management Optimization.
Lyon: 2009 – Firmenschrift.
- LORENZ, M.:
Handling of Strategic Uncertainties in Integrated Product Development.
München: TU, Diss. 2008.
- MARCA, D. & MCGOWEN, C.L.:
SADT - Structural Analysis and Design Technique.
New York: McGraw-Hill, 1988.
- MICHEL, A.:
Computer-Simulationen zum Adsorptionsverhalten polymerer Ketten auf rauen Oberflächen.
Regensburg: Universität, Diss. 2003.
- MIKOLAJEWICZ, U. ET AL.:
Die Simulation von Eiszeitzyklen mit einem komplexen Erdsystemmodell.
München: Max-Planck-Gesellschaft (Tätigkeitsbericht 2004), S. 439-443.

MINNEMANN, S.:

The Social Construction of a Technical Reality - Empirical Studies of Group Engineering Practice.

Palo Alto: Stanford University, Diss. 1991.

MINOR, M.:

Patentrezepte führen in die Irre.

In: Handelsblatt 19./20.03.1999 (55).

MÖLLER, D.:

Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme

Berlin, Heidelberg: Springer, 1992.

MURRENHOF, H.:

Grundlagen der Fluidtechnik: Teil 2 Pneumatik, 2. Auflage.

Aachen: Shaker, 2006.

NIEDEREICHHOLZ, J.; RESKE, J.:

Probleme bei der Einführung von Standardsoftware.

In: Kohnke, O.; Bungard, W. (Hrsg.): SAP-Einführung mit Change Management, 1. Auflage.

Wiesbaden: Gabler, 2005, S. 75- 85.

PAHL, G.; BEITZ, W. FELDHUSER, J.; GROTE, K.H.:

Konstruktionslehre Grundlagen, 7. Auflage.

Berlin: Springer, 2007.

PMI

A Guide To The Project Management Body Of Knowledge.

Newtown Square: Project Management Institute (PMI), 2003.

POHL, M.:

Sicherheit auf Schiene und Strasse. Die Geschichte der Knorr-Bremse AG.

München: Pieper, 2005.

PONN, J.:

Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.

München: TU, Diss. 2007.

RANGAN, R.; ROHDE, S.; PEAK, R.; CHADHA, B.; BLIZNAKOV, P.:

Streamlining Product Lifecycle Processes: A Survey of Product Lifecycle Management Implementations, Directions, and Challenges.

Journal of Computing and Information Science in Engineering Vol. 5 (2005), S. 227-237.

REETZ, U.:

Performance Measurements – a Key Method for a Guided Implementation of Concurrent Engineering Principles into Product Development Processes.

In: Walker, R.; Weber, F. (Eds.): PACE'97 – A Practical Approach to Concurrent Engineering, Proceedings of the European Workshop, S. 39-52.

Portugal: (Eigenverlag) 1997

REINICKE, T.:

Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung: Eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration.

Berlin: TU, Diss. 2004.

RHOTE-VANEY, R.; THOMAS, V.; LEKEUX, A.:

Transient modelling of cryogenic rocket engines a modular approach.

Congrès CNES – Liège, Belgien (2002).

RICHTER, M.:

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen.

Karlsruhe: TH, Diss. 1992.

RICHTER, M.; IBERLE, F.:

Expertensystem zur Projektierung hydraulischer Anlagen.

O + P (Ölhydraulik und Pneumatik) 36 (1992) Nr. 2, S. 76-81.

RITZÉN S.; BESKOW, C.; NORELL, M.:

Continuous Improvement of the Product Development Process

In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Proceedings of ICED 99, München.

München: Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau 1999, Vol. 2 S. 792-798

(Schriftenreihe WDK 26).

ROSENSTIEL, L.V.; COMELLI, G. :

Führung zwischen Stabilität und Wandel.

München: Franz Vahlen, 2003.

ROOS, E.:

Benutzerfreundliche Gestaltung auch bei PPS-Systemen.

In: Hachstein, R. (Hrsg.): Auswahl, Einführung und Überprüfung von PPS-Systemen.

Köln: TÜV Rheinland, 1990, S. 112-121.

SAKAS, G.; BOCKHOLT, U.:

Anwendungen der Virtuellen und erweiterten Realität in der Medizin.

In: Schulze, T.; Graham, H.; Preim, B.; Schlechtweg, S. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung.

Erlangen: SCS Publishing House e.V., 2005, S. 383-392.

SAUMWEBER, E.; WINKLE, G.:

Eine neue Generation von Eisenbahnen unter Verwendung von Mikroprozessoren.
Elektrische Bahnen (1981) S. 2-4.

SCHEURING, H.:

Projektmanagement zur Kernkompetenz des Unternehmens machen.
Düsseldorf: VDI, 2002 (VDI-Berichte 1726, S. 163-183).

SCHNEIDER, S.; ANTON, TH.:

Simulating pneumatic brake systems with AMESIM.
In: European AMESIM User Conference, Strasbourg, ASME-Books, 2006.

SCHMITZ, R.:

Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Bewertung von Methoden für die Implementierung von Produktionsplanungs- und steuerungssystemen.
Aachen: RWTH, Diss. 1998.

SCHUH, G.:

Beherrschung der Variantenvielfalt – Methoden und Tools zum Komplexitätsmanagement bei Produkten und Prozessen, Stuttgart.
Düsseldorf: VDI, 2001.

SCHULZ, R.:

Simulationsgestützte Beurteilung der logistischen Qualität innerbetrieblicher Entsorgung.
Stuttgart: Universität, Diss. 2002.

SCHUMANN, F.:

Methoden und Werkzeuge zur Integration der kundengerechten Wertgestaltung in der Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses.
Chemnitz: TU, Diss. 2001.

SCHWANKL, L.:

Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2002.

SEKAR, B.; CHUNG, C.:

Design and Development of a Training Simulator for Pre-Operational Setup Procedures on Computer Numerically Controlled Turning Centers.
Journal of Engineering Systems Simulators, Vol. 1 No. 4 (2004), S. 11-18.

SIGLOCH, H.:

Technische Fluidmechanik.
Berlin: Springer, 2004.

SINN, H.-W.:

Basar-Ökonomie Deutschland – Exportweltmeister oder Schlusslicht?

ifo Schnelldienst, 58. Jg. 6/2005, Sonderausgabe.

München: Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München, 2005.

SOMMER, O.:

Interaktive Visualisierung von Strukturmechaniksimulationen.

Stuttgart: Universität, Diss. 2003.

STAHLKNECHT, P.; HASENKAMP, U.:

Einführung in die Wirtschaftsinformatik, 11. Auflage.

Berlin: Springer, 2005.

STEIMEL, A.:

Lebensdauer und Verfügbarkeit von Elektronikkomponenten für Schienenfahrzeuge Bericht

zum Workshop am 07.04.2005 in Bochum. [entnommen am: 11.08.2007, URL:

<http://www.vde.com/VDE/Fachgesellschaften/ETG/Arbeitsgebiete/Bahnen+und+Fahrzeuge/2005-Oeffentlich/Lebensdauer+Bericht.htm>]

STEIN, T.:

PPS-Systeme und organisatorische Veränderungen – Ein Vorgehensmodell zum wirtschaftlichen Systemeinsatz.

Berlin: Springer, 1996.

STETTER, R.:

Method Implementation in Integrated Product Development.

München: TU, Diss. 2000.

STÜTZLE, T.; VIERECK, U.; ENNING, M.; STRIBERSKY, A.; RULKA, W.:

Adaptiver Gleitschutz für Schienenfahrzeuge.

at Automatisierungstechnik 54 (2006) S. 139-148.

TANNER DOKUMENTS GMBH+CO. (HRSG.):

"Es entsteht ein unternehmensweiter Know-how-Speicher" – EDM und die Zukunft der technischen Dokumentation.

Das ABZ – Technik gestalten, präsentieren, erklären, ABZ 8-9/1999 [Interview mit Dr. Martin Eigner, entnommen am 22.08.2007, URL: http://www.tanner.de/de/fachportal-technischedokumentation-redaktionssysteme/artikel/produkte-systemintegration/edm_techndoku.html]

TECHNISCHE UNIVERSITÄT KARL-MARX-STADT (HRSG.):

Rechnergestützte Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen mit CAD-FAIF.

Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt, wissenschaftliche Schriftenreihe (1989)

THIELE, H.-H.:

Tag für Tag harte Bretter bohren.
KB aktuell – Ausgabe 10/09 Heft 58 (2009) S. 16-21.

TOSSAVAINEN, T.:

Systemusability of complex technical system.
Helsinki: TU, Diss. 2002.

TROITZSCH, K.; MÖHRING, M.; MEYER, U.:

Verhaltenskoordination im Katastrophenfall - Ein Simulationsmodell.
In: Engeli, M.; Hrdliczka, V. (Hrsg.): Simulationstechnik, 12. Symposium in Zürich, 1998.
Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998, S. 443-450.

TROITZSCH, K.:

A Multi-Agent Model of Bilingualism in a Small Population.
In: Coelho, H.; Espinasse, B. (Hrsg.): 5th Workshop on Agent-Based Simulation, Lissabon
Erlangen: SCS Publishing House, 2004, S. 38-43.

USHER, J.:

Implementing Concurrent Engineering in Small Manufacturing Enterprises.
In: Engineering Management Journal, Vol. 8 Nr.1, S. 33-43, März 1996.

VDI- RICHTLINIE 2219:

Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Einführung und Wirtschaftlichkeit von
EDM/PDM-Systemen - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.
Düsseldorf: VDI, 2002.

VDI- RICHTLINIE 2222.:

Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.
Düsseldorf: VDI, 1996.

VDI-RICHTLINIE 3633, BLATT 1 (ENTWURF):

Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen (Grundlagen).
Berlin: Beuth, 2000.

VIERTLBÖCK, M.:

Modell der Methoden- und Hilfsmittelleinführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2000.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.)

Effektive Entwicklung und Auftragsabwicklung variantenreicher Produkte.
Düsseldorf: VDI, 1998 (VDI Berichte 1434, Tagung Würzburg, 7. und 8. Oktober 1998), S. 83-
91 und S. 197-211.

VDMA BETRIEBSWIRTSCHAFT (HRSG.):

VDMA-Kennzahlen vergleichen, verstehen, verändern Vertrieb 2007.
Frankfurt am Main: VDMA, 2007.

VDMA LAGEBERICHT:

Statistisches Erfassungsmaterial des VDMA, Lagebericht.
Frankfurt am Main: VDMA, 1976.

WACH, J. J.:

Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 1994.

WENZEL, S.:

Das House of Integrated Product Development: Anforderungsgerechte Auswahl und Integration von Methoden und Werkzeugen für die Produktentwicklung.
Tagung: Erfolgreiche Produktentwicklung 2000, Stuttgart
Düsseldorf: VDI, 2000 (VDI-Berichte 1558, S. 345-358).

WEULE, H.; LEMBKE, K.:

Integrierte Projektierung am Beispiel der rechnergestützten Aggregatauslegung.
O + P (Ölhydraulik und Pneumatik) 43 (1999) Nr. 2, S. 113-117.

WILDEMANN, H.:

Variantenmanagement; Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess.
München: TCW Transfer-Centrum, 2009.

WULF, J.:

Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: TU, Diss. 2002.

ZWICKE, M.:

Projektmanagement im Engineering am Beispiel einer Schienenfahrzeugentwicklung.
Düsseldorf: VDI 2003 (VDI-Berichte 1804, S. 53-64).

10. Anhang

Gegenüberstellung 4-Phasenmodell und Anwendung während der Fallstudie

Abbildungen auf Seite 180 und 181

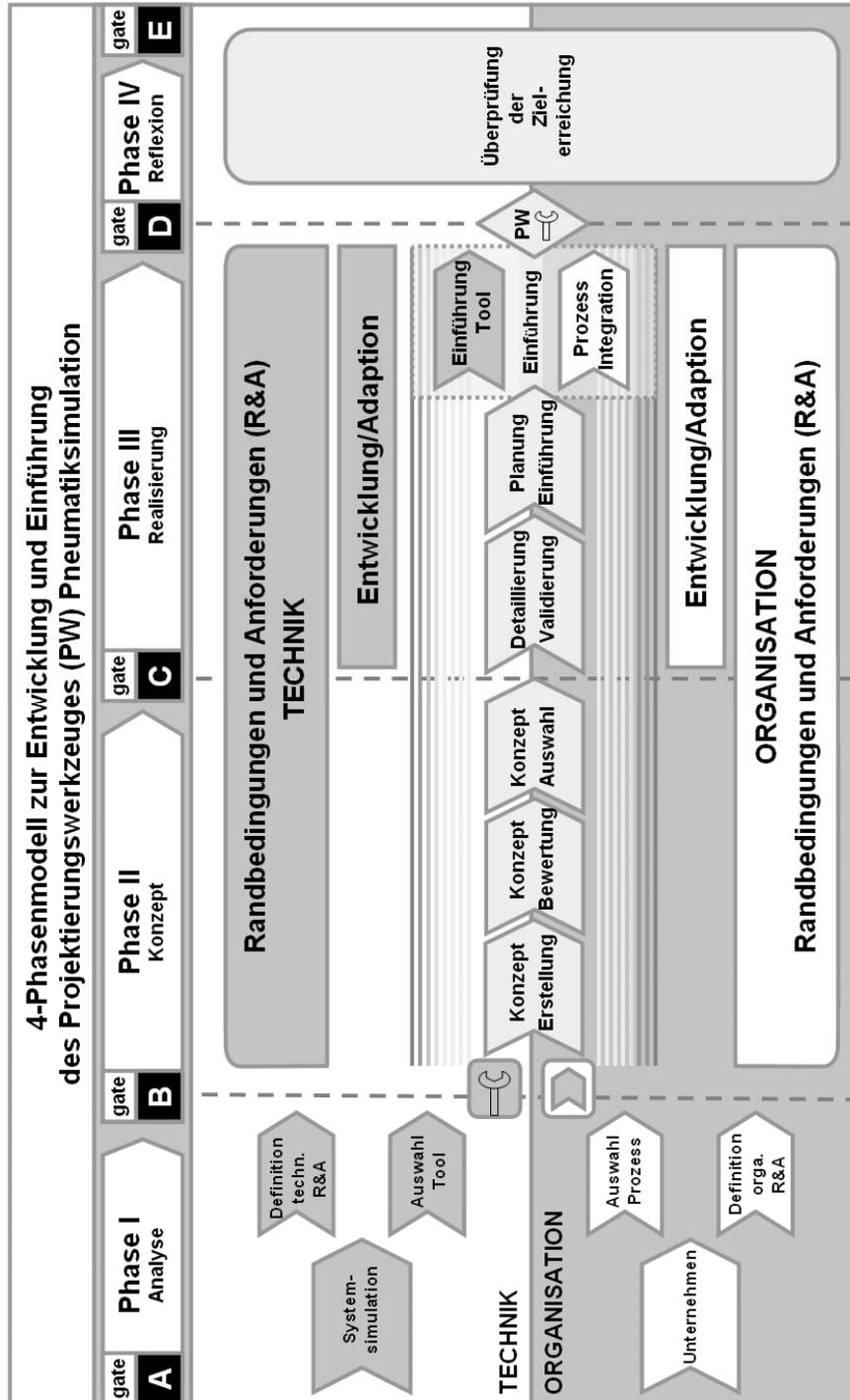


Abbildung A1: 4-Phasenmodell zur Entwicklung und Einführung des Projektierungswerkzeuges Pneumatiksimulation

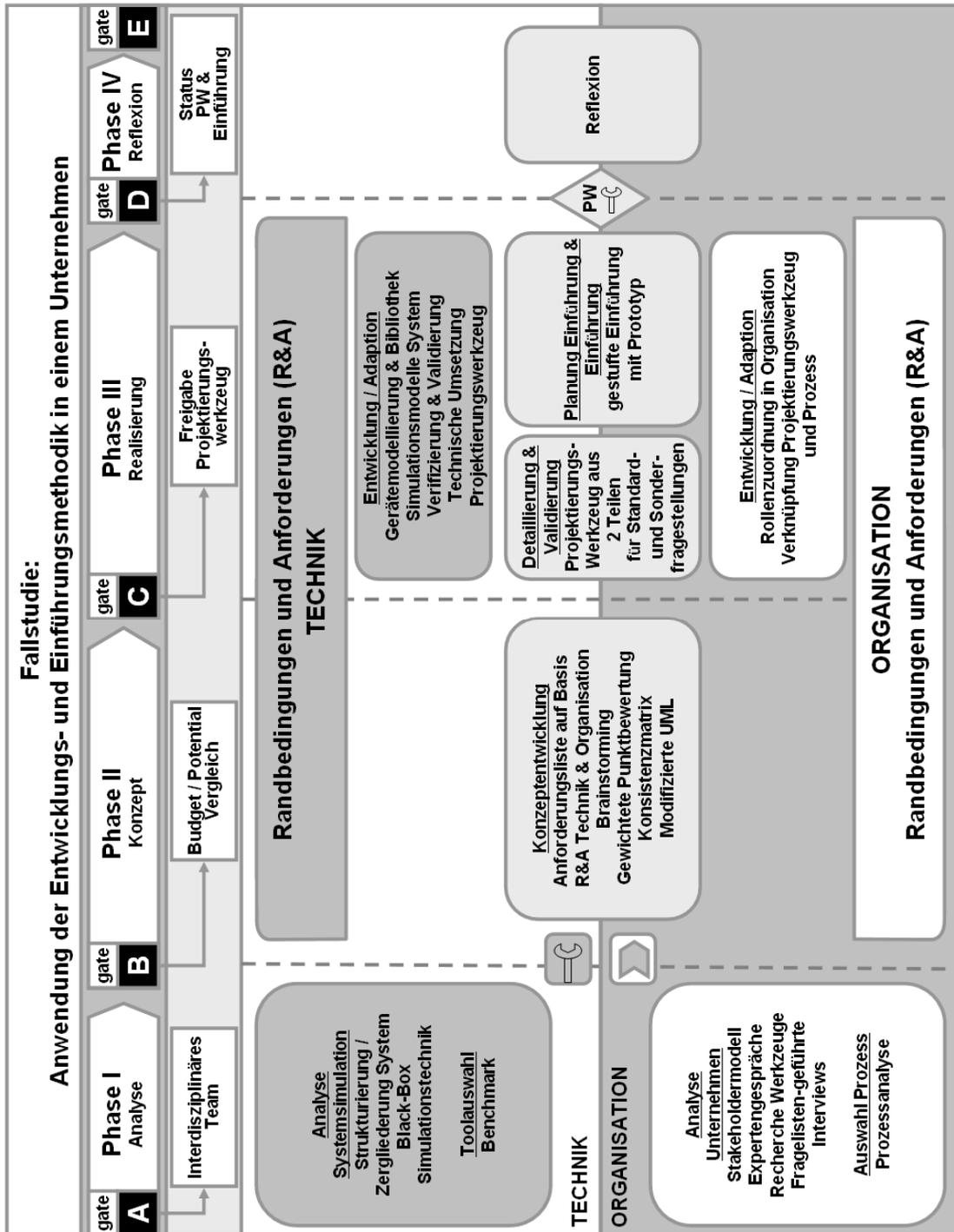


Abbildung A2: Evaluation in Form einer Fallstudie –
Anwendung der Methodik in einem Unternehmen

11. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode. München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1978.

- D11 HEISIG, R.:
Längencodierer mit Hilfsbewegung.
München: TU, Diss. 1979.
- D12 KIEWERT, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60).
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985. Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:
Konstruieren als gedanklicher Prozess.
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMANN, H. J.:
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gussgehäusen.
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.
München: TU, Diss. 1987.

- D25 FIGEL, K.:
Optimieren beim Konstruieren.
München: Hanser 1988. Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.

Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1). Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2). Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSTEINER, H.-J.:
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3). Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluss an ein CAD-System.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.:
Datenbankgestützte Teileverwaltung und Wiederholteilsuche.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D32 NEESE, J.:
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:
Systematischer Entwicklungsprozess am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D38 LENK, E.:
Zur Problematik der technischen Bewertung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D40 SCHIEBELER, R.:
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25). Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.: MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPOULIS, A.:
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27). Zugl. München: TU, Diss. 1996.

- D53 STEINMEIER, E.:
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D55 GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIERSACK, H.:
Methode für Krafteinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖSSER, R.:
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36). Zugl. München: TU, Diss. 1999.

Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D64 ASSMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40). Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D67 STETTER, R.:
Method Implementation in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:
Modell der Methoden- und Hilfsmiteleinführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D69 COLLIN, H.:
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:
Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003.
- D81 GRAMANN, J.:
Problemmodelle und Bionik als Methode.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D82 PULM, U.:
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56). Zugl. München: TU, Diss. 2004.

- D83 HUTTERER, P.:
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 58). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D85 PACHE, M.:
Sketching for Conceptual Design.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:
Anforderungskklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 61). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 62). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D89 STRICKER, H.:
Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 63). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D90 NIBL, A.:
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 64). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D91 MÜLLER, F.:
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 65). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D92 ERDELL, E.:
Methodenanwendung in der Hochbauplanung – Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 66). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D93 GAHR, A.:
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D94 RENNER, I.:
Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung) Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D95 PONN, J.:
Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung) Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D96 HERFELD, U.:
Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 70). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D97 SCHNEIDER, S.:
Model for the evaluation of engineering design methods.
München: Dr. Hut 2008 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.

- D98 FELGEN, L.:
Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D99 GRIEB, J.:
Auswahl von Werkzeugen und Methoden für verteilte Produktentwicklungsprozesse.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D100 MAURER, M.:
Structural Awareness in Complex Product Design.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D101 BAUMBERGER, C.:
Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D102 KEIJZER, W.:
Wandlungsfähigkeit von Entwicklungsnetzwerken – ein Modell am Beispiel der Automobilindustrie.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D103 LORENZ, M.:
Handling of Strategic Uncertainties in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2008.
- D104 KREIMEYER, M.:
Structural Measurement System for Engineering Design Processes.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D105 DIEHL, H.:
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D106 DICK, B.:
Untersuchung und Modell zur Beschreibung des Einsatzes bildlicher Produktmodelle durch Entwicklerteams in der Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D107 GAAG, A.:
Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D108 ZIRKLER, S.:
Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D109 LAUER, W.:
Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D110 MEIWALD, T.:
Konzepte zum Schutz vor Produktpiraterie und unerwünschtem Know-how-Abfluss.
TU München: 2010. (als Dissertation eingereicht)
- D111 ROELOFSEN, J.:
Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen.
Zugl. München: TU, Diss. 2011
- D112 PETERMANN, M.:
Schutz von Technologiewissen in der Investitionsgüterindustrie.
Zugl. München: TU, Diss. 2011

D113 GORBEA, C.:

Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis in a New Age of Architectural Competition.
Zugl. München: TU, Diss. 2011

D114 FILOUS, M.:

Lizenzierungsgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden zur Integration lizenzierungsrelevanter Aktivitäten in Produktentstehungsprozessen des Maschinen- und Anlagenbaus.
TU München: 2011. (als Dissertation eingereicht)