

**Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen
Entwicklungsprozess**

Sonja Schedl

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

Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Igenbergs, i. R.

Die Dissertation wurde am 02.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 09.12.2008 angenommen.

Sonja Schedl

**Integration von Anforderungsmanagement
in den mechatronischen Entwicklungsprozess**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 229

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2008

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2009

ISBN 978-3-8316-0874-4

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Zwei Dinge sollten Kinder von Ihren Eltern bekommen:

Wurzeln und Flügel

Johann Wolfgang von Goethe

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	X
Verzeichnis der verwendeten Tabellen	XII
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Herausforderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme	1
1.3 Bestehende Defizite bei der Nutzung von Anforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess von Produktionsmaschinen	2
1.4 Fokus der Arbeit.....	3
1.5 Anforderungsmanagement	4
1.5.1 Der Begriff „Anforderungen“ in der technischen Entwicklung.....	4
1.5.2 Anforderungsmanagement und Requirements Engineering	5
1.6 Mechatronische Produktionssysteme.....	9
1.6.1 Allgemeines	9
1.6.2 Bedeutung des Begriffs Mechatronik.....	10
1.6.3 Charakterisierung von Produktionssystemen	11
1.6.4 Produktionssysteme als mechatronische Systeme.....	12
1.7 Der Entwicklungsprozess.....	14
1.7.1 Definition des mechatronischen Entwicklungsprozesses.....	14
1.7.2 Abgrenzung des Entwicklungsprozesses.....	15
1.7.3 Potenzial der mechatronischen Entwicklung	16
1.8 Zielsetzung	18

1.9	Vorgehensweise	18
2	Stand von Forschung und Technik	21
2.1	Allgemeines	21
2.2	Methoden des Anforderungsmanagements.....	21
2.2.1	Methoden in der Anforderungsspezifikation	24
2.2.1.1	Das Anwenderinterview	24
2.2.1.2	Der Anforderungsworkshop	25
2.2.1.3	Die Dokumentenanalyse.....	26
2.2.1.4	Arbeiten im Benutzerumfeld	27
2.2.1.5	Der IEEE-Standard	27
2.2.1.6	Die Multimediaspezifikation	29
2.2.1.7	Strukturierte Analyse.....	29
2.2.1.8	Anwendungsfälle	30
2.2.2	Techniken zur Überprüfung der Anforderungsspezifikation	31
2.2.2.1	Review	31
2.2.2.2	Priorisierung	32
2.2.2.3	Prototypisierung.....	33
2.2.2.4	Inspektion	33
2.3	Methoden der mechanischen Konstruktion	34
2.4	Kommunikation im mechatronischen Entwicklungsprozess.....	38
2.5	Rechnerwerkzeuge in der mechatronischen Entwicklung.....	41
2.6	Kosten und Kostenschätzung im Entwicklungsprozess	42
2.7	Rechnerunterstützung bei der Kostenschätzung	45

2.7.1	Abschätzung von mechanischen Kosten	46
2.7.2	Abschätzung von Software-Kosten	47
2.8	Systemtheorie	52
2.9	Zusammenfassung	53
3	Vorgehen zur kontinuierlichen Anforderungshandhabung	55
3.1	Allgemeines	55
3.2	Phase 1: Planung der Anforderungserfassung	56
3.2.1	Vorbereitungen für die Integration der kontinuierlichen Anforderungshandhabung	56
3.2.2	Strukturierung des Gesamtsystems	59
3.2.2.1	Orientierung an Baugruppen	60
3.2.2.2	Orientierung an Funktionen	62
3.2.2.3	Mechatronische Struktur	64
3.2.2.4	Beurteilung der Strukturierungsvorgehen	65
3.2.3	Modularität der Anforderungsstrukturierung	66
3.2.3.1	Bestandteile des Anforderungsmoduls	66
3.2.3.2	Schnittstellen des Anforderungsmoduls	68
3.2.3.3	Zustände im Anforderungsmodul	69
3.2.4	Verknüpfungen zwischen Anforderungsinhalten	71
3.2.5	Modulare hierarchische Strukturvorlage zur Aufnahme von Anforderungen	72
3.3	Phase 2: Beschreibung der Anforderungen	73
3.3.1	Aufnahme und Darstellung der Anforderungen	73
3.3.2	Allgemeine Richtlinien für die Formulierung von Anforderungen .	73

3.3.3	Spezielle Vorschriften für ein nachhaltiges Formulieren von Anforderungen	75
3.3.4	Umsetzung im Anforderungsmanagement-Prozess	75
3.4	Phase 3: Nutzung der Anforderungen in der Entwicklung	77
3.4.1	Durchgängige Nutzung der Anforderungen im Entwicklungsprozess 77	
3.4.2	Gemeinsame Datenbasis	77
3.4.3	Automatische Verknüpfung	78
3.4.4	Änderung und Aktualisierung von Daten	79
3.4.5	Kostenabschätzung	81
3.5	Umsetzung in einem Rechnerwerkzeug	82
3.6	Zusammenfassung	85
4	Exemplarische Umsetzung in einem Anforderungsmanagement- Werkzeug	87
4.1	Allgemeines	87
4.2	Anforderungen an ein unterstützendes Rechnerwerkzeug	87
4.3	Vorhandene Funktionalitäten des Anforderungsmanagement-Werkzeugs 88	
4.3.1	Übersicht der vorhandenen Funktionalitäten von DOORS.....	88
4.3.2	DOORS Extension Language DXL	88
4.3.3	Anforderungsobjekte	88
4.3.4	Verknüpfungen zwischen Anforderungsobjekten.....	90
4.3.5	Projekte und Ordner	90
4.4	Umsetzung identifizierter Funktionalitäten	91

4.4.1	Erweiterungen und Ergänzungen von Funktionen	91
4.4.2	Modulare, hierarchische Systemstruktur	92
4.4.3	Modulvorlage	93
4.4.4	Automatische interne Verknüpfung	94
4.4.5	Abschätzung von Kosten im Anforderungsmanagement-Werkzeug	96
4.4.6	Ausgabe in XML	98
4.4.7	Verknüpfung mit einem Werkzeug der Installationsplanung	100
4.4.8	Zusammenfassung	102
5	Anwendungsbeispiel.....	103
5.1	Lastenheftmanagement bei einem Anlagenbetreiber	103
5.1.1	Ausgangssituation.....	103
5.1.2	Problemstellung	104
5.1.3	Zielsetzung	105
5.1.4	Analyse der Anlagenstruktur	106
5.1.5	Analyse der Anwendungsfälle.....	107
5.1.6	Anlagenstruktur und Strukturvorlage.....	108
5.1.6.1	Struktur für allgemeine Anforderungen.....	108
5.1.6.2	Struktur für fachbereichsspezifische Anforderungen	109
5.1.6.3	Umsetzung der Struktur	110
5.1.7	Prozesse im Lastenheftmanagement	112
5.1.7.1	Integration in den Prozess „Technisches Investitionsprojekt“	112
5.1.7.2	Prozess zur Lastenhefterstellung	113
5.1.7.3	Prozess zur Lastenheftpflege	115

Inhaltsverzeichnis

5.1.8 Zusammenfassung.....	116
6 Bewertung der Vorgehensweise.....	117
6.1 Aufwand bei der Einführung und Umsetzung.....	117
6.2 Nutzen für die Projekte zur mechatronischen Entwicklung.....	119
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	121
7.1 Zusammenfassung	121
7.2 Ausblick	122
8 Literaturverzeichnis	123
Anhang.....	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Struktur eines IT-Lastenheftes nach DIN 69905	7
Abbildung 2:	Allgemeine Darstellung eines mechatronischen Systems	10
Abbildung 3:	Allgemeine Darstellung eines Produktionssystems.....	12
Abbildung 4:	Entwicklung der Kostenanteile in Produktionssystemen	13
Abbildung 5:	Dokumente und Aufgaben im mechatronischen Entwicklungsprozess (Quelle: [ZÄH ET AL. 2005])	14
Abbildung 6:	Der mechatronische Entwicklungsprozess im Umfeld der sonstigen unternehmerischen Abläufe (Quelle: [ZÄH ET AL. 2005]).....	15
Abbildung 7:	Das Spannungsfeld im mechatronischen Entwicklungsprozess (Quelle: [ZÄH ET AL. 2005])	17
Abbildung 8:	Modell des Requirements-Engineering-Prozesses nach [POHL 1996]	22
Abbildung 9:	IEEE-Standard zur Anforderungsspezifikation	28
Abbildung 10:	Anwendungsfalldiagramm nach [FOWLER & SCOTT 1999]	31
Abbildung 11:	Kriterienliste für die Inspektion von Anforderungen nach [SCHIENMANN 2002]	34
Abbildung 12:	Vergleich der Entwicklungsvorgehensweisen in der mechanischen Konstruktion [WALZ 1999]	36
Abbildung 13:	Unterschiedliche Konstruktionsarten nach [EHRENSPIEL 1995]	37
Abbildung 14:	Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen nach [ROMANOW 1994].....	38
Abbildung 15:	Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach [VDI 2221].....	40
Abbildung 16:	Kostenschätzung im Wasserfall-Modell eines Produkt- Entwicklungsprozesses (in Anlehnung an [ROYCE 1970]).....	43

Abbildung 17: Drei Phasen der ganzheitlichen Anforderungshandhabung	55
Abbildung 18: Untergliederung der ersten Phase der ganzheitlichen Anforderungshandhabung	56
Abbildung 19: Mengendarstellung der unstrukturierten und der strukturierten Aufnahme von Anforderungen.....	58
Abbildung 20: Kennzeichnung bereits befüllter und noch weiter zu detaillierender Subsysteme der Systemstruktur für die Aufnahme der Anforderungen.....	59
Abbildung 21: Strukturierung einer Werkzeugmaschine nach mechanischen Baugruppen.....	61
Abbildung 22: Komponenten mit elektronischen Eigenschaften bei der Strukturierung nach Bauteilen.....	62
Abbildung 23: Funktionale Strukturierung einer Werkzeugmaschine	64
Abbildung 24: Allgemeine Inhalte eines Anforderungsmoduls.....	67
Abbildung 25: Abbildung funktionaler Zusammenhänge über die Bauteilorientierte Struktur hinaus	71
Abbildung 26: Gliederung der zweiten Phase der kontinuierlichen Anforderungshandhabung	73
Abbildung 27: Beispiel für eine Vorlage für das hinterlegte Anforderungsmodul „Schnittbewegung“	76
Abbildung 28: Gliederung der dritten Phase der kontinuierlichen Anforderungshandhabung	77
Abbildung 29: Rückverfolgbarkeit der Auswirkungen einer Änderung auf die Anforderungsdatenbasis	80
Abbildung 30: Unterschiedliche Änderungszyklen in Abhängigkeit von den Auswirkungen der Änderung auf die Anforderungen.....	81
Abbildung 31: Software unabhängiges Vorgehen zur rechnertechnischen Umsetzung der beschriebenen Methode.....	83

Abbildung 32: Übertragung der Inhalte eines MS Word-Dokumentes in Anforderungsobjekte in DOORS.....	89
Abbildung 33: Modul und ordnerunabhängige Verknüpfung eines Objektes in DOORS am Beispiel einer Anlage für die Herstellung von Bauelementen.....	90
Abbildung 34: Beispiel einer in DOORS definierten Systemstrukturierung.....	92
Abbildung 35: Erstellen eines neuen Moduls in DOORS unter Verwendung der ergänzten Modulvorlage	94
Abbildung 36: Automatische Verknüpfung von Anforderungsobjekten in DOORS durch bezeichnende Ausdrücke.....	95
Abbildung 37: Automatische Summation von Kosten für einzelne Komponenten	97
Abbildung 38: Ausgabe der in DOORS abgelegten Daten als XML	99
Abbildung 39: Markiertes Modul in DOORS.....	101
Abbildung 40: Aus DOORS in COMOS übertragene Struktur.....	101
Abbildung 41: Beispiel für ein entwickeltes Fischgrätendiagramm zur Strukturierung der Fruchtkochanlage	106
Abbildung 42: Strukturierungsvorgehen „Eindeutige Cluster“	109
Abbildung 43: Darstellung der Informationen im „Poolansatz“	110
Abbildung 44: Darstellung der variablen Einbindung von Inhalten aus der Ordnerstruktur in das erstellte Lastenheft.....	111
Abbildung 45: Der Lastenheftmanagement-Prozess mit Verknüpfung zum Prozess „Technisches Investitionsprojekt“	112
Abbildung 46: Darstellung der Teile eines Lastenheftes und der Verknüpfung mit einer mit dem Prozess korrespondierenden Checkliste.....	113
Abbildung 47: Prozess der Erstellung eines Lastenheftes	114
Abbildung 48: Prozess der Lastenheftpflege	115

Abkürzungsverzeichnis

AM	Anforderungsmanagement
Anm.	Anmerkung
BDE	Betriebsdatenerfassung
BKM	Bayerisches Kompetenznetzwerk für Mechatronik
CAD	Computer Aided Design
CE	Concurrent Engineering
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CMMI	Capability Maturity Model Integration
bspw.	Beispielsweise
bzgl.	Bezüglich
bzw.	Beziehungsweise
d.h.	das heißt
DIN	Deutsche Industrienorm
DV	Datenverarbeitung
DXL	DOORS Extension Language
e.V.	eingetragener Verein
E-CAD	Electronical CAD
engl.	Englisch
et al.	et alii (deutsch: und andere)
etc.	et cetera
f	Folgende
ff	Fortfolgende
ID	Identifikations-Nummer

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
i.d.R.	in der Regel
ISO	International Organization for Standardization
LH	Lastenheft
M-CAD	Mechanical CAD
PDM	Produkt Daten Management
RE	Requirements Engineering
RM	Requirements Management
SA	Strukturierte Analyse
SE	Simultaneous Engineering
SHS	Siempelkamp Handling Systeme
SPICE	Software Process Improvement Capability Determination
SRS	Software Requirement Specification
sog.	so genannte
SW	Software
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
XML	Extensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Verzeichnis der verwendeten Tabellen

Tabelle 1: Werte für das COCOMO Basis-Modell	50
Tabelle 2: Werte für das fortgeschrittene COCOMO Modell	50
Tabelle 3: Werte aus dem ausgereiften COCOMO Modell.....	51
Tabelle 4: Aufwand für die Umsetzung der vorgestellten Methode.....	119

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die vorliegende Arbeit ist der Integration von Anforderungen in den mechatronischen Entwicklungsprozess gewidmet. Der Fokus liegt hierbei auf einer methodischen Aufnahme und Beschreibung der Kundenanforderungen bereits durch die Vertriebsabteilung, so dass diese in dem anschließenden Entwicklungsprozess durchgängig genutzt werden können.

In diesem Kapitel sollen zunächst die für diese Arbeit wichtigen Begriffe definiert bzw. erläutert und die Grenzen des Betrachtungsgebietes dargestellt werden. Die wesentlichen Aspekte hierbei sind das Anforderungsmanagement, die Mechatronik, der Entwicklungsprozess sowie Produktionssysteme.

1.2 Herausforderungen in der Entwicklung mechatronischer Systeme

Grund für den steigenden Konkurrenzdruck für deutsche Unternehmen ist die wachsende Anzahl an Anbietern durch die zunehmende Globalisierung der Märkte [CASPER 1999, DONGES 2004]. Dadurch werden Unternehmen immer mehr gezwungen, ihre internen Abläufe zu optimieren.

Während man sich im Bereich der Unternehmensorganisation oftmals der Techniken aus fernöstlichen Staaten bedient (vgl. „Lean Production“ aus Japan), kann für die verschiedenen Prozessbeschreibungen ebenfalls auf Erfahrungen aus unterschiedlichen Fachbereichen zurückgegriffen werden.

Die Mechatronik vereint die drei Ingenieursdisziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik, so dass durch fachbereichsübergreifende Synergien immer weitere Innovationen entstehen können.

Die Situation von Produktionsunternehmen wird vom schnellen technischen Fortschritt, der zunehmenden Internationalisierung und der damit verbundenen Wettbewerbsintensivierung geprägt. Da die Anforderungen an Produkte in den einzelnen globalen Absatzmärkten immer stärker differieren, lässt sich die zukünftige Marktsituation nur schwer abbilden [vgl. MILBERG 2000, S. 313; SCHULZ-WOLFGGRAMM 2000, S. 43].

Laut [SPATH 1998, S.12; MAYER 1999, S. 7; SPATH 2001, S. 235] werden Kunden in zunehmendem Maße individualisierte Güter in immer kürzerer Lieferzeit zu moderaten Preisen fordern. Verkürzte Produktlebenszyklen führen zu immer kürzeren Amortisierungszeiten, die das unternehmerische Risiko aufgrund des hohen Fixkostenanteils weiter steigern [SCHUH ET AL. 1998, S. 13FF.]. Die Unternehmen sehen als eine der wichtigsten Herausforderungen die ganzheitliche Ausrichtung an den konkreten Kundenwünschen [vgl. LINDEMANN 1999].

Der Erfolg von Unternehmen ist – neben Kundenorientierung und Innovationsfähigkeit – von der Fähigkeit abhängig, auf die Anforderungen aus dem turbulenten Unternehmensumfeld adäquat zu reagieren und die entstehende Komplexität zu beherrschen [vgl. MILBERG 1997, S.26; WESTKÄMPER 1998, S.23; REINHART ET AL. 1999; WILDEMANN 1999; LINDEMANN 1999; SPATH 2001; SPATH 2002].

1.3 Bestehende Defizite bei der Nutzung von Anforderungen im mechatronischen Entwicklungsprozess von Produktionsmaschinen

Der mechatronische Entwicklungsprozess sieht eine Verknüpfung der drei wesentlich beteiligten Fachdisziplinen, der Mechanik, der Elektrotechnik sowie der Software-Entwicklung, vor. Bei dieser Verknüpfung wird allerdings eine rein fachlich-inhaltliche Kooperation fokussiert. Der Ansatz des Simultaneous Engineering, der über die drei Fachbereiche verteilt Anwendung findet, beginnt erst nach der Festlegung der Anforderungen.

Bisherige Ansätze zur Integration von Anforderungen in der mechatronischen Entwicklung z. B. mittels PDM-Systemen beschäftigen sich lediglich mit der Aufbereitung von bereits in einzelnen Dokumenten festgehaltenen Anforderungen. Für die Aufnahme von Anforderungen bestehen verschiedene Ansätze. Diese variieren in der Zahl der Teilnehmer, die bei einer Anforderungsklä rung persönlich befragt werden, in der Art der Unterlagen, die für eine Anforderungsdefinition herangezogen werden, oder auch in der Art des Kontaktes zu den künftigen Kunden. Eine direkte Integration dieser Methoden in die weitere Entwicklung besteht bislang nicht.

Produktionsanlagen als Investitionsgüter und komplexe mechatronische Produkte werden in der überwiegenden Zahl der Fälle auf einen direkten Kundenauftrag hin im Detail konstruiert. Die Entwicklung bzw. Konstruktion lässt sich als Varianten- bzw. Änderungskonstruktion deuten, da die Entwickler und Hersteller von

Produktionsanlagen meist auf eine langjährige Erfahrung in der Entwicklung solcher Anlagen zurückgreifen können. Auch die in vorangegangenen Projekten gesammelten Informationen können für jedes neue Projekt genutzt werden – selbstverständlich müssen diese Informationen in geeigneter Form vorliegen und übersichtlich strukturiert sein, damit deren Nutzung zum Erfolg des neuen Projektes beiträgt. Aber auch hierbei bestehen derzeit Defizite in der ganzheitlichen Einbindung der vorhandenen Anforderungsinformationen in die Entwicklung.

Moderne Projekte werden stets mit rechnertechnischer Unterstützung durchgeführt. Deshalb ist die software-technische Abbildung der notwendigen Funktionen ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung einer ganzheitlichen Vorgehensweise zur Integration der Anforderungen in den mechatronischen Entwicklungsprozess.

1.4 Fokus der Arbeit

Heute kann annähernd jedes technische Produkt als mechatronisches System bezeichnet werden, da Elektronik und Software stets zur Erweiterung der Funktionalitäten eines ursprünglich mechanischen Grundsystems eingesetzt werden. Um diese Arbeit zu fokussieren, wird deshalb zunächst der Betrachtungsraum auf mechatronische Produktionssysteme eingeschränkt. Die Definition des Begriffes Produktionssystem, wie er für diese Arbeit relevant ist, wird im folgenden Abschnitt vorgenommen.

Der mechatronische Entwicklungsprozess beinhaltet verschiedene Phasen, wie in Kapitel 3 dargestellt. Diese erstrecken sich von der Aufnahme und Dokumentation von Anforderungen über die mechanische, elektro- und informationstechnische Auslegung und Konstruktion bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme. Am Ende des Entwicklungsprozesses stehen stets die Fertigung, Montage und reale Inbetriebnahme, die aber nur in einem erweiterten Verständnis zur Entwicklung zählen. Ebenso wird im klassischen Maschinenbau auch die Anforderungsbeschreibung noch nicht der eigentlichen Entwicklung zugerechnet, sondern als Voraussetzung für den Start eines Entwicklungsprojektes betrachtet. Dennoch hat die Anforderungsliste in dem mechanischen Entwicklungsprozess ihren festen Platz (vgl. [VDI 2221, EHRENSPIEL 1995]).

Kernbereich dieser Arbeit wird eben diese sehr frühe Phase der Entwicklung sein bzw. die sinnvolle Integration des Anforderungsmanagements in den mechatronischen Entwicklungsprozess. Das Thema Requirements Engineering ist im Gebiet

der Software-Entwicklung sehr breit gefächert und wird in vielen aktuellen Veröffentlichungen aus der Software-Entwicklung als die bedeutendste Disziplin zur Sicherstellung eines Projekterfolges identifiziert [vgl. HOOD 2005]. Da in mechatronischen Systemen der Software-Anteil stetig steigt, ist davon auszugehen, dass der Ansatz des Requirements Engineering auch für mechatronische Produkte weiter an Bedeutung gewinnen wird.

1.5 Anforderungsmanagement

1.5.1 Der Begriff „Anforderungen“ in der technischen Entwicklung

Laut [DUDEN 1989] wird das Verb „fordern“ im Deutschen seit dem 13. Jahrhundert als typisches Wort der Rechtssprache für das Beanspruchen von Leistungen und Gebühren verwandt. Die Anforderung leitet sich aus diesem Verb ab. In einschlägigen Wörterbüchern wird das Wort „Anforderung“ als zu erbringende Leistung erklärt.

In der (Software-)Technik ist eine Anforderung (häufig engl. requirement) eine Aussage über eine zu erfüllende Eigenschaft oder zu erbringende Leistung eines Produktes, eines Systems oder Prozesses oder der am Prozess beteiligten Personen [RUPP 2002]. Anforderungen werden üblicherweise in einem Lastenheft zusammengefasst.

Nach [GLINZ 2003] wird der Anforderungsbegriff wie folgt definiert:

1. Eine Bedingung oder Fähigkeit, die eine Sache oder eine Person erfüllen oder besitzen muss, um (von Dritten) an sie gestellte Wünsche und Erwartungen zu befriedigen.
2. Eine Bedingung oder Fähigkeit, dem eine Software entsprechen oder die sie besitzen muss, um einen Vertrag, eine Norm oder ein anderes, formell bestimmtes Dokument zu erfüllen.

In diesem Sinne sind die Anforderungen als detaillierte Spezifikationen von Wünschen zu verstehen. Die Anforderungen können dabei in funktionale, nicht-funktionale und implizite Anforderungen unterteilt werden. Eine Anforderung stellt zunächst allgemein ein fachliches oder technisches Leistungsmerkmal dar, welches die zu entwickelnde Anwendung aufweisen soll.

Ähnlich zu dieser Definition ist eine Anforderung auch nach [IEEE 1990]:

- Eine Bedingung oder Fähigkeit, die von einer Person zur Lösung eines Problems oder zur Erreichung eines Ziels benötigt wird.
- Eine Bedingung oder Fähigkeit, die eine Software erfüllen oder besitzen muss, um einen Vertrag, eine Norm oder ein anderes, formell bestimmtes Dokument zu erfüllen.
- Eine dokumentierte Repräsentation einer Bedingung oder Fähigkeit wie in einem der ersten beiden Punkte genannt.

1.5.2 Anforderungsmanagement und Requirements Engineering

Bei der Entwicklung jedes technischen Produktes wird zunächst definiert, was das System am Ende können soll. Der Ansatz des Anforderungsmanagements verbindet dabei durchgängig über die Produktentwicklung hinweg die Aufnahme der Kundenanforderungen mit den definierten Abnahmetests.

Die Begriffe Anforderungsmanagement und Requirements Engineering werden in der Literatur häufig gemeinsam verwendet. Das Anforderungsmanagement wird unter anderem in [HOOD 2005, RUPP 2001] ausführlich beschrieben.

Das Ziel des Anforderungsmanagements ist es, in Projekten die Anforderungen an das Produkt und dessen Komponenten zu managen und Inkonsistenzen sowohl zwischen den Anforderungen untereinander als auch zwischen den Produktanforderungen, den Projektplänen und den Arbeitsprodukten zu identifizieren und aufzulösen.

Anforderungsmanagement gehört zu den elementaren Prozessen im CMMI-Modell [KNEUPER 2003] ebenso wie im ISO-15504-Modell [ISO 1998] sowie in dem ebenfalls für die Software-Entwicklung relevanten Standard ISO 12207 [ISO 1995]. AM ist auch wesentlicher Bestandteil von Qualitätsmanagement.

[POHL 2005] führt aus, dass Requirements Engineering als Prozess betrachtet wird, dessen Ziel es ist, eine Brücke zwischen Anwendern, Nutzern, Geldgebern und Entwicklern von Softwaresystemen aufzubauen und aufrechtzuerhalten. Requirements Engineering ist somit ein kontinuierlicher, kreativer Prozess, der immer wieder aus vagen und widersprüchlichen Ideen hinreichend vollständige und konsistente Systemspezifikationen unter Berücksichtigung vorhandener technischer und sozialer Kontexte gewinnen muss. Für ein erfolgreiches Anforderungs-

rungsmanagement sind die Nachvollziehbarkeit der relevanten Zusammenhänge sowie die kontinuierliche Prozessverbesserung unabdingbare Voraussetzungen [POHL 2005].

Die Software Requirement Specification ist ein von der IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) erstmals unter ANSI/IEEE Std 830-1984 veröffentlichter Standard zur Spezifikation von Software [IEEE 1984]. Die IEEE hat die Spezifikation mehrmals überarbeitet und die momentan neueste Version ist Std 830-1998.

Die IEEE hat mit dieser Definition festgelegt, wie das Dokument aufgebaut werden soll. Die Kapitel, die in diesem Dokument enthalten sein sollen, stehen somit fest. Dabei ist das Dokument grundsätzlich in zwei Bereiche aufgeteilt:

- C-Requirement (Customer-Requirement)
- D-Requirement (Development-Requirement)

Unter C-Requirement sind die Anforderungen aus Sicht des Kunden und/oder des End-Anwenders zu erfassen. Unter D-Requirement versteht man die Entwicklungs-Anforderungen. Dies ist die Sicht aus den Augen des Entwicklers, der im Gegensatz zum Kunden technische Aspekte in den Vordergrund stellt.

Mit "Anforderungen" ist sowohl die qualitative als auch die quantitative Definition eines benötigten Programmes aus der Sicht des Auftraggebers gemeint. Im Idealfall umfasst eine solche Spezifikation die ausführliche Beschreibung des Zweckes, des geplanten Einsatzes in der Praxis sowie des geforderten Funktionsumfanges einer Software.

Eine SRS (Software Requirement Specification) enthält nach IEEE Standard mindestens drei Hauptkapitel. Die vorgeschlagene Gliederung sollte zwar in den Kernpunkten eingehalten werden. In der Praxis wird diese jedoch häufig im Detail modifiziert. Nach [DIN 69 905, VDI/VDE 3694] enthält das Lastenheft die vom Auftraggeber festgelegten Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrages. Der darin enthaltene Vorschlag für das Inhaltsverzeichnis eines IT-Lastenheftes ist in Abbildung 1 dargestellt.

- 1 **Projekt- Einführung**
 - 1.1 Veranlassung
 - 1.2 Zielsetzung
 - 1.3 Projektumfeld
 - 1.4 Ressourcen
- 2 **Ausgangssituation, Ist-Zustand, Projektumfeld**
 - 2.1 Technisches Umfeld
 - 2.2 Anlage, Hardware, Schnittstellen
 - 2.3 Abläufe, Prozesse, Datenmengen, Reaktionszeiten
 - 2.4 Organisatorisches Umfeld
 - 2.5 Dokumentations- und Informationswege,
- 3 **Berichtswesen**
- 4 **Ablauforganisation**
- 5 **Aufgabenstellung**
 - 5.1 Kurzbeschreibung, Gliederung
 - 5.2 Ablaufbeschreibung
 - 5.2.1 *Normalbetrieb*
 - 5.2.2 *Einrichtungsbetrieb*
 - 5.3 Daten-, Datenmengen- und Datensicherheitsbeschreibungen
 - 5.3.1 *Kommunikation*
 - 5.3.2 *Informations-Daten*
 - 5.3.3 *Bedienungsdaten*
 - 5.3.4 *Dienstdaten*
 - 5.3.5 *Protokollierungsdaten*
 - 5.4 Aufgabenbeschreibungen
 - 5.4.1 *Funktionalität*
 - 5.4.2 *Änderbarkeit*
 - 5.4.3 *Zuverlässigkeit*
 - 5.4.4 *Anlagenmanagement*
- 6 **Schnittstellen**
 - 6.1 Schnittstellenübersicht
 - 6.2 Prozesse-IT-Einrichtungen
 - 6.3 Mensch-IT-Einrichtung
 - 6.4 IT-IT-Einrichtung
- 7 **Anforderungen an die Systemtechnik**
 - 7.1 Datenverarbeitung
 - 7.2 Datenhaltung
 - 7.3 Software
 - 7.4 Hardware
 - 7.5 Hardwareumgebung
 - 7.6 Gesamtsystem
- 8 **Anforderungen an das organisatorische Umfeld**
 - 8.1 Betriebsablauf
 - 8.2 Personal
 - 8.3 Wartung
- 9 **Qualitätssicherung**
 - 9.1 Qualitätsstandards, Qualitätsnachweise
 - 9.2 Softwarequalität
 - 9.3 Hardwarequalität
- 10 **Projektabschluss**

Abbildung 1: Struktur eines IT-Lastenheftes nach DIN 69905

Anforderungsmanagement wird von [LEFFINGWELL & WIDRIG 1999, S.16] folgendermaßen beschrieben:

»Requirements management is a systematic approach to eliciting, organizing, and documenting the requirements of the system, and a process that establishes and maintains agreement between the customer and the project team on the changing requirements of the system.«

Laut [SCHIENMANN 2002] zielt Anforderungsmanagement darauf ab, aus zunächst vagen und teilweise widersprüchlichen Anforderungen und Zielvorstellungen schrittweise eine vollständige und eindeutige Anforderungsdefinition zu entwickeln, welche von allen Beteiligten mitgetragen wird. Mehr als alle anderen Entwicklungsschritte ist dieser Prozess geprägt von der intensiven Kommunikation und Zusammenarbeit einer Vielzahl von Personen in ihren unterschiedlichen Rollen. Kunden, Anwender, Betreiber, Fachexperten, Produktmanager, Anforderungsanalytiker und Entwickler sind gefordert, Anforderungen gemeinsam zu erarbeiten, abzustimmen und einen gefundenen Konsens auch bei sich ändernden Anforderungen aufrechtzuerhalten.

In der Literatur variiert die Abgrenzung zwischen Begriffen wie *Anforderungsmanagement* und *Anforderungstechnik* oder *Requirements Engineering* und *Requirements Management* von Autor zu Autor. Teilweise wird der Begriff *Requirements Management* als Oberbegriff sowohl für alle Aufgaben zur Ermittlung und Definition von Anforderungen, als auch für die Steuerung, Kontrolle und Verwaltung dieser operativen Aufgaben benutzt. Andere Autoren verwenden stattdessen *Requirements Engineering* als Oberbegriff und fassen darunter operative Tätigkeiten (*Requirements Development*) und Managementaufgaben (*Requirements Management*) zusammen (vgl. etwa [WIEGERS 1999]).

Obwohl einiges für die zweite Begriffsbildung spricht, wird in diesem Buch Anforderungsmanagement gemäß der oben zitierten Definition als umfassender Begriff für alle Aufgaben im Umgang mit Anforderungen verwendet. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe: einen inhaltlichen und einen vertrieblichen.

Probleme im Umgang mit Anforderungen beruhen zumeist auf dem mangelnden Management von Anforderungen. Hier vor allem ist eine Sensibilisierung erforderlich. Isoliert betrachtet werden dagegen die rein operativen Aufgaben, wie etwa die Beschreibung von Anwendungsfällen, oft gut ausgeführt.

Die deutsche Bezeichnung *Anforderungstechnik* für Requirements Engineering ist wenig verbreitet und zumindest gewöhnungsbedürftig. Mit dem Begriff Anforderungsmanagement dürfte es sehr viel leichter fallen, das Thema zu fördern und in einer Organisation die notwendige Managementunterstützung zu erhalten.

Dieser zweite Punkt ist wichtig. Die Einführung und Verbesserung des Anforderungsmanagements in einer Organisation muss vom Management gefordert und unterstützt werden, um zu nachhaltigen Verbesserungen zu führen. Welcher der Begriffe *Requirements Engineering*, *Requirements Management* oder *Anforderungsmanagement* dazu allerdings am besten geeignet ist, bleibt dem Leser überlassen [vgl. SCHIENMANN 2002, S. 32 – 33]:

1.6 Mechatronische Produktionssysteme

1.6.1 Allgemeines

Technische Systeme des Maschinenbaus lassen sich in verschiedene Branchen unterteilen, wie beispielsweise:

- Automotive,
- Robotik,
- Medizintechnik,
- Produktionstechnik,
- Luft- und Raumfahrt,
- Verfahrenstechnik oder
- Energietechnik.

Alle diese Branchen haben typische Vertreter in der Industrie und bergen spezielle Problemstellungen für die Entwicklung der entsprechenden Systeme. Eine besondere Herausforderung der letzten Jahr(zehnt)e ist die zunehmende Integration von Software- und Elektrotechnik in vormals rein mechanischen Systemen. Mit dieser wichtigen Aufgabe beschäftigt sich die Querschnittsdisziplin Mechatronik (vgl. [REINHART ET AL. 2001A]).

Die folgenden Abschnitte sollen zum einen die für diese Arbeit relevanten Begriffe der Mechatronik und von Produktionssystemen erläutern und zum anderen die aktuelle Situation in der Industrie und der Anwendung darlegen.

1.6.2 Bedeutung des Begriffs Mechatronik

Mechatronik bedeutet die größtmögliche Integration der drei Disziplinen Mechanik, Elektrik und Software auf einer Komponente bzw. einem Funktionsträger [REINHART ET AL. 2001]. Ein mechatronisches System besteht nach [ISERMANN 2003], [GAUSEMEIER 2002] und [VDI/VDE 2422] stets aus einem meist mechanischen Grundsystem, Aktoren und Sensoren sowie Prozessoren zur Verarbeitung von Regelungsinformationen (vgl. Abbildung 2).

Die Mechatronik bedeutet aber nicht nur die Integration von immer mehr Software in technisch-mechanische Komponenten, sondern bietet durch den hochintegrierten Ansatz zur Fertigung und Funktionalität von Bauteilen ein ausgesprochen hohes Innovationspotenzial. So wurden Produkte wie Laserdrucker, Hand-helds oder DVD-Recorder erst durch den von Anfang an integrierten Ansatz der mechatronischen Entwicklung möglich.

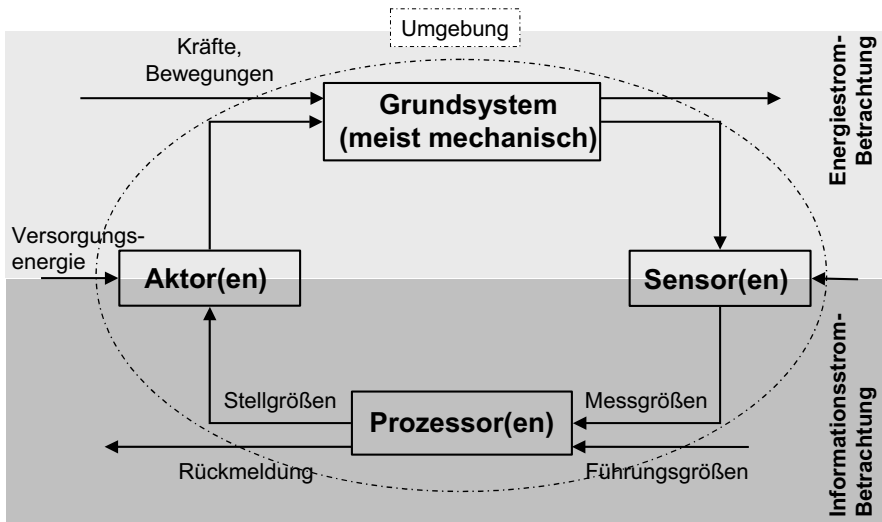


Abbildung 2: Allgemeine Darstellung eines mechatronischen Systems

Aber auch Produkte, die ursprünglich rein auf mechanischen und elektronischen Bauteilen beruhten, erfahren durch den integrierenden Ansatz der Mechatronik eine deutliche Leistungssteigerung.

1.6.3 Charakterisierung von Produktionssystemen

Unter dem Begriff *Produktionssysteme* werden nach [REFA 1987] Arbeitssysteme zur Herstellung von Produkten verstanden. Diese Arbeitssysteme können sowohl aus automatisierten als auch aus manuellen Arbeitsplätzen bestehen, die über Material- und Informationsflüsse miteinander verbunden sind. Die zur Durchführung des Produktions- und Arbeitsprozesses notwendigen Teilfunktionen lassen sich nach [SPUR 1982, MERTENS 1984] den drei sich ergänzenden Teilsystemen eines Produktionssystems zuordnen (vgl. Abbildung 3):

- Das Bearbeitungssystem dient zur unmittelbaren Produktion gemäß einer vorgegebenen Produktionsarbeitsaufgabe. Es umfasst alle Betriebsmittel, die direkt am Produktionsfortschritt beteiligt sind, wie z. B. Maschinen, Werkzeuge, Mess- und Prüfmittel etc. [JÄGER 91, MERTENS 84]
- Innerhalb des Materialfluss-Systems werden nach der VDI-Richtlinie 2860 Werkstücke und Betriebsmittel gehandhabt, transportiert und gelagert.
- Das Informationssystem übernimmt dabei alle Funktionen der Steuerung und Überwachung des Produktionsablaufs [HERTER 1991]. Dazu gehören die Aufgaben speichern, verwalten, bearbeiten, senden und empfangen von Informationen. Zur Durchführung ihrer Aufgaben erhält es aus den vorgelagerten Bereichen der Produktion die notwendigen Informationen, um sie aufgereiht an das Materialfluss- und Bearbeitungssystem weiterzugeben [JÄGER 1991].

Unter *Produktionssystem* wird in diesem Zusammenhang jedes technische System verstanden, das zur Bearbeitung und Fertigstellung von Produkten eingesetzt wird. Im Speziellen werden hier auch Werkzeugmaschinen betrachtet.

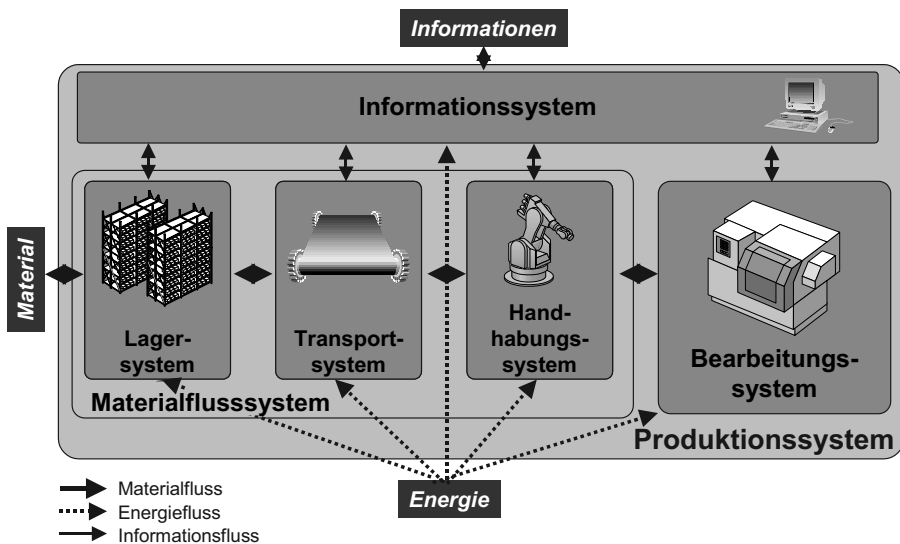


Abbildung 3: Allgemeine Darstellung eines Produktionssystems

1.6.4 Produktionssysteme als mechatronische Systeme

Produktionssysteme und als einfaches, konkretes Beispiel die Werkzeugmaschinen, stoßen aufgrund der heutigen Anforderungen an rein durch mechanische Optimierung nicht mehr verschiebbare Leistungsgrenzen. Erst die Integration von Steuerungs- und Regelungsalgorithmen, z. B. zur Kompensation von dynamisch erregten Schwingungen des Systems [REINHART ET AL. 2001B], erlauben eine Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit und damit der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems.

Auch die immer höheren Anforderungen an die Flexibilität von Produktionssystemen lassen sich nur durch die Integration von Software in das ursprünglich mechanische Grundsystem realisieren. Während vor einigen Jahren auf einer Maschine lediglich eine bestimmte Fertigungsreihenfolge installiert werden konnte und ein Wechsel zu einer weiteren Bearbeitungsfolge mit äußerst langen Umrüstzeiten verbunden war, kann in heutigen Bearbeitungssystemen der Wechsel zwischen zwei verschiedenen Bauteilen binnen weniger Minuten realisiert werden.

Die Kostenentwicklung der vergangenen Jahre zeigt, dass in mechatronischen Produktionsanlagen ein stetig wachsender Anteil der Fertigungs- und Entwicklungskosten für die Software aufgewendet werden muss (vgl. Abbildung 4).

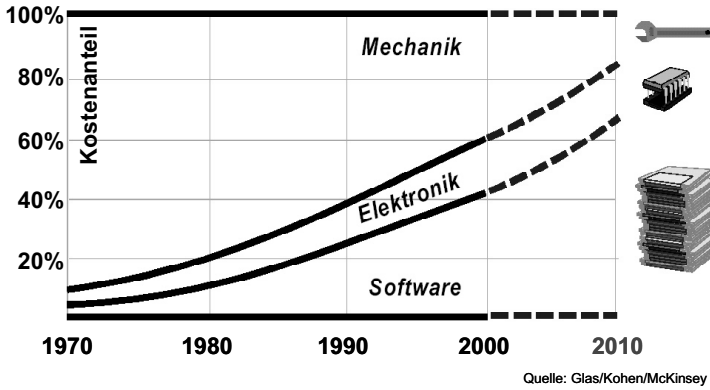


Abbildung 4: Entwicklung der Kostenanteile in Produktionssystemen

Dies bedeutet, dass Produktionsanlagen als mechatronische Systeme zu betrachten sind und deshalb auch die Methoden zur Entwicklung solcher Systeme an die Entwicklungsprozesse der einzelnen Teildisziplinen angepasst werden müssen.

1.7 Der Entwicklungsprozess

1.7.1 Definition des mechatronischen Entwicklungsprozesses

Für die Entwicklung technischer Systeme werden Rollen, Abläufe und Vorgehensweisen festgelegt. Diese Attribute sind abhängig von der Art des zu entwickelnden Systems, aber auch von Unternehmensstrukturen, eingesetzten Rechnerwerkzeugen oder vorhandenen Erfahrungen.

Der mechatronische Entwicklungsprozess umfasst sowohl die Ebene des Simultaneous Engineering, das sich zur Aufgabe gesetzt hat, über einzelne Projektphasen wie Konzeption, Entwicklung, Berechnung, Montage, Inbetriebnahme und Wartung hinweg den reibungslosen Datenfluss sicherzustellen, als auch die Ebene des Concurrent Engineering, das die Integration der drei Fachbereiche Mechanik, Elektrik und Software während der Entwicklung eines Systems zum Ziel hat (vgl. Abbildung 5). Diese beiden Begriffe wurden in den vergangenen Jahren allerdings häufig synonym verwendet (vgl. [KLEIN ET AL. 2003]).

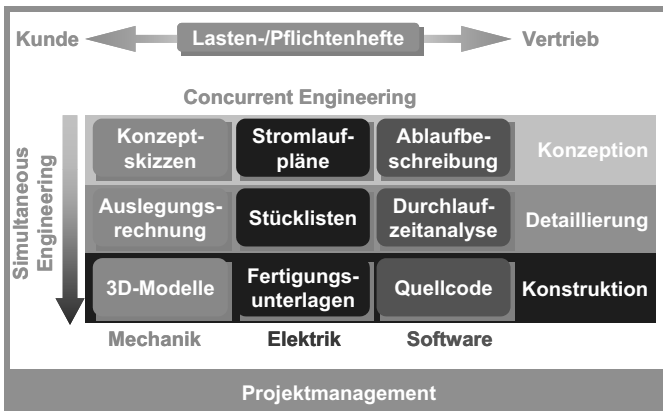


Abbildung 5: Dokumente und Aufgaben im mechatronischen Entwicklungsprozess (Quelle: [ZÄH ET AL. 2005])

In den einzelnen Disziplinen werden verschiedene Dokumente bearbeitet und erstellt. Diese Dokumente müssen für einen reibungslosen Ablauf inhaltlich miteinander verknüpft werden.

Die Phasen des Entwicklungsprozesses „Konzept – Entwurf – Detaillierung – Konstruktion“ führen in der Mechanik zunächst zu Konzeptskizzen, die in der

Entwicklung durch Auslegungsrechnungen detailliert werden und dann in einem 3D-CAD-Programm in Konstruktions- bzw. Fertigungszeichnungen umgesetzt werden. In der Elektrik werden in der Konzeptphase Stromlaufpläne erstellt. Die Entwicklung in der Elektrik führt zu detaillierten Stücklisten über die notwendigen Zukaufteile für einzelne Funktionen, die in der Konstruktionsphase in die Fertigungsunterlagen integriert werden. Die in der Konzeptphase erstellte Ablaufbeschreibung in der Software-Entwicklung kann von der Elektrik sowie der Mechanik bereits in dieser Phase für eine Überprüfung der konzeptionierten Funktionalitäten führen. In der Software-Entwicklung wird darauf aufbauend eine Durchlaufzeitenanalyse durchgeführt und schließlich ein Quellcode erstellt, der die beschriebenen Abläufe auf den einzelnen Bauteilen umsetzt.

1.7.2 Abgrenzung des Entwicklungsprozesses

Die Anforderungen an das zu entwickelnde System werden vom Kunden in einem Lastenheft beschrieben. Der Vertrieb, manchmal schon in Zusammenarbeit mit dem künftigen Projektleiter, erstellt aus dem Lastenheft ein Pflichtenheft. Für die Erstellung eines Angebotes, das Grundlage für das Zustandekommen des Vertrags ist, ist bereits in dieser frühen Phase eine Kostenschätzung notwendig. Erst mit der Vertragsunterzeichnung beginnt im engeren Sinne der mechatronische Entwicklungsprozess.

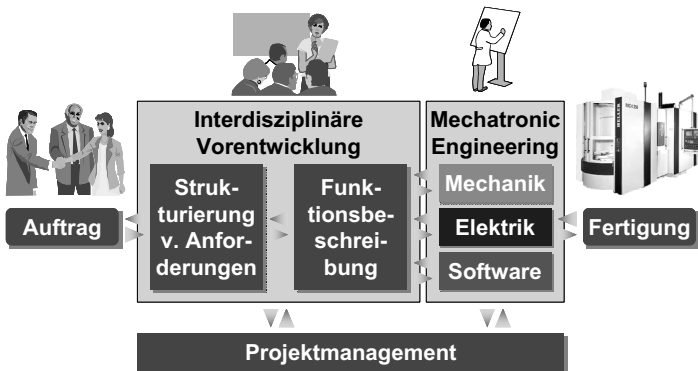


Abbildung 6: Der mechatronische Entwicklungsprozess im Umfeld der sonstigen unternehmerischen Abläufe (Quelle: [ZÄH ET AL. 2005])

Der mechatronische Entwicklungsprozess beginnt also mit der Erteilung eines Entwicklungsauftrages für ein mechatronisches Produkt durch einen internen oder externen Auftraggeber. Während seines Verlaufes werden sämtliche Unterlagen erstellt, die für die Fertigung eines Produktes benötigt werden. Viele dieser Dokumente können auch in späteren Phasen des Lebenszyklus, wie etwa Betrieb, Instandhaltung oder Entsorgung, eingesetzt werden.

Vor dem Engineering von Mechanik, Elektrik und Software (vgl. Abbildung 6) findet eine fachbereichsübergreifende Vorentwicklung statt. Während dieser werden sämtliche Kundenvorgaben aufbereitet, um einen fortwährenden Abgleich des Entwicklungsstandes mit den Wünschen des Auftraggebers zu ermöglichen. Danach wird die Funktionalität des zu entwickelnden Systems beschrieben. Dabei sind die Grundzüge des zu entwickelnden Produkts soweit festzulegen, dass die am Mechatronic Engineering beteiligten Disziplinen möglichst zeitgleich mit der Konzeptionsphase beginnen können.

Entsprechend einem Top-Down-Entwurf wird zunächst ein abstrakter Auftrag während des Entwicklungsprozesses durch zusätzliche Informationen immer weiter konkretisiert. Wird zu einem bestimmten Zeitpunkt festgestellt, dass ein gewählter Ansatz aus einem abstrakteren Stadium nicht praktikabel ist, kann ein Rückschritt erfolgen, um an dieser Stelle einen anderen Lösungsweg einzuschlagen. In diesem Fall ist sicherzustellen, dass alle nachfolgenden betroffenen Entwickler sowie das Projektmanagement über die vollzogenen Änderungen so früh wie möglich informiert werden. Jedoch gilt es zu vermeiden, Informationen an Personen weiterzuleiten, die von einer Änderung nicht betroffen sind, um eine hohe Effizienz des gesamten Prozesses zu gewährleisten.

Der Entwicklungsprozess wird vom Projektmanagement unterstützt. Dessen Aufgaben leiten sich aus dem magischen Dreieck aus Zeit, Kosten und Qualität ab. Sie bestehen insbesondere aus der Überwachung auf Einhaltung von Kundenvorgaben, Entwicklungsterminen und Produktkosten. Sobald eine Zielverletzung erkennbar wird, werden geeignete Gegenmaßnahmen in die Wege geleitet.

1.7.3 Potenzial der mechatronischen Entwicklung

Ausgangsbasis des mechatronischen Entwicklungsprozesses bilden die kaufmännischen Vorgaben und die Anforderungen des Projektmanagements. Diese werden zusammen mit den technischen Anforderungen aus der Auftragsakquisition in ein mechatronisches Gesamtkonzept überführt. Die Fachbereiche erarbeiten

dabei gemeinsam eine Beschreibung der Funktionen, die in diesem Gesamtkonzept zu erfüllen sind. Die Beschreibung der Funktionen stellt eine Schnittmenge der fachbereichsspezifischen Informationen dar, auf deren Basis die Ausdetaillierung erfolgt, nach deren Abschluss die Fertigung gestartet wird.

Die Ausdetaillierung erfolgt in spezifischen Engineering Tools wie M-CAD, E-CAD und Software-Entwicklungsumgebungen, in denen die aus dem mechatronischen Gesamtkonzept resultierenden Funktionen umgesetzt werden. Dazu ist das Gesamtkonzept in einem gemeinsamen Werkzeug abgebildet, das, ausgehend von den Anforderungen, die Ableitung von Skizzen zu mechanischem Aufbau, Sensoren, Aktoren, Stellgliedern sowie Ablaufbeschreibungen und deren Randbedingungen unterstützt.

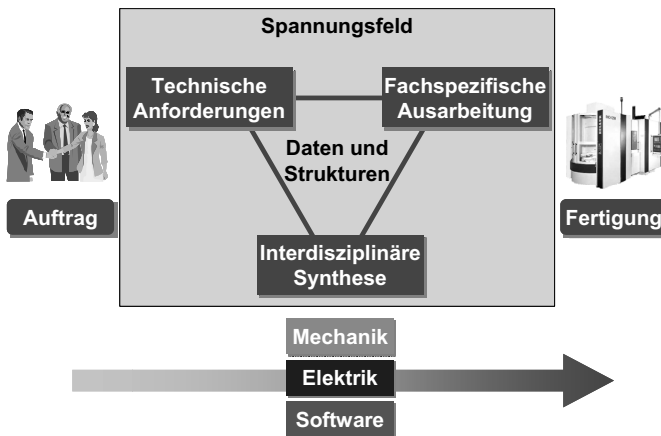


Abbildung 7: Das Spannungsfeld im mechatronischen Entwicklungsprozess
(Quelle: [ZÄH ET AL. 2005])

In dem in Abbildung 7 dargestellten Spannungsfeld zwischen den technischen Anforderungen des Kunden an das Produktionssystem, der fachspezifischen Detaillierung und einer anschließend notwendigen fachbereichsübergreifenden Synthese der Entwicklungsdaten bildet eine konsistente Datenhaltung sowie eine vorgegebene Struktur dieser Daten eine notwendige Stütze für das Abfließen des mechatronischen Entwicklungsprozesses.

Die Daten müssen unter funktionalen Gesichtspunkten strukturiert sein. Dies ermöglicht eine fachbereichsübergreifende Ansicht und somit eine gemeinsame

Diskussionsgrundlage. Hier werden im eigenen Fachbereich erzeugte, für andere Fachbereiche als Input erforderliche Informationen abgelegt und weitergeleitet.

1.8 Zielsetzung

Ziel eines ganzheitlichen, integrierten Ansatzes zur Anforderungsnutzung bei der Entwicklung von Produktionsanlagen ist die Optimierung des Spannungsdreiecks der Projektziele Zeit, Kosten und Qualität.

Daraus leitet sich als Ziel dieser Arbeit die Verbesserung der mechatronischen Entwicklung von Produktionssystemen, durch ein integriertes Vorgehen zur Erfassung und Strukturierung von Anforderungen im Entwicklungsprozess ab.

Dabei ist die konsequente Umsetzung aller Anforderungen während der Entwicklung eine wichtige Aufgabe, die es durch definierte Vorgehensweisen und kontinuierliche Datenhaltung zu erfüllen gilt. Ebenso wie in der Software-Entwicklung muss der Rückbezug auf Anforderungen bzw. die durchgängige Nutzung aller bekannten Informationen fester Bestandteil des mechatronischen Entwicklungsprozesses werden.

Das Vorgehen soll deshalb die Aufnahme und Strukturierung der relevanten Anforderungen unterstützen und eine intuitive Nutzung der vorhandenen Informationen ermöglichen. Durch die intensive Fokussierung auf die Realisierung der Kundenwünsche soll die Entwicklungszeit für ein konkretes Produkt reduziert und zugleich die Qualität verbessert werden.

Da die Unterstützung des Entwicklungsprozesses immer auch an Funktionalitäten, die in Rechnerwerkzeugen abgebildet sind, gekoppelt ist, ist eine weitere wichtige Aufgabe dieser Arbeit, eine Softwarelösung zu spezifizieren, durch die das dargestellte Vorgehen abgebildet werden kann.

1.9 Vorgehensweise

Ausgehend von der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Zielsetzung dieser Arbeit wurden in Kapitel 1 zunächst die wesentlichen Begriffe definiert. Dabei wurde die Bedeutung des Anforderungsmanagements und der kontinuierlichen Datennutzung in den betrachteten Unternehmen diskutiert.

In Kapitel 2 wird auf bestehende Ansätze und Lösungen in der Forschung und Technik eingegangen. Dazu werden die für diese Arbeit bedeutendsten Ansätze

zur Anforderungserfassung, -handhabung und -evaluierung, zur mechatronischen Entwicklung, zur entwicklungsbegleitenden Kostenschätzung sowie zur kontinuierlichen Datennutzung dargestellt und Handlungsfelder aufgezeigt.

Aus den beschriebenen Handlungsfeldern heraus wird in Kapitel 3 ein Vorgehen zur kontinuierlichen Nutzung von Anforderungen im gesamten Entwicklungsprojekt vorgestellt. Die einzelnen Schritte der planend strukturierenden Vorbereitung, der Anforderungsdarstellung und der durchgängigen Verknüpfung und Nutzung des Vorgehens werden erläutert. Dabei wird die strukturierte Aufnahme sowie die nachhaltige Darstellung von Anforderungen fokussiert und eine werkzeugunabhängige Vorgehensweise zur rechnerischen Umsetzung des Vorgehens spezifiziert.

Die exemplarische Umsetzung der notwendigen Funktionalitäten für die entwickelte Methode zur ganzheitlichen Anforderungshandhabung in einem Software-Werkzeug wird in Kapitel 4 dargestellt.

In Kapitel 5 wird anhand eines Beispiels aus der industriellen Praxis die Vielseitigkeit und Anwendungsnähe der vorgestellten Vorgehensweise erläutert. Der Nutzen insbesondere für den Anlagenbetreiber wird anhand des Anwendungsfalls deutlich.

Kapitel 6 stellt Aufwand und Nutzen der vorgestellten Methodik gegenüber und beleuchtet kritisch die Vor- und Nachteile der in dieser Arbeit aufgezeigten Vorgehensweise.

Eine Zusammenfassung und der Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterführung der Forschungsgebiete bilden in Kapitel 7 den Abschluss der Arbeit.

2 Stand von Forschung und Technik

2.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die bereits vorhandenen Ansätze und Erkenntnisse aus den verschiedenen für diese Arbeit relevanten Bereichen dargestellt. Dabei werden insbesondere die Gebiete des Anforderungsmanagements, der mechanischen sowie mechatronischen Entwicklung, der Kostenabschätzung in frühen Projektphasen, der Produktionssysteme bzw. Werkzeugmaschinen, der Automatisierung, der Kundenanforderungen, des Vertragswesens sowie der datentechnischen Durchgängigkeit betrachtet.

2.2 Methoden des Anforderungsmanagements

Während im klassischen Maschinen- und Anlagenbau Lasten- und Pflichtenhefte zur Beschreibung der notwendigen Anforderungen genutzt werden [PAHL & BEITZ 1993], wurde im Bereich der Software-Entwicklung, speziell für die objektorientierten Systeme, das Anforderungsmanagement bzw. das Requirements Engineering entwickelt. Die hierbei beschriebenen und beinhalteten Methoden und Darstellungsformen wurden insbesondere für die Bedürfnisse der Entwicklung von Software angepasst.

Auch die Planung mechatronischer Systeme beginnt mit der Aufnahme des ersten Kundenwunsches. Um eine kontinuierliche Nutzung der Anforderungen schon von diesem Beginn eines Projektes an sicher zu stellen, müssen die Anforderungen an ein mechatronisches Produktionssystem so aufgenommen und festgehalten werden, dass sie konsistent in allen Produktlebensphasen zur Verfügung stehen. Eine frühzeitige Strukturierung und Hierarchisierung der bekannten Informationen und des Gesamtsystems führt dabei zu einer Verkürzung der Projektbearbeitungszeit.

Die Kundenanforderungen an ein neues mechatronisches Produkt wie z. B. eine Produktionsanlage nehmen stetig zu. Dadurch wächst neben der Produktkomplexität auch der Verwaltungsaufwand für die durchgängige Nutzung aller mit der Produktentwicklung zusammenhängenden Informationen. Das in der Software-Entwicklung entstandene Vorgehen des Anforderungsmanagements, bei dem von der Anforderungsaufnahme bis zum Abnahmetest die vorhandenen Informatio-

nen einheitlich genutzt werden, gewinnt damit auch für die mechatronische Entwicklung an Bedeutung [WEBER & WEISBROD 2003].

Wegen der sehr unterschiedlichen Spektren an Methoden und Ansätzen, die in jüngeren Veröffentlichungen wie [KOTONYA & SOMMERVILLE 2000, SOMMERVILLE & SAWYER 1997 oder WIEGERS 1999] zu finden sind, beschreibt [DEIFEL 2001] das Requirements Engineering als eine noch unreife Forschungsdisziplin. Dennoch hat das Thema der Anforderungsermittlung und -umsetzung eine umfangreiche Geschichte. Bereits 1952 beschreibt [FRYER 1952] eine Methode, um Anforderungen konsequent zu ermitteln. Er unterscheidet dabei die drei Phasen der Einarbeitung, der Datensammlung und der Datenanalyse. Die Aufteilung des Requirements Engineering-Prozesses in einzelne miteinander verknüpfte Phasen wird auch von [POHL 1996] dargestellt, der allerdings in der Software-Entwicklung die vier Phasen der Erhebung, der Verhandlung, der Beschreibung und Dokumentation sowie der Verifikation und Validierung unterscheidet.

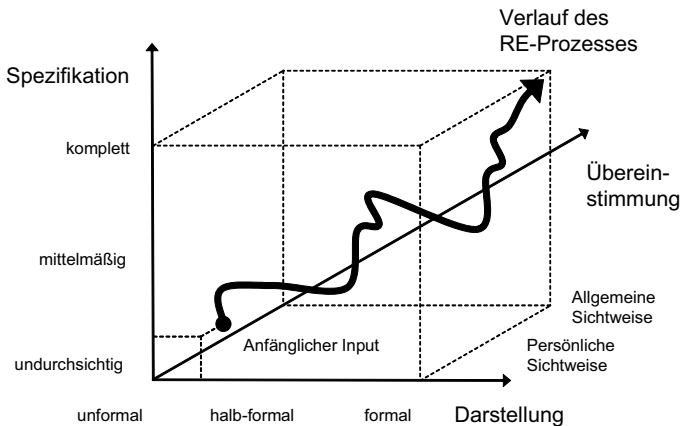


Abbildung 8: Modell des Requirements-Engineering-Prozesses nach [POHL 1996]

Diese Phasen sind eng miteinander verbunden, weshalb sie nicht scharf voneinander zu trennen sind. Für die Aufgaben der einzelnen Phasen wurden wiederum verschiedene Methoden und Vorgehensweisen entwickelt, so z. B. die objektorientierte Modellierung der Anforderungen [SHLAER & MELLOR 1988, COAD &

YOURDON 1996, RUMBAUGH 1993, BOOCH 2000, JACOBSON 1992] oder die von [FINKELSTEIN ET AL. 1992] dargestellten View Points zur Verhandlung der Anforderungen. Darüber hinaus betrachtet [POHL 1996] drei Dimensionen, innerhalb derer sich der RE-Prozess entwickelt. (vgl. Abbildung 8)

Aufbauend auf diesen Überlegungen schlagen [NGUYEN & SWATMAN 2003] die Verwendung einer Entwurfs-Erklärungs-Basis sowie eine kontinuierliche Überprüfung und Verfolgung der Komplexität des Modells, in dem die Anforderungen beschrieben werden, vor. Dadurch soll der kreative Prozess des RE für Systementwickler und Projektmanager leichter verständlich werden.

Kernidee von [SCHIENMANN 2002] ist, das Anforderungsmanagement aus den drei Sichten Kunde, Produkt und Projekt zu betrachten und damit den Prozess von der Erhebung einer Anforderung bis zur Bereitstellung einer Lösung durchgängig zu gestalten. Dabei versteht er unter der Kundenorientierung, dass Kunden Anforderungen stellen, um Lösungen für ihre Probleme zu erhalten. Diese Kundenanforderungen müssen sich weder auf konkrete Produkte noch Projekte beziehen. Unter der Produktorientierung wird in diesem Zusammenhang die Tatsache beschrieben, dass Produkte mit Anwendungen Lösungen für die Probleme der Kunden darstellen. Produkthanforderungen werden auf Grund der Kundenanforderungen spezifiziert und in Projekten umgesetzt. Die Projektorientierung schließlich zeigt sich darin, dass in Entwicklungsprojekten mit einer definierten Zielsetzung Produkte realisiert werden und damit Problemlösungen für den Kunden erstellt werden.

Eine Zusammenfassung der heute üblichen Vorgehensweisen im Bereich des Anforderungsmanagementprozesses stellt [VERSTEEGEN ET AL. 2004] zur Verfügung. Zum Anforderungsmanagement gehören demnach die Definition aller notwendigen Rollen (Anforderungsmanager, Moderator, Software-Entwickler, Projektleiter, Konfigurationsmanager, Kunde), die Formulierung von Anforderungen, die Integration in den Entwicklungsprozess, die Auswahl eines geeigneten Werkzeugs und gemeinsame Reviews.

Die bisherigen Ansätze für das Anforderungsmanagement beschränken sich hinsichtlich der angewandten Methoden auf die Bedürfnisse der Software-Entwicklung. Eine allgemein gültige Bewertung verschiedener Methoden und Abläufe wurde bisher nicht erreicht. Es existieren aber Bestrebungen, Maßstäbe für eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Ansätze festzulegen [GERVASI ET AL. 2004]. Um diese Ansätze und Methoden für die Nutzung im mechatronischen

Entwicklungsprozess anzupassen, ist eine weitestgehend automatisierte Anbindung vorhandener Rechnerwerkzeuge der Installationsplanung, des mechanischen Entwurfs und der bereits mit Software-Entwicklungswerkzeugen verknüpften Requirements Engineering Tools notwendig. Nur durch diese Verknüpfungen können die notwendigen Funktionalitäten für ein gezieltes Requirements Management auch für mechatronische Systeme umgesetzt werden.

2.2.1 Methoden in der Anforderungsspezifikation

2.2.1.1 Das Anwenderinterview

Das Anwenderinterview ist eine der wichtigsten Methoden zur Ermittlung von Anforderungen. Die Durchführung des Anwenderinterview erfolgt in drei Schritten [vgl. SCHIENMANN 2002, S. 203 – 206]:

- Interviewvorbereitung,
- eigentliche Interviewdurchführung und
- Interviewnachbereitung.

Der erste wesentliche Schritt ist die Vorbereitung. In diesem Schritt sind wichtige Punkte wie z. B. die Auswahl der beteiligten Rollen bzw. Personen zu regeln. Weiterhin sind Zeit, Ort und Inhalt des Gesprächs vorab festzulegen und allen Teilnehmern mitzuteilen.

Alle Fragen werden vor dem Interviewbeginn schriftlich festgelegt und sind auf jede Person individuell ausgelegt. Dies setzt eine gründliche Beschäftigung mit der Thematik und den einzelnen Teilnehmern voraus.

Nach einer solchen gründlichen Vorbereitung kann mit dem Interview selbst begonnen werden. Es sollte in einer entspannten Atmosphäre stattfinden und nicht länger als zwei Stunden dauern. Typischerweise nehmen ein Interviewer, ein Protokollführer und der festgelegte Personenkreis der Interviewten teil. Zu Beginn der Befragung teilt man den Interviewten die wesentlichen Ziele des Projektes mit.

Die Regeln und der Ablauf werden für alle Teilnehmer klar verständlich bereits vor der eigentlichen Interviewdurchführung vorgestellt. Es ist darauf zu achten,

dass jeder Interviewte seine ihm zugeteilte Redezeit einhält und er seine Ansichten darstellen kann, ohne dass er von anderen Teilnehmern unterbrochen wird.

Beim Einstieg zum Gespräch ist eine Vorstellungsrunde aller Teilnehmer angebracht. Dazu gehören Beruf, Kernkompetenzen und Beweggründe für die Teilnahme an dieser Sitzung. Erst im eigentlichen Interview geht man technisch und fachlich ins Detail.

Daraus werden die funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen abgeleitet. Zum Abschluss der Interviewphase wird den Teilnehmern die Chance gegeben, Fragen zu stellen und eigene Anliegen vorzutragen.

Zuletzt bedarf es der Erstellung eines geeigneten Abschlussprotokolls. Dieses ist nach objektiven Regeln anzufertigen. Treten offene Fragen auf oder widersprechen sich Anforderungen, sind diese schriftlich zu fixieren und in Folgeinterviews bzw. im Gespräch mit Dritten zu klären.

2.2.1.2 Der Anforderungsworkshop

Der Anforderungsworkshop ist die gängigste Methode, Anforderungen für komplexe Systeme aufzunehmen.

Bei einer erfolgreichen Anwendung werden drei Phasen durchlaufen: die Vorbereitung, die Durchführung und die Nachbereitung [SCHENMANN 2002, S. 206-212].

Die Auswahl der Teilnehmer stellt den wichtigsten Punkt der Vorbereitung dar. Als besonders Erfolg versprechend hat sich eine breite thematische Ausrichtung der Teilnehmer erwiesen. Neben dem Moderator, dem Protokollführer und dem Anforderungsanalytiker nehmen typischerweise der Auftraggeber, der Auftragnehmer, der Endbenutzer sowie Fachexperten und Entwickler teil.

Bei dieser vergleichsweise aufwändigen Methode, Anforderungen zu ermitteln, sind einige logistische Vorbereitungen zu bewerkstelligen. Dies umfasst die Bereitstellung der Räumlichkeiten, der Informationstechnik und der Unterlagen.

Danach kann zur eigentlichen Workshopdurchführung übergegangen werden. Diese teilt sich in folgende Hauptschritte auf:

Der erste Schritt dient der Ermittlung und Sammlung der Anforderungen. Zunächst werden nach der Bekanntgabe des Arbeitsablaufes die „Spielregeln“ fest-

gelegt. Es darf z. B. keine privaten parallelen Diskussionen geben und auf die Einhaltung der vorgegebenen Redezeit muss bestanden werden. Streitigkeiten unter den Teilnehmern sind sofort zu unterbinden. Im Gegensatz zum Anforderungsinterview setzt der Workshop auf eine Diskussion zwischen den Teilnehmern. Der Einsatz von Kreativtechniken wie Snowcards und Brainstorming (vgl. Anhang) erleichtern die Ermittlung von relevanten Anforderungen.

Im zweiten Schritt werden sie zusammengefasst und priorisiert. Es ist darauf zu achten, dass nur Anforderungen verworfen werden können, die von keinem der Teilnehmer für wichtig gehalten werden.

Ebenso wie bei dem Anforderungsinterview wird abschließend ein Protokoll erstellt.

2.2.1.3 Die Dokumentenanalyse

Bei der Dokumentenanalyse werden alle Dokumente, die zu einer Dienstleistung bzw. zu einem Produkt aufgestellt wurden, untersucht. Ferner lassen sich dazu Beschwerde- bzw. Verbesserungslisten, die bereits über ein bestehendes Produkt erstellt wurden, heranziehen [STEVENSON 1998, S. 29-31].

Oft beschreiben die Dokumentationen auch nur Geschäftsabläufe bzw. interne Geschäftsregeln oder es handelt sich um Produktstudien bzw. Marktstudien. Sie enthalten jedoch meist wichtige Anforderungen. Diese entsprechen häufig auch den formalen Bestimmungen einer Anforderungsspezifikation. Deswegen werden die Dokumente einem erfahrenen Anforderungsanalytiker übergeben, der die aufgeführten Anforderungen sortiert, analysiert und formal spezifiziert.

Bei Beschwerde- oder Verbesserungslisten, die meist von Kunden verfasst werden, besteht die wichtigste Aufgabe darin, die gewünschten Anforderungen zusammenzufassen und formal zu spezifizieren.

Zunächst werden die zu analysierenden Dokumente ausgewählt. Anschließend werden alle auftauchenden Anforderungen schriftlich fixiert. Oft lassen sich Anforderungen nur indirekt herauslesen. Diese sind dann formal zu spezifizieren und prägnant zu beschreiben. Probleme bzw. Verbesserungswünsche, die in den analysierten Dokumenten zu einem Produkt auftauchen, ähneln sich oft und lassen sich deshalb zusammenfassen. Im Normalfall bleiben trotzdem noch sehr viele Anforderungen übrig. Das gilt für alle Anforderungsquellen, die aus Dokumentationen gewonnen werden. Deswegen sind die gewonnenen Anforder-

rungen zu priorisieren. Das Ergebnis dieser Priorisierung ist in einem Abschlussdokument formal festzuhalten.

2.2.1.4 Arbeiten im Benutzerumfeld

Das Arbeiten im Benutzerumfeld dient in erster Linie dazu, dass der Entwickler sich ein Bild vom Gebrauch eines Produktes im Alltag macht. Nur der Einsatz in der Praxis deckt versteckte Probleme auf und eröffnet neuen Entwicklungsbedarf. In Japan wird diese Technik derart praktiziert, dass Entwickler von Automobilen sich bei Kunden einquartieren, um sich ein Bild von deren Lebenssituation zu machen und zu sehen, wie das Auto sich in deren Leben einfügt [STEVENSON 1998, S. 29]. Damit hoffen sie, Kundenwünsche frühzeitig zu erkennen und ein für den Kunden optimiertes Produkt zu entwickeln.

Meist wird diese Methode jedoch bei Softwareprodukten angewandt. Der Entwickler beteiligt sich dabei an der Arbeit im Einsatzgebiet und lernt vorhandene Schwierigkeiten im Umgang mit dem System als Benutzer im Alltagseinsatz kennen. Daraus wird der Entwicklungsbedarf abgeleitet.

Um ein zielorientiertes und effektives Arbeiten zu ermöglichen, ist folgendes Vorgehen sinnvoll:

Zuerst müssen alle wesentlichen Informationen über das zu erstellende Produkt beschafft und dementsprechend der Arbeitsort ausgewählt werden. Der Arbeitstermin und Platzressourcen sind vorab zu klären. Die Anforderungsgewinnung setzt sich aus dem Gespräch mit dem Benutzer, eigener Beobachtung und der Sammlung von Erfahrungen in der Praxis zusammen. Sämtliche gewonnenen Erkenntnisse und Kundenwünsche sind formal zu dokumentieren. Die Fülle der gewonnenen Anforderungen macht eine Priorisierung notwendig. Das daraus abgeleitete Abschlussdokument lässt sich gut in eine Anforderungsspezifikation aufnehmen. Diese ist nach den Regeln, die in den Merkmalen einer Anforderungsspezifikation beschrieben sind, anzufertigen.

2.2.1.5 Der IEEE-Standard

Der IEEE-Standard zur Anforderungsspezifikation teilt sich in drei Hauptkapitel [GLINZ 2002, S. 20-23] auf: die Einleitung, den Überblick und die Einzelanforderungen. Zusätzlich sind im Anhang ein Glossar und ein Verzeichnis der Dokumente vorgesehen (vgl. Abbildung 9).

Prototype SRS Outline (Prototyp SRS Entwurf)

Table of Contents (Inhaltsangabe)

1. Introduction (Einführung)
 - 1.1 Purpose (Zweck)
 - 1.2 Scope (Ziel)
 - 1.3 Definitions, Acronyms and Abbreviations (Definitionen und Abkürzungen)
 - 1.4 References (Verweise)
 - 1.5 Overview (Überblick)
2. General Description (Allgemeine Beschreibung)
 - 2.1 Product Perspectives (Produktansichten)
 - 2.2 Product Functions (Produktfunktionen)
 - 2.3 User Characteristics (Benutzereigenschaften)
 - 2.4 General Constraints (Allgemeine Einschränkungen)
 - 2.5 Assumptions and Dependencies (Voraussetzungen und Abhängigkeiten)
3. Specific Requirements (Spezifische Anforderungen)

Appendixes (Anhänge)

Index

Abbildung 9: IEEE-Standard zur Anforderungsspezifikation

Im IEEE-Standard ist die Beschreibung des Zwecks der Software Hauptbestandteil der Einleitung. Hier werden grundlegende Informationen aufgeführt. Dazu gehören eine kurze Vorstellung des Projektes, des Projektumfeldes und des Kunden. Um dem Projekt eine klare Orientierung zu geben, sind alle Ziele, insbesondere Haupt- und Teilziele aufzuführen. Die ausführliche Beschreibung des Einsatzbereiches erlaubt schließlich allen Beteiligten, sich ein klares Bild von der zu bewerkstellenden Aufgabe zu verschaffen.

Unter dem Überblick findet sich eine ausführliche und detaillierte Projektbeschreibung. Dazu gehören die Erläuterung des Einsatzbereichs der zu erstellenden Software, die klare Strukturierung der Problemstellung und die Darstellung globaler Anforderungen wie Leistungsanforderungen oder Randbedingungen. Für eine nachhaltige Anforderungsspezifikation, die auch nach Abschluss des Projektes von Unbeteiligten gut verstanden werden kann, sind sämtliche getroffenen Annahmen aufzuführen. Das Aufzeigen von Entwicklungsperspektiven stellt Nachfolgeprojekte in Aussicht und ist ebenfalls im Überblick darzustellen.

Im letzten Hauptkapitel sind alle Einzelanforderungen aufzuführen. Um eine ausreichende Übersicht zu gewähren, ist das Produkt nach einem logischen und hie-

rarchischen Prinzip in Teilprodukte zu unterteilen. Dies kann je nach Größe des Projektes auf mehreren Ebenen geschehen.

Der Anhang bildet den Abschluss der Anforderungsspezifikation. Dort werden alle Dokumente, auf die sich die Anforderungsspezifikation bezieht, aufgelistet [IEEE 1994, S. 9- 24].

2.2.1.6 Die Multimediaspezifikation

Unter der Multimediaspezifikation wird die Darstellung von Anforderungen durch verschiedene, über die Beschreibung durch Text hinausgehende, Medien verstanden. Dafür wird zuerst eine Anforderungsanalyse mit Hilfe der klassischen Methoden, wie z. B. den Anwendungsfällen (vgl. Absatz 2.2.1.8), erstellt. Die gewonnenen Anforderungen werden dann für eine elektronische Datenverarbeitung vorbereitet. So ist zum Beispiel zu entscheiden, inwieweit eine Multimedia-spezifikation notwendig ist und welche Anforderungen sinnvoll multimedial verarbeitet werden sollen. Dafür werden Anforderungen herausgegriffen, die ohne Multimediadarstellung nur schwer verständlich sind oder diejenigen, die einen großen Gewinn bezüglich der Darstellungsklarheit versprechen. Die solchermaßen identifizierten Anforderungen sind anschließend noch zu priorisieren, um den Arbeitsaufwand für die Darstellung nicht zu groß werden zu lassen.

Danach sind die ausgewählten Anforderungen multimedial darzustellen. Softwareprogramme, wie z. B. Multimedia Toolbook, erlauben das Verarbeiten bzw. das Zusammenfügen verschiedenster Medien, wie z. B. Videosequenzen, Animationen oder auch Audio-Effekte. Die restlichen Anforderungen werden schriftlich, bzw. mit traditionellen Methoden dargestellt und in die Multimediaspezifikation eingearbeitet. Zum Schluss wird die Multimediaspezifikation allen wesentlichen Projektteilnehmern vorgeführt und die Anforderungen bzgl. ihrer Richtigkeit validiert.

Die Multimediaspezifikation erweist sich zwar als eine extrem zeitaufwändige Methode für eine Anforderungsspezifikation, bietet aber bzgl. Anschaulichkeit die größten Möglichkeiten [OVERMYER 1999, S. 4-8].

2.2.1.7 Strukturierte Analyse

Die Strukturierte Analyse (SA/SADT) ist bereits Mitte der 70er Jahre entwickelt worden, um Anforderungen für Software darzustellen und war bis vor ca. 10 Jah-

ren die Standardmethode der Systemanalyse. Dabei werden die Anforderungen eines Systems mit Hilfe von Datenflussdiagrammen beschrieben. Folgende Vorgehensweise hat sich laut [PARTSCH 1991, S. 138] als sinnvoll erwiesen:

- Zunächst sind die gesammelten Informationen nach Daten und Aktivitäten zu trennen. Daraus werden Aktivitäten- und Datenlisten erstellt.
- In einem weiteren Schritt werden die Schnittstellen festgelegt und ein Basis-Datenflussdiagramm entwickelt. Dieses beschreibt grafisch die Hauptfunktionen des Produktes.
- Das Basisdiagramm ist mit einer ausreichenden Anzahl von Unterdigrammen (z.B. Kontext-Diagramm) zu verfeinern. Die Referenzierung der einzelnen Diagramme ermöglicht eine eindeutige und nachvollziehbare Zuordnung.
- Im letzten Schritt werden die einzelnen Diagramme von einem Kontrolleur überprüft und gegebenenfalls verbessert.

2.2.1.8 Anwendungsfälle

Mit Hilfe von Anwendungsfällen (vgl. Abbildung 10) lassen sich Wünsche aus Kundensicht darstellen. [SCHIENMANN 2002, S. 223 –232] unterteilt die Anforderungsaufnahme dabei in fünf Hauptschritte.

Zunächst werden alle Akteure/Benutzer identifiziert. Danach werden alle Anwendungsfälle aufgezeigt und in einem groben Anwendungsfallmodell dargestellt. Ein Anwendungsfall beschreibt alle Aufgaben, die ein System abuarbeiten hat, um ein vordefiniertes Ergebnis zu erreichen. Die Anwendungsfälle werden kurz beschrieben, deren Ziele genannt und mit einer grafischen Darstellung verdeutlicht. UML hat sich als Standardmethode für die Beschreibung von Anwendungsfällen etabliert. Die Anforderungen werden dabei in Klassendiagrammen, Anwendungsfalldiagrammen und Zustandsdiagrammen dargestellt. Bei den Anwendungsfällen symbolisieren durch Striche angedeutete Personen die Akteure der in Ellipsen zusammengefassten Anwendungsfälle. Durch ungerichtete Linien bzw. richtungsweisende Pfeile wird eine Verbindung zwischen Anwendungsfall und Akteur hergestellt (s. Abbildung 10). Abschließend sind Anwendungsfälle auf ihre Richtigkeit hin zu überprüfen.

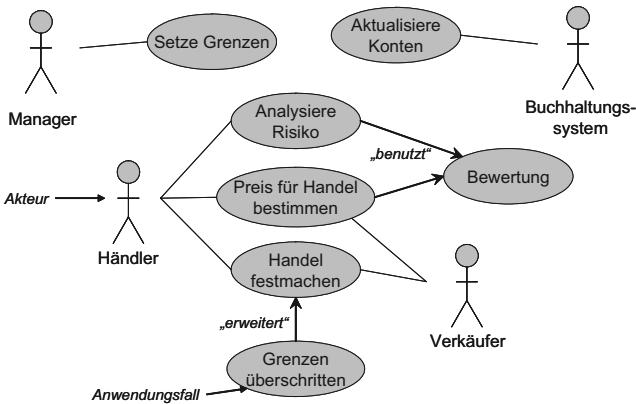


Abbildung 10: Anwendungsfalldiagramm nach [FOWLER & SCOTT 1999]

2.2.2 Techniken zur Überprüfung der Anforderungsspezifikation

2.2.2.1 Review

Wurden mit Hilfe einer der Methoden des vorangegangenen Abschnitts die Anforderungen aufgenommen und festgehalten, so gilt es abschließend diese Spezifikation zu überprüfen.

Unter einem Review versteht man die Zusammenkunft aller wesentlichen von dem Projekt betroffenen Personen, um die aufgenommenen Anforderungen zu verifizieren. Zu den wesentlichen Teilnehmern zählen das am Projekt beteiligte Management, die Entwickler und die Benutzer [MAZZA ET AL. 1994, S. 118]. Diesen wird die ausgearbeitete Anforderungsspezifikation frühzeitig ausgehändigt. Die anberaumte Sitzung wird genutzt, um auftauchende Fragen zu klären und sicherzustellen, dass die aufgenommenen Anforderungen den Kundenwünschen entsprechen. Änderungswünsche werden diskutiert und gegebenenfalls in die Anforderungsspezifikation eingearbeitet. [KOTONYA & SOMMERVILLE 2000] empfehlen folgende Vorgehensweise:

Zuerst werden die Teilnehmer und der Ort des Reviews ausgewählt. Danach sind die Anforderungsspezifikationen an die Teilnehmer zu verteilen. Im nächsten Schritt werden die Reviewteilnehmer aufgefordert, Fehler und Konflikte in der

Anforderungsspezifikation aufzudecken. Diese werden in der eigentlichen Sitzung ausdiskutiert. Im Anschluss sind die von der Gruppe akzeptierten Maßnahmen in der Anforderungsspezifikation festzuhalten [KOTONYA & SOMMERVILLE 2000, S. 91].

2.2.2.2 Priorisierung

Unter der Priorisierung versteht man in diesem Zusammenhang das gegeneinander Abwägen verschiedener, sich zum Teil entgegengesetzt auswirkender Anforderungen. Diese teilt sich in fünf Vorgehensschritte auf [SCHIENMANN 2002, S. 267 –271]. Zunächst werden alle Anforderungen wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben in eine Liste aufgenommen. Danach werden die für die Priorisierung notwendigen Bewertungskriterien festgelegt. Dabei sind Nutzen und Relevanz einer Produkteigenschaft meist entscheidende Bewertungskriterien aus Kundensicht. Kosten und das zu erwartende Entwicklungsrisiko stellen dagegen meist die wesentlichen Priorisierungskriterien aus der Entwicklersicht dar.

Diese unterschiedlichen Kriterien, hinsichtlich derer die Anforderungen bewertet bzw. priorisiert werden, bilden die Grundlage für die anschließende Vergabe von Punktzahlen zwischen 1 und 5. Niedrige Kosten bzw. niedriger Nutzen würde z. B. die Punktzahl 1 erhalten. Daraufhin ist eine Einigung über das Bewertungsverfahren notwendig, bei der jedes Kriterium einen zusätzlichen Gewichtungsfaktor erhält und somit eine gewichtete Reihung der Anforderungen erfolgen kann. Die Gesamtpunktzahl für eine einzelne Anforderung errechnet sich dabei wie folgt:

Gesamtpunktzahl = Summe aller P_p /Summe aller P_n (für eine Anforderung)

P = Punktzahl eines Kriteriums x Gewichtungsfaktor

P_p : gewichtete Punktzahl von Kriterien, die einen positiven Beitrag zum Ergebnis liefern

P_n : gewichtete Punktzahl von Kriterien, die einen negativen Beitrag zum Ergebnis liefern

Die höchste Gesamtpunktzahl entspricht der höchsten Priorität.

2.2.2.3 Prototypisierung

Bei der Prototypisierung wird dem Kunden eine stark vereinfachte Version des Endprodukts vorgestellt. Der Kunde kann dann überprüfen, ob das zu erwartende Produkt seinen Vorstellungen entspricht. Die Überprüfung des Prototyps zieht meistens Änderungs- oder Verbesserungswünsche nach sich, weswegen alle wichtigen Projektteilnehmer einzubeziehen sind. Die neu auftretenden Anforderungen werden priorisiert und in die Anforderungsspezifikation mit aufgenommen. [KOTONYA 2000] schlägt bei Software-Entwicklungen folgende Vorgehensweise vor:

Zunächst werden die Systemtester ausgewählt. Am besten geeignet sind Personen, die schon über Erfahrungen im Umgang mit Prototypen verfügen. Im zweiten Schritt sind Testszenarios der Anforderungsspezifikation zu entwerfen. Bei Softwareprodukten hat sich gezeigt, dass die geplante Überprüfung wesentlich effektiver ist, als zielloses Ausprobieren. Danach haben die Testpersonen die Szenarios selbständig durchzuführen, wobei sie von den Entwicklern beobachtet werden. Aus der Vorgehensweise der Testpersonen lassen sich wesentliche Anforderungen ableiten. Im letzten Schritt sind alle auftretenden Probleme formal zu dokumentieren [KOTONYA & SOMMERVILLE 2000, S. 101/ 102].

2.2.2.4 Inspektion

Die Inspektion dient zur Überprüfung der Anforderungsdokumentation. Dabei wird in drei Schritten vorgegangen [SCHIENMANN 2002, S. 159 –161]. Zuerst werden die Inspektionsmitglieder, der Umfang und der Zeitpunkt der Inspektion bestimmt. Im zweiten Schritt überprüfen die Teilnehmer die Anforderungsspezifikation anhand einer Kriterienliste (s. Abbildung 11).

Im letzten Schritt werden, nachdem die Zielsetzung der Sitzung explizit erläutert wurde, die aufgetretenen Fehler diskutiert und dokumentiert.

Prüfliste Lastenheft		Projekt:	Prüfer:	Datum:			
Dokument:							
Nr.	Allgemeine Fragen zum Dokument	OK					
1.	Hat die Unterlage einen eindeutigen Versionsstand?						
2.	Ist ein Deckblatt vorhanden und ist es vollständig ausgefüllt?						
3.	Gibt es ein Inhalts-, Abkürzungs-, und Quellenverzeichnis mit Referenzdokumenten, sind Querverweise eindeutig?						
4.	Sind wichtige Begriffe und Abkürzungen in einem Glossar definiert?						
5.	Sind Begriffe eindeutig definiert und durchgängig verwendet?						
6.	Ist das Dokument vollständig, d. h. fehlen keine Textstellen, Seiten, Abbildungen?						
7.	Ist das Dokument gut gegliedert und klar aufgebaut (Graphiken, Tabellen...)?						
Fragen zu den Rahmenbedingungen							
8.	Sind die Markterfordernisse und die aktuelle Produktlandschaft berücksichtigt?						
9.	Ist das Produkt richtig in das Umfeld eingeordnet?						
10.	Ist das Profil der zukünftigen Nutzer korrekt erfasst						
11.	Sind die HW/SW-Konfigurationen und alle Schnittstellen vollständig vorgegeben?						
12.	Sind die Entwicklungsrahmenbedingungen vollständig erfasst und begründet?						
Allgemeine Fragen zur Darstellung der Produkthanforderungen							
13.	Wird die (zukünftige) Produktstrategie deutlich?						
14.	Sind die Anforderungen sinnvoll benannt, vollständig und ausreichend detailliert?						
15.	Sind Anforderungen durch testbare Abnahmekriterien konkretisiert?						
16.	Sind die Anforderungen konsistent und widerspruchsfrei?						
17.	Sind die Abhängigkeiten der Anforderungen untereinander aufgezeigt?						
Fragen zu den funktionalen Anforderungen							
18.	Sind Abläufe und Geschäftsobjekte vollständig erfasst?						
19.	Sind Inputs, Ergebnisse, Reaktionen zu den Abläufen vollständig und notwendig?						
20.	Sind allen Anwendungsfällen Anforderungen zugeordnet?						

Abbildung 11: Kriterienliste für die Inspektion von Anforderungen nach [SCHIENMANN 2002]

2.3 Methoden der mechanischen Konstruktion

In diesem Absatz werden die in der mechanischen Konstruktion verwendeten Ansätze und Methoden des Entwicklungsvorgehens dargestellt.

Die Ansätze der Konstruktionsmethodik im Maschinenbau von [HUBKA 1976, KOLLER 1994, PAHL & BEITZ 1993, RODENACKER 1991] sowie [ROTH 1982] untergliedern den Konstruktionsprozess in verschiedene Phasen und beschreiben die dabei notwendige Abfolge der Teilprozesse. Einen Überblick der hier definierten Inhalte und Prozessschritte geben z. B. [BENZ 1990] oder [WALZ 1999] (vgl. Abbildung 12).

Zur Aufgabe der mechanischen Konstruktion gehört nicht nur die Erstellung von Fertigungszeichnungen. Eine wichtige Fragestellung ist zunächst die Festlegung von physikalischen Wirkprinzipien. Für die Darstellung dieser grundlegenden Funktionen existieren bereits einfache Symboliken [KOLLER 1994, EHRENSPIEL

1995], die eine abstrakte Modellierung des jeweiligen physikalischen Teilsystems bzw. des Produktes ermöglichen. Methoden, die den Konstrukteur bei der Entwicklung des Systems durch das Bereitstellen von Standard-Komponenten unterstützen [HICKS & CULLEY 2004], erlauben anschließend eine schnelle Umsetzung der gefundenen Prinzipien in Systembaugruppen.

Der Maschinenbauingenieur denkt, wie in [VDI/VDE 2422] beschrieben, vorzugsweise in Baugruppen. Für seine konstruktive Arbeit sind vor allen Dingen Geometrien, Genauigkeiten, Ist- und Sollmaße, Bezugsebenen und Verbindungselemente von Bedeutung.

Parameterabhängige Modelle ermöglichen in den Systemen eine einfache und schnelle Anpassung der erstellten Geometrien beziehungsweise der Bauteile an geänderte Rahmenbedingungen. Bei einigen CAD-Systemen besteht die Möglichkeit, so genannte Features (=engl. Eigenschaft) zu verwenden [KUHNHENN 1997, SPUR & KRAUSE 1997, SHAH & MÄNTYLÄ 1995]. Features werden eingesetzt, um nicht geometrische produktbeschreibende Informationen, d. h. semantische Informationen, geometrischen Elementen zuzuordnen [VAJNA ET AL. 1994, RIEGER 1994, DEUSE 1998]. In der Literatur ist die Definition von Features nicht ganz einheitlich [RIEGER 1994, KRAUSE & WEBER 1999, EVERSHEIM & DEUSE 1997]. Wie den verschiedenen Darstellungen übereinstimmend zu entnehmen ist, kann ein Feature einen semantischen Sachverhalt beschreiben oder eine Form oder es kann eine Kombination aus beiden Elementen sein [SPUR & KRAUSE 1997].

Aufbauend auf dem ISO 10303-STEP-Produktmodell spezifiziert [BAUMANN 1994, S. 61 ff.] ein Partialmodell für die frühen Konstruktionsphasen Konzipieren und Entwerfen. Er unterteilt dieses Modell wiederum in die drei Partialmodelle Anforderungsmodell, Funktionsmodell und Prinzipmodell. In diesem Ansatz werden ausdrücklich die Anforderungen mit einer eigenständigen Modellierung berücksichtigt. Diese Modellsicht kann einen ersten Schritt in Richtung der softwaretechnischen Anforderungsmodellierung darstellen, den es für die integrative Nutzung aller Informationen in der mechatronischen Entwicklung auszubauen gilt.

VDI 2221	VDI 2222 (*)	Roth	Rodenacker	Koller
	Planen		Anforderungen ermitteln	Aufgabenstellung erarbeiten
Planen und Klären der Aufgabenstellung	Konzipieren	Aufgabenformulierungsphase		
Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen		Funktionelle Phase	Festlegen der logischen Wirkzusammenhänge	Funktionssynthese
Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen		Prinzipielle Phase	Festlegen der physikalischen Wirkzusammenhänge	Effektsynthese
Gliedern in realisierbare Module	Entwerfen	geometrisch-stoffliche Produktgestaltung	Festlegung der konstruktiven Wirkzusammenhänge	Effekträgersynthese
Gestalten der maßgebenden Module				Qualitative Gestaltsynthese
Gestalten des gesamten Produktes		herstellungstechnische Produktgestaltung	Festlegung der Gesamtkonstruktion	Quantitative Gestaltsynthese
Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Ausarbeiten			

(*) Die Ansätze von Pahl/Beitz sowie Hubka/Eder folgen der Einteilung der VDI 2222 (1977)

Abbildung 12: Vergleich der Entwicklungsvorgehensweisen in der mechanischen Konstruktion [WALZ 1999]

In der mechanischen Konstruktion werden die Konstruktionsarten nach der Anzahl der durchlaufenen Konstruktionsphasen unterschieden. Aus dieser Einteilung ergeben sich die in Abbildung 13 zusammengestellten Konstruktionsarten mit ihren spezifischen Merkmalen.

Im Allgemeinen werden die Konstruktionsarten der hier dreigeteilten Neuentwicklung seltener durchlaufen, als die Bereiche der Anpassungs- und Variantenkonstruktion. Lediglich im Sondermaschinenbau mit Stückzahlen bei Maschinen und Anlagen von eins erlangt dieser Bereich eine höhere Priorität.

Konstruktionsart	Neuentwicklung I	Neuentwicklung II	Neuentwicklung III	Anpassungskonstruktion	Variantenkonstruktion	Auswahl
Merkmale	Für Hauptfunktionen kein Lösungsprinzip bekannt	Entwicklung unter Verwendung prinzipiell bekannter Lösungen	Neuentwicklung mit vorhandenen Lösungskonzepten	Wegen veränderter Forderungen neue Gestaltfestlegung mit bekanntem Lösungsprinzip	Quantitative Gestalt (Abmessungen) wird neu festgelegt. Lösungsprinzip und qualitative Gestalt unverändert	Festlegung des optimalen Produktes aus einer Anzahl am Markt vorhandener Produkte
Beispiel	Erste Magnetschienebahn/Erstes Düsentriebwerk	Roboterantrieb mit neu konstruierter Statik	Sondermaschine mit bewährten Antriebs-elementen	Zahnradgetriebe für andere Wellenlage und Leistung	Turboverdichter bekannter Bauart mit anderer Fördermenge	Auswahl eines Getriebemotors aus Herstellerkatalog
Schwierigkeitsgrad						einfacher
Häufigkeit						häufiger

Abbildung 13: Unterschiedliche Konstruktionsarten nach [EHRENSPIEL 1995]

Die unterschiedlichen Neukonstruktionsverfahren erfordern eine mehr oder weniger ausgeprägte Planungsphase. Im Gegensatz dazu beginnt die Variantenkonstruktion erst mit dem Entwerfen, wobei teils eine kurze Konzipierung noch nötig ist. Die Anpassungskonstruktion stellt eine Zwischenform dar und beginnt im zeitlichen Rahmen mit der Konzeptphase (vgl. Abbildung 14).

Den drei verschiedenen Varianten der Neukonstruktion ist gemein, dass ein neues Produkt entwickelt wird, das in dieser Art noch nicht konstruiert wurde. Bei den Neukonstruktionen II und III werden dabei jedoch prinzipiell bereits bekannte Lösungen verwendet (II) bzw. vorhandene Konzepte zur Lösungsfindung integriert (III).

Konstruktionsarten	Planen	Konzipieren		Entwerfen	Ausarbeiten
		Funktionsfindung	Prinzip-erarbeitung	Gestaltung	Detaillierung
Neuentwicklung I, II, III					
Anpassungskonstruktion					
Variantenkonstruktion					

Abbildung 14: Zuordnung der Konstruktionsarten zu den Konstruktionsphasen nach [ROMANOW 1994]

Ausgangspunkt einer jeden Konstruktion ist die Anforderungsliste bzw. das Pflichtenheft, das in der Aufgabenformulierungsphase erstellt wird. Man unterteilt die Anforderungen an die zu konstruierende Maschine in Forderungen des Herstellers (wirtschaftliche Konstruktion und Herstellung, montagegerechte und transportgerechte Konstruktion, etc.) und Forderungen des Anwenders (Qualität der Werkstücke, Mengenleistung etc.).

2.4 Kommunikation im mechatronischen Entwicklungsprozess

Wie bereits in Abschnitt 1.7.3 erläutert, besteht in der mechatronischen Entwicklung im Vergleich zu der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten rein mechanischen Konstruktion ein weiteres Problem darin, eine kontinuierliche Kommunikation zwischen den einzelnen Fachbereichen sicher zu stellen. Dies bedeutet, dass über die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Methoden hinaus weitere Vorgehensweisen zur Durchführung einer mechatronischen Entwicklung notwendig sind.

Der mechatronische Entwicklungsprozess ist durch die Notwendigkeit der durchgehenden Kommunikation der drei Fachdisziplinen Mechanik, Elektronik und Software-Entwicklung [ISERMANN 2002, FLATH 2000] geprägt. Diese Durchgängigkeit setzt die ganzheitliche Betrachtung des Systems, ein interdisziplinäres Denken, eine gemeinsame begleitende Sprache bei den Entwicklern und meist den Einsatz rechnerunterstützter Werkzeuge voraus [VDI 2206]. Wie in der [VDI/VDE 2422] beschrieben, denken der Konstrukteur und der Entwickler elektromechanischer Baugruppen in Funktionen und Funktionsträgern. Die Gesamtfunktion wird in Teilfunktionen zergliedert, zu deren Verwirklichung aus der Fülle der physikalischen Effekte geschöpft werden kann, bis aus Teilsysteme-

men das technische System aufgebaut ist, das die gestellte Aufgabe erfüllt. Im Gegensatz dazu denkt der Entwickler von Schaltungen vorzugsweise in Blockschaltbildern und in Signalflüssen. Es werden käufliche Bauteile verwendet, logische Verknüpfungen erstellt, Anpassungen an die Elektromechanik vorgenommen und Verlustleistungen und Störabstände betrachtet. Eine weitere Fachdisziplin ist die Software-Entwicklung, in der man primär in zeitlichen Abläufen, logischen Verknüpfungen und Datenstrukturen, die auch als Zustände und Übergänge dargestellt werden, denkt.

Bezug nehmend auf die [VDI 2221] kann es zweckmäßig sein, für Bedingungen, Restriktionen und weitere Informationen über die zu lösende Aufgabe eine Strukturierung und Formalisierung vorzunehmen, mit der das Erkennen wesentlicher Funktionen und das Durchführen der nachfolgenden Arbeitsschritte erleichtert wird. Hierfür werden Aufgaben darstellende Modelle eingesetzt, die hauptsächlich verbal formuliert werden, weshalb von der Aufgabenformulierungs-Phase gesprochen wird (vgl. Abbildung 15).

[HARZENETTER 2001] führt aus, dass die unterschiedlichen Interessensvertreter für die Entwicklung des Produkts unterschiedliche Bedeutung haben. Daher müsse bei der Entwicklung nicht nur darauf geachtet werden, dass die Nutzeranforderungen realisiert würden, sondern auch darauf, dass Phasen des Produktlebenszyklus entsprechend ihrer Bedeutung bei der Entwicklung des Produktes mit berücksichtigt würden. Der Großteil der funktionalen Anforderungen an ein Produkt werde durch die Betriebsphase festgelegt, doch beziehen sich die Anforderungen anderer Phasen des Produktlebenszyklus stärker auf nicht-funktionale Eigenschaften des Produktes, also die Qualitätsaspekte.

Wie auch [DEMARCO 1989] ausführt, ist die Anfangsphase eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes für die zeit-, kosten- und qualitätsgetreue Abwicklung von besonderer Bedeutung. Das Hauptaugenmerk einer Methodik für die Entwicklung von mechatronischen Systemen muss also stets auf den frühen Entwicklungsphasen liegen. Die bisherigen Ansätze zur Unterstützung der mechatronischen Entwicklung lassen dagegen ausnahmslos den Beginn eines Projektes, nämlich die Aufnahme und Strukturierung der Kundenanforderungen, außer Acht.

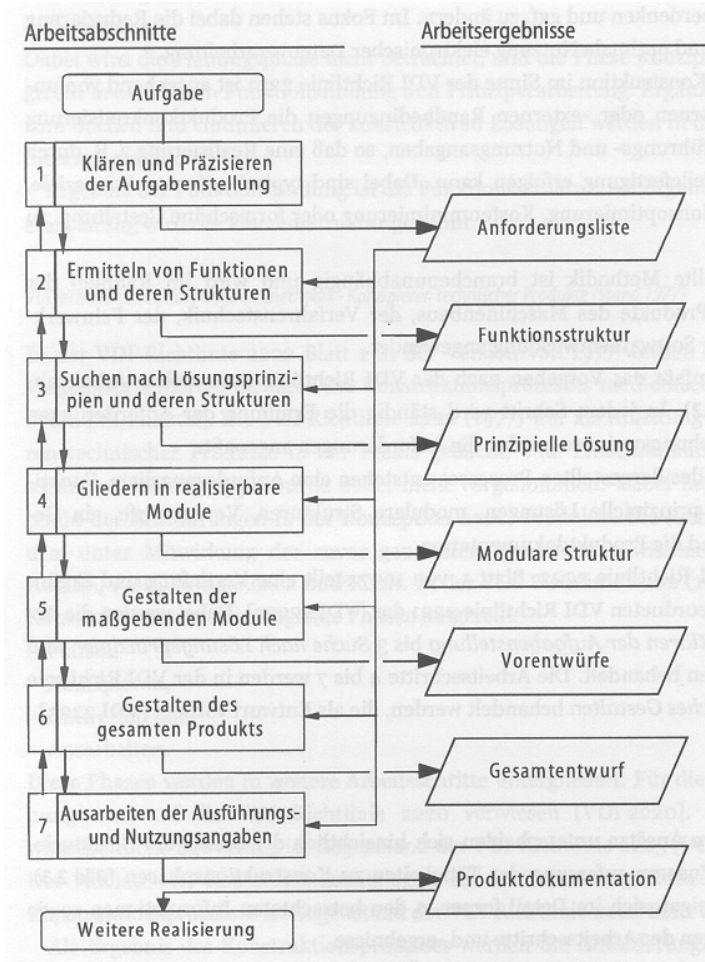


Abbildung 15: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach [VDI 2221]

2.5 Rechnerwerkzeuge in der mechatronischen Entwicklung

Eine fortschreitende Automatisierung von mechatronischen Systemen und im speziellen von Produktionsanlagen erfordert den Einsatz einer zunehmenden Anzahl von Aktoren, Sensoren und Verbindungselementen. Damit steigt der Aufwand für die Informationsverwaltung während der Entwicklung, der Montage, der Inbetriebnahme und der Wartung. Auf Grund einer heterogenen Softwarelandschaft in den Konstruktionsbereichen Mechanik, Elektrik und Software werden Informationen über die eingesetzten Komponenten teils unvollständig oder fehlerhaft ausgetauscht. Insbesondere nachträgliche Änderungen in einer Entwicklungsabteilung erfordern einen hohen Aufwand, um in die Datenbestände der anderen Disziplinen eingearbeitet zu werden. Inkonsistenzen und falsch zusammengesetzte Maschinen sind häufig die Folge.

Im Bereich des Anforderungsmanagements existieren bereits zahlreiche Werkzeuge, die eine durchgehende Entwicklung von objektorientierter Software unterstützen. Eine Auflistung und Bewertung der auf dem Markt verfügbaren Anforderungsmanagement-Werkzeuge ist unter [INCOSE 2004] aufgeführt. Sowohl der „Requirements Management Systems“ Report [YPHISE 2002] als auch eine Untersuchung von Werkzeugen für das Anforderungsmanagement der META Group 2003 belegen, dass der derzeitige Marktführer DOORS (von telelogic) das hinsichtlich eines reibungslosen Projektablaufs beste Programm anbietet. In den Werkzeugen werden aufgenommene Anforderungen mit Abnahmetests, Systemmodellen und anschließend mit dem Programmcode verknüpft. Für den Bereich der mechanischen Konstruktion bzw. der elektrischen Konstruktion ist ein derart durchgehendes Vorgehen bisher nicht realisiert.

Für die Entwicklung von mechatronischen Anlagen sind CAD-Tools wie ProEngineer oder CATIA grundlegende Werkzeuge, über deren Inhalte ein vielfacher Informationsaustausch stattfindet. In diesen Systemen werden Fertigungs- und Zusammenbauzeichnungen generiert, die von allen beteiligten Disziplinen für eine weitere Detaillierung wie z. B. die Verkabelung genutzt werden.

Für die Elektronik- und Hydraulik-Planung werden E-CAD-Systeme verwendet, die es dem Benutzer ermöglichen, in einem vorgegebenen Bauraum die Verkabelung und die Rohr- und Schlauchverlegung dreidimensional abzubilden. Außerdem können hier die einzelnen Elektronik- und Hydraulikkomponenten der Maschine ausgewählt werden.

Laut [VDI 2206] ist mit der fortschreitenden Entwicklung der Informationstechnik eine Vielzahl von Rechnerwerkzeugen entstanden, die den mechatronischen Entwurf unterstützen. Diese sind jedoch nur unzureichend integrierbar und durchgängige Entwurfsumgebungen sind nur in Ansätzen vorhanden. Um die Konstruktion von mechatronischen Produktionssystemen zu unterstützen, ist eine durchgehende Werkzeugkette notwendig. Die vorhandenen Rechnerwerkzeuge sind derart spezialisiert und von den Anwendern der verschiedenen Disziplinen akzeptiert, dass eine Integration aller Funktionalitäten in ein Rechnerwerkzeug weder möglich noch von den Anwendern erwünscht wäre.

Da in den einzelnen Fachbereichen jeweils verschiedene Software-Werkzeuge Anwendung finden und ein System nicht alle Bereiche zufrieden stellend abdecken kann, muss der automatisierte Datenaustausch zwischen den einzelnen verwendeten Software-Programmen ermöglicht bzw. vereinfacht werden.

2.6 Kosten und Kostenschätzung im Entwicklungsprozess

Um Systeme wirtschaftlich rentabel fertigen zu können, ist die Kostenschätzung ein notwendiger Schritt im Produktentwicklungsprozess [EHRENSPIEL ET AL. 2007]. In diesem Abschnitt wird die Bedeutung der Kostenabschätzung für mechatronische Produkte erläutert. Eine detaillierte Betrachtung der Kostenschätzung während der mechanischen Konstruktion von Werkzeugmaschinen wird in [ROMANOW 1994] oder [SPRENZEL 2000] vorgestellt.

Die Kosten für ein mechatronisches Produktionssystem lassen sich zunächst in *Entwicklungs-* und *Herstellkosten* unterteilen. Da solche kostenintensiven Systeme meist speziell auf einen Kundenwunsch hin entwickelt oder weiter entwickelt werden, haben die *Entwicklungskosten* einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den gesamten für das Projekt zu veranschlagenden Kosten. Der kostenmäßig hohe Materialeinsatz bei solchen Maschinen lässt die Aufwände für die Entwicklung allerdings häufig in den Hintergrund treten.

Das in Abbildung 16 aufgezeigte Wasserfall-Modell der Produktentwicklung beschreibt die Nutzung der *Herstellkosten-Schätzung* während der Entwicklung. Um ein realistisches Angebot abgeben zu können, ist allerdings auch die frühzeitige Abschätzung der Entwicklungsaufwände notwendig. Methoden hierfür wurden vor allen Dingen in der Software-Technik entwickelt, da in dieser Fachdisziplin die „Materialkosten“ vernachlässigbar gering sind. Diese rechnerunterstützte Abschätzung wird im folgenden Abschnitt 2.7 erläutert.

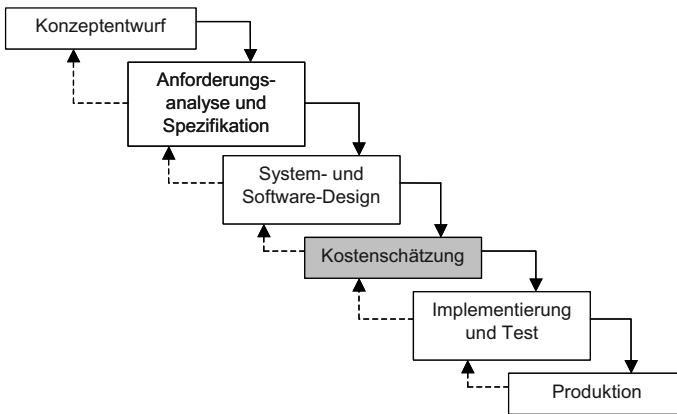


Abbildung 16: Kostenschätzung im Wasserfall-Modell eines Produkt-Entwicklungsprozesses (in Anlehnung an [ROYCE 1970])

Kosten sind die Zusammenfassung des Verbrauchs von Faktoren der Produktion, ausgedrückt in Geld und externen Dienstleistungen. Darunter fallen auch öffentliche Gebühren für den Aufbau und den Anschluss von Sachanlagen und/oder Dienstleistungen.

Die Kostenabschätzung bildet stets eine Grundlage für laufende Entscheidungen hinsichtlich der Projektkosten in verschiedenen Entwicklungsphasen. In jedem Projektstadium repräsentiert die Kostenabschätzung eine Voraussage des zuständigen Projektmanagers über die zu erwartenden Gesamtkosten aufgrund der bis zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Daten.

In frühen Phasen der Produktentwicklung ist es somit möglich, Produktgestaltungsentscheidungen gezielt aufgrund von Kostengesichtspunkten zu treffen.

Das dargestellte Szenario ist generell für die produzierende Industrie relevant und im besonderen Maße für den Bereich Automotive und andere High-Tech-Industrien.

Laut [GERHARD ET AL. 1994] kann der Ertrag **eines** bestimmten Produktes positiv, negativ oder genau Null sein. Dies gilt jeweils in einer spezifischen Marktsituation (Marktpreis) oder während einer spezifischen Periode. Dabei sind das Unternehmen und die Produktion, die für bestimmte Primärkosten sorgen, zu berücksichtigen. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, ist es allerdings für jedes

Unternehmen überlebensnotwendig, dass der Gewinn über die **gesamte** Produktpalette hinweg positiv ist. Kosten sind eine wichtige marktbestimmte Anforderung und sie sind deshalb immer Bestandteil der Spezifikation.

Alle Kosten, die direkt auf ein Produkt (Kostenobjekt bzw. Kostenträger) bezogen werden können, werden als *direkte Kosten* bezeichnet und können durch Dokumente wie Konstruktionszeichnungen oder Arbeitsanweisungen einzelnen Produkten zugeordnet werden.

Kosten, die aufgrund äußerer Notwendigkeiten entstehen, aber nicht einem einzelnen Produkt (Kostenobjekt) zugeordnet werden können, werden als *Gemeinkosten* bezeichnet. Allgemeine Forschungs- und Entwicklungskosten, ebenso wie Marketing- und Verwaltungskosten, die vom Gesamtdeckungsbeitrag des Produktes getragen werden müssen, aber nicht durch die Produktion oder einen eigenen Entwicklungsauftrag beeinflusst werden, stellen die *indirekten Kosten* dar.

Mechatronische Systeme sind fachbereichsübergreifend entwickelte Produkte, weshalb das notwendige Wissen für die Entwicklung dieser Produkte sehr breit verteilt ist. Momentan besteht ein Defizit hinsichtlich einer Methode für die integrierte Entwicklung. Mechanische Konstrukteure entwickeln in einer geometrisch geprägten Umgebung, die elektronischen Komponenten werden durch eine funktionale Beschreibung in der Elektronik-Abteilung entwickelt, während die Software-Entwicklung in einer Ablauforientierung die Entwicklung vorantreibt.

Für mechatronische Produkte müssen Software-Komponenten für die Steuerung des Produktes entwickelt werden. Dies hat zur Folge, dass Software-Entwicklungskosten in die Aufstellung der Kostenbestandteile mit aufgenommen werden müssen.

Der Angebots- und Entwicklungsprozess beginnt, wenn Kunden eine Angebotsanfrage senden oder wenn die entsprechende Abteilung die Anforderungen für die Entwicklung eines neuen Produktes definiert. Die Entwicklungsabteilung beim Hersteller ist dann gefordert, einen ersten technischen Vorschlag zu entwerfen. Das Projektmanagement erstellt auf Grundlage der Struktur oder eines daraus abgeleiteten Einzelnachweises eine erste Kostenschätzung. Sind in dem Entwurf neue Materialien oder unbekannte Einzelteile vorgesehen, werden über die technische Einkaufsabteilung Angebote bei den bekannten Zulieferern angefragt. Basierend auf dieser ersten Kostenschätzung beginnt eine iterative Abstimmung zwischen den drei involvierten Abteilungen, um das Produkt hinsichtlich der Kosten zu optimieren.

Unter dem heute herrschenden hohen Konkurrenzdruck ist es für jedes Unternehmen zunehmend wichtig, in einer möglichst frühen Phase der Entwicklung eine Kostenschätzung für das Produkt abgeben zu können. Daraus ergeben sich für den Produkthersteller zwei wesentliche Vorteile:

- Kostenkalkulations-Informationen werden der Entwicklungsabteilung zugänglich gemacht, wodurch diese leichter auf ein vorgegebenes Kostenziel hin konstruieren kann.
- Vor der Annahme eines Auftrages können die Kalkulationsergebnisse bereits detailliert in ein Angebot einfließen.

2.7 Rechnerunterstützung bei der Kostenschätzung

Die ökonomischen Bedingungen für ein Unternehmen werden laut [LEE 2001] sehr stark durch die Produktherstellkosten beeinflusst. Hierdurch wird entschieden, ob Gewinn oder Verlust erzielt wird. Kostenschätzungen, die einen zu hohen Angebotspreis zur Folge haben, können den Verlust eines Auftrages bedeuten. Andererseits führen zu niedrig angesetzte Angebote zu einem Verlustgeschäft, wodurch das langfristige Bestehen oder Wachstum des Unternehmens gefährdet wird. Deshalb ist es ausgesprochen wichtig, bereits in einer sehr frühen Phase eine zuverlässige Kostenschätzung vornehmen zu können. Dabei sind verschiedene Alternativen darzustellen und zu vergleichen, so dass die notwendige Produktqualität mit einem möglichst geringen Preis erzielt werden kann. Produkte, die zu niedrigen Kosten produziert werden können, dabei aber eine gute Qualität aufweisen, führen natürlich zu einem höheren Gewinn.

Sollen die Kosten für die Herstellung eines Produktes abgeschätzt werden, können die Kosten einzelner Subsysteme bewertet und für die Gesamtkostenabschätzung aufsummiert werden [DE MARCO 1989]. Dieser Prozess entspricht dem alltäglichen Vorgehen zur Ermittlung eines Gesamtpreises. Für die Kostenabschätzung eines komplexen mechatronischen Produktes hingegen, das aus vielen hundert Teilen zusammengesetzt ist und zudem zu jedem Teil verschiedene Parameter berücksichtigt werden müssen, die einen Einfluss auf die Kosten haben, ist dieses Vorgehen nicht ohne geeignete Softwareunterstützung anwendbar.

2.7.1 Abschätzung von Kosten der mechanischen Bauteile

Für die Schätzung der Materialkosten ist es sinnvoll, sobald die Materialanforderungen festgelegt sind, direkte einzelne Materialpreise abzufragen. Unabhängig davon, ob der Kontakt mit dem Materialzulieferer telefonisch aufgenommen wird, die Angebotsanfrage per Fax oder E-Mail erfolgt oder die vorhandene Datenbasis nach den gespeicherten Materialpreisen durchsucht wird – die Kostenkalkulationssoftware sollte jeden dieser Prozesse unterstützen.

Eine neue Funktionalität in einigen Kostenschätzungssoftwaresystemen ermöglicht eine automatische Suche nach den günstigsten Materialpreisen im Internet. Diese Funktionalität lehnt sich an die Suchalgorithmen verschiedener Reiseveranstalter für das Aufsuchen und Buchen des günstigsten Flugtickets an.

Rechnerunterstützung bei der Schätzung von Kosten erlaubt es dem Nutzer sehr genau, die Herstellungszeit und die Kosten für jede Aufgabe vorauszusagen. Die Planung einer angemessenen Entwicklungszeit muss technisch fundiert sein. Dies bedeutet, dass sie sich auf Maschinen, Material und Arbeitskraft gleichermaßen bezieht [LINDEMANN & MÖRTL 2006]. Damit die Software die Kalkulation präzise und schnell ausführen kann, müssen alle vorhandenen Informationen zu dem zu fertigenden Produkt detailliert in dem Werkzeug beschrieben werden.

Da sich die Anforderungen an die Kostenschätzung für reine Hardware-Produkte von denen einer Abschätzung der Kosten für die Software-Entwicklung deutlich unterscheiden, wurden für diese beiden Bereiche verschiedene unterstützende Systeme entwickelt. Deren grundlegende Funktionalitäten sollen im Folgenden beschrieben werden.

Hardware-Kosten sind die Gesamtheit aller Kosten für Komponenten, Baugruppen und Subsysteme. Dazu zählen mechanische, elektromechanische, elektronische, hydraulische und pneumatische Geräte. Hardware-Kosten schließen Entwicklung, Konstruktion, Tests, Inbetriebnahme und Produktion mit ein.

Auf dem Markt sind verschiedene Software-Systeme verfügbar, die eine Kostenkalkulation von Hardware unterstützen. Dazu zählen beispielsweise:

- PRICE-H (Fa. Price Systems LLC) und
- SEER (Fa. Galorath)

Das an der TU München entwickelte System XKIS [REISCHL 2001] unterstützt die Vorkalkulation von Einzelteilen und die Optimierung von deren Gestalt.

Das Software-System XKIS soll im Weiteren genauer erläutert werden. Ein Vorteil dieses Rechnerwerkzeuges im Vergleich zu der manuellen Kostenkalkulation ist die Möglichkeit der automatischen Überprüfung der Produzierbarkeit des Werkstückes mit Hilfe der vorhandenen Ressourcen. Die Produktgestalt kann optimiert werden, während die Kosten für Entwicklung und Arbeitsvorbereitung, ebenso wie die Entwicklungszeit, reduziert werden können. Verschiedene Fertigungsmethoden können mit ihren mannigfaltigen Gestaltungsparametern simuliert werden. Letztendlich reduziert das Software-System die Produktkosten und die Gemeinkosten durch ein variables Management von Bearbeitung und Gestaltung.

Für rein mechanische Produkte ist XKIS also eine umfassende Software zur Integration der Kostenrechnung in die Entwicklung. Allerdings fehlt bei diesem Werkzeug die Möglichkeit, Kosten für die Software-Komponenten bzw. die Software-Entwicklung zu berechnen. Hierfür wurden verschiedene Kalkulations-Modelle in der Software-Entwicklung erarbeitet, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

2.7.2 Abschätzung von Software-Kosten

Kostenschätzung für Software bedeutet, den Umfang des Aufwands für die Erstellung einer Software vorherzusagen. Da Software in den letzten Jahren sowohl an inhaltlichem Umfang als auch an Bedeutung gewonnen hat, hat auch die Komplexität des mechatronischen Gesamtsystems zugenommen. Die hohe Komplexität erschwert eine genaue Vorhersage der Kosten für die Software-Entwicklung.

[CHULANI 1998] beschreibt die verschiedenen Ansätze, die seit 1970 im Bereich des Software-Engineerings für die Kostenschätzung entwickelt wurden. Dabei unterscheidet er verschiedene Klassen, Modelle und Techniken wie folgt:

- Parametrisches Modell
- Kompetenzbasierte Techniken
- Lernorientierte Techniken
- Dynamikbezogene Modelle

- Regressionsbezogene Modelle
- Kombinierte Techniken für die Integration kompetenzbezogener Modelle

Diese Software-Engineering-Kosten-Modelle und Schätzungstechniken werden laut [CHULANI 1998] für folgende Aufgaben verwendet:

Budgetierung:

Die Budgetierung ist die primäre, aber nicht die einzig relevante Aufgabe, die durch die Schätzungstechniken umgesetzt wird. Eine hohe Genauigkeit bei der Gesamtkostenschätzung stellt hierbei die wichtigste Eigenschaft des angewandten Kosten-Modells dar.

Ausgleichs- und Risikoanalyse:

Diese wichtige Funktion der Schätzungstechnik beleuchtet die Zeit- und Kostenabhängigkeiten von Software-Projekt-Entscheidungen (Stellenbesetzung, Dimensionierung, Werkzeuge, Wiederverwendung, etc.).

Projektplanung und Controlling:

Eine weitere wichtige Eigenschaft einer Kostenkalkulationssoftware ist die Bereitstellung einer Kosten- und Zeitbedarfsaufschlüsselung nach Komponenten, Aktivitäten oder Phasen.

Kosten-Nutzen-Betrachtung:

Eine Abschätzung der entstehenden Kosten im Vergleich zu den zu erwartenden Nutzen durch die Weiterentwicklung der Software gehört ebenfalls zu einer Kostenschätzung für Software-Projekte.

In den späten 70er Jahren wurden einige robustere Modelle, wie z. B. SLIM [PUTNAM UND MYERS 1992], Checkpoint [JONES 1991], PRICE-S [PARK 1988], SEER [JENSEN 1983] oder COCOMO [BOEHM 1981] entwickelt. Unter den entstandenen Modellen setzte sich in den 80er Jahren COCOMO (Constructive Cost Modell) mit einem Kosten- und Zeitschätzungsmodell als parametrische Kostenschätzungssoftware durch.

COCOMO wurde aus den Daten vieler Projekte bei TRW, einer Consulting-Firma in Kalifornien, hergeleitet [BOEHM 1981, FENTON 1998]. COCOMO ist ein Modell, das auf den Eingaben zu der Größe des Software-Systems und einer Anzahl von anderen Kostentreibern, die die Produktivität beeinflussen, basiert. Ursprünglich wurde COCOMO 1981 erstmals publiziert [BOEHM 1981]. Eine

überarbeitete Version (COCOMO II) war Auslöser für einige Neuerungen in der Software-Engineering-Technologie [FENTON 1998].

Das ursprüngliche COCOMO ist eine Zusammenfassung von drei Modellen: ein Basis-Modell, das sehr früh im Projekt eingerichtet wird, ein fortgeschrittenes Modell, das aufgebaut wird, nachdem die Anforderungen spezifiziert sind und ein ausgereiftes Modell, das Gültigkeit hat, nachdem die Konzeption abgeschlossen ist.

Alle drei Modelle beruhen auf der Formel:

$$E = a \cdot S^{b \cdot EAF}$$

Mit: E = Aufwand in Mannmonaten

S = Größe, gemessen in tausend Zeilen Code (KLOC = kilo of lines of code)

EAF = Aufwands-Ausgleichsfaktor (Effort Adjustment Factor)

Die Parameter a und b sind abhängig von der Entwicklungsart. [BOEHM81] hat drei Entwicklungsarten definiert:

- Organisches Vorgehen – bei relativ einfachen Projekten, in denen ein kleines Team basierend auf einem Satz unformaler Anforderungen arbeitet.
- Halb-abgelöstes Vorgehen – bei einem mittleren Projekt, in dem gemischte Teams eine gewisse Menge an starren und weniger starren Anforderungen umsetzen müssen.
- Integriertes Vorgehen – bei einem Projekt, das innerhalb einer strikt vorgegebenen Menge von Rahmenbedingungen durchgeführt werden muss.

Das Basis-Modell von COCOMO berechnet den Aufwand als eine Funktion der Programmgröße [PRESSMAN 2001]. Die Gleichung für das Basis-Modell ist also:

$$E = a \cdot S [KLOC]^b$$

Dies bedeutet, dass der Aufwands-Ausgleichsfaktor im Basis-Modell gleich 1 ist. Die Parameter a und b für dieses Basis-Modell aus COCOMO sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Entwicklungsart	a	b
organisch	2.4	1.05
halb-abgelöst	3.0	1.12
integriert	3.6	1.20

Tabelle 1: Werte für das COCOMO-Basis-Modell

Das fortgeschrittene Modell von COCOMO berechnet den Aufwand als Funktion der Programmgröße und einer Anzahl von Kostentreibern [PRESSMAN 2001]. In diesem Fall wird ein Wert für den Aufwands-Ausgleichfaktor berechnet.

Die Faktoren a und b für das fortgeschrittene COCOMO-Modell sind in der anschließenden Tabelle dargestellt:

Entwicklungsart	a	b
Organisch	3.2	1.05
halb-abgelöst	3.0	1.12
Integriert	2.8	1.20

Tabelle 2: Werte für das fortgeschrittene COCOMO Modell

Der Aufwands-Ausgleichsfaktor (EAF) wird aus 15 verschiedenen Kostentreibern berechnet. Die Kostentreiber sind in vier Kategorien aufgeteilt: Produkt, Rechner, Personal und Projekt. Jeder Kostentreiber wird auf einer Skala mit sechs Abstufungen hinsichtlich seiner Bedeutung gewichtet (von sehr niedrig bis besonders hoch). Basierend auf dieser Bewertung wird mit Hilfe der Werte aus der folgenden Tabelle der Aufwands-Ausgleichsfaktor als Produkt aller Einzelwerte errechnet.

Das ausgereifte COCOMO-Modell schließlich berechnet den Aufwand für ein Software-Projekt als eine Funktion der Programm-Größe und einer Anzahl von Kostentreibern, die allerdings gewichtet werden. Die Gewichtung ist abhängig von der Phase des Lebenszyklus, in dem sich eine Software befindet. Das ausgereifte Modell verwendet das fortgeschrittene Modell auf der Komponenten-Ebene und verknüpft es mit einem Phasen-abhängigen Ansatz, um die Schätzung zu konsolidieren [FENTON 1998].

Die vier Phasen, die in dem ausgereiften COCOMO-Modell verwendet werden, sind:

- Anforderungen, Planung und Produkt-Konzeption (RPD = requirements planning and product design),
- Feinplanung (DD = detailed design),
- Code- und Element-Test (CUT = code and unit test) und
- Integration und Test (IT = integration and test).

Die anschließende Tabelle zeigt am Beispiel der „Analytischen Fähigkeiten“, wie für jeden Kostentreiber abhängig von jeder Phase die Werte variieren.

Kostentreiber	Bewertung	RPD	DD	CUT	IT
ACAP	Sehr niedrig	1.80	1.35	1.35	1.50
	niedrig	0.85	0.85	0.85	1.20
	nominell	1.00	1.00	1.00	1.00
	hoch	0.70	0.90	0.90	0.85
	Sehr hoch	0.55	0.75	0.75	0.70

Tabelle 3: Werte aus dem ausgereiften COCOMO-Modell

Die Schätzungen für jedes einzelne Software-Modul werden entsprechend der Software-Subsystemen miteinander kombiniert und ergeben so eine ungefähre Schätzung der Gesamtkosten. Durch die Nutzung der detaillierten Kostentreiber ist ein Schätzung für jede Phase des Lebenszyklus festgelegt.

COCOMO II wurde erstmals in [BOEHM ET AL. 1995] beschrieben. Es enthält zusätzlich zu den vorgestellten Inhalten ein „Umsetzungs-Konfigurations-Modell“ für die frühen Aufwände bei der Prototypen-Generierung. Außerdem wurde je ein Modell für die frühe Design-Phase und die Post-Modellierung – für die anschließenden Phasen des im COCOMO I definierten Lebenszyklus – erstellt.

Bislang ist lediglich das letzte, am weitesten detaillierte Submodell „Post-Modellierung“ in einer abgeglichenen Software umgesetzt worden (vgl. [CSE 2005]).

2.8 Systemtheorie

Die Systemtheorie ist ein Erkenntnismodell, in dem Systeme zur Beschreibung und Erklärung unterschiedlich komplexer Phänomene herangezogen werden. Die Analyse von *Funktionen* und *Strukturen* soll die Vorhersage über das Systemverhalten erlauben [IGENBERGS 1997 und WIKIPEDIA 2006] .

In der Systemtheorie werden mathematische Beschreibungen, so genannte Systemmodelle, aufgestellt. Da Systeme aus unterschiedlichen Bereichen - beispielsweise mechanische, elektrische oder chemische Systeme - oft denselben Gesetzmäßigkeiten unterliegen, kann die Systemtheorie breit verwendet werden und hat deshalb einen umfassenden, abstrakten Charakter.

Nach [WENZEL 2005] wurden in den Anfängen der Systemtheorie vor allem die Begriffe *Struktur* und *Funktion* als grundlegend erachtet. Da diese beiden Begriffe auch wesentliche Bestandteile dieser Arbeit sind, werden in diesem Abschnitt kurz die Grundzüge der Systemtheorie dargelegt.

Als *Strukturen* werden die Regelmäßigkeiten bezeichnet, die sich innerhalb eines Systems herausbilden und diesem eine gewisse Stabilität ermöglichen. *Funktion* ist der Beitrag der Elemente zur Erhaltung des Systems. Was nicht zum System gehört, ist die Umwelt des Systems. Diese muss zwangsläufig komplexer sein als das System selbst, da sie dieses begrenzt.

Der Begriff *Struktur* hat in der Systemtheorie mittlerweile keine vorrangige Bedeutung mehr, da auch Strukturen der Veränderung unterliegen, obwohl sie ja gerade die Stabilität erklären sollen. Deshalb kann immer nur dann sinnvoll von Strukturen gesprochen werden, wenn der Faktor Zeit vernachlässigt wird. Strukturen stellen somit nur eine relative Stabilität dar [WENZEL 2005].

Im normalen Sprachgebrauch werden bestimmte reale, meist mehr oder weniger komplexe Gebilde als System bezeichnet: Sonnensystem, Waffensystem, periodisches System der Element, etc. Diese Beispiele weisen eine wichtige Gemeinsamkeit auf. Es handelt sich jeweils um verschiedene Teile (Elemente), die zueinander in Beziehung stehen. Dies kann auch als Konnektivität bezeichnet werden.

[DAENZER ET AL. 1976, S. 11 ff.] verstehen unter einem *System* die Gesamtheit von Elementen, die miteinander durch Beziehungen verbunden sind. Diese sehr allgemeine Auffassung ermöglicht es, sehr viele Erscheinungen unter dem Systemgesichtspunkt zu betrachten.

Es ist zweckmäßig, sich beim Systembegriff von jeglicher materieller Ausprägung zu lösen und nur die formale graphentheoretische Abbildung vor Augen zu haben. Die Elemente werden durch Kreise (Knoten) dargestellt. Bestehende Beziehungen zwischen den Elementen werden durch Verbindungslinien (Kanten) zum Ausdruck gebracht. Das abstrakte Aufbaumuster der Elemente, welches durch die Beziehungen gebildet wird, entspricht der Struktur des Systems.

Im Bereich der Systemtechnik bestehen *Systeme* aus ihren Elementen / Komponenten und den Relationen zwischen ihnen [PATZAK 1982].

Zu dem hierarchischen Aufbau von Systemen führt [DAENZER ET AL. 1976, S. 16 ff.] aus, dass jede abgrenzbare Gesamtheit von Elementen und deren Beziehungen als System bezeichnet werden kann und es deshalb auch möglich ist, ein Element als System aufzufassen, wenn es sich als zweckmäßig und notwendig erweist und wenn es gelingt, dieses selbst wiederum in Elemente zu unterteilen. Dieses neue System wird – im Verhältnis zum vorher betrachteten System – als Untersystem (Subsystem) bezeichnet. Die Auflösung über mehrere Stufen ist im Grunde genommen beliebig weit durchführbar und hängt allein von der Zweckmäßigkeit ab. Damit wird der Begriff des Systems relativiert [DAENZER ET AL. 1976].

2.9 Zusammenfassung

In den verschiedenen Fachdisziplinen Mechanik, Elektronik und Informatik der Mechatronik existieren für das Anforderungsmanagement, die Konstruktion, die Kostenschätzung sowie den Entwicklungsprozess bereits Methoden und Rechnerwerkzeuge. Diese sind allerdings bislang nur für jeweils einen dieser Fachbereiche bestmöglich ausgelegt und lassen keine interdisziplinäre Verknüpfung zu.

In der Beschreibung des mechatronischen Entwicklungsprozesses bleibt die Anforderungsspezifikation und Handhabung bislang unberücksichtigt. Die Systemtheorie stellt einen interdisziplinären Ansatz für die einheitliche Beschreibung komplexer Zusammenhänge dar.

Ziel dieser Arbeit ist die Verbesserung der mechatronischen Entwicklung von Produktionssystemen durch ein integriertes Vorgehen zur Erfassung und Strukturierung von Anforderungen im Entwicklungsprozess.

Durch diese konsequente Integration der Anforderungen in die Entwicklung kann beispielsweise die Kostenschätzung bereits zu einem früheren Zeitpunkt als bislang auf einer fundierten Basis durchgeführt werden. Die Vorteile einer frühzeitigen Kostenabschätzung in der Angebotsphase sowie während der Entwicklung gegenüber einer ausschließlichen Projektnachkalkulation am Ende einer Entwicklung bestehen für ein Unternehmen aus folgenden Aspekten:

- schnellere Entwicklung wegen früher Kostenrückmeldung,
- Aufzeigen von Kosteneinflüssen der Konstruktionsalternativen,
- Kalkulation sowohl hinsichtlich der Produktstruktur als auch hinsichtlich der Marktanforderungen,
- hohe Zuverlässigkeit früherer Kostenvorhersagen,
- Möglichkeit, während der Verhandlung den geringsten Angebotspreis zu ermitteln.

Das in dieser Arbeit beschriebene Vorgehen zur kontinuierlichen Anforderungshandhabung für mechatronische Produktionssysteme stellt die Basis für eine kunden- und qualitätsorientierte Entwicklung und Fertigung dieser Systeme dar. Das integrierte Vorgehen berücksichtigt die Bedürfnisse aller beteiligten Fachdisziplinen und erleichtert die Kommunikation im Projekt.

3 Vorgehen zur kontinuierlichen Anforderungshandhabung

3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird ein Vorgehen beschrieben, das es einem Unternehmen der Produktionsanlagen-Industrie ermöglicht, die Kundenanforderungen so aufzunehmen und aufzubereiten, dass deren kontinuierliche Verwendung im Entwicklungsprozess möglich ist. Dabei wird absichtlich von Anfang an nicht in verschiedenen Fachbereichen, sondern mechatronisch gearbeitet. Die einzelnen dafür notwendigen Schritte werden hier in chronologischer Reihenfolge dargestellt. Abbildung 17 veranschaulicht grafisch die inhaltliche Gliederung dieses Kapitels.

Die entwickelte Methode besteht aus den drei Phasen:

- **Planung** der Anforderungserfassung,
- **Beschreibung** der Anforderungen und
- **Nutzung** der Anforderungen in der Entwicklung.

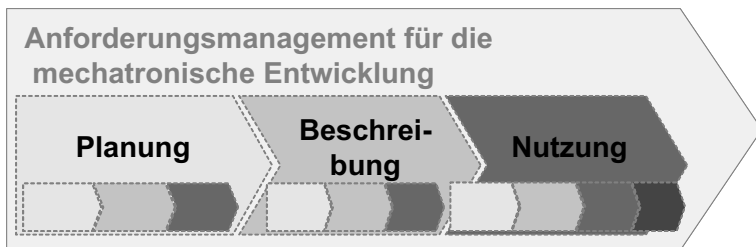


Abbildung 17: Drei Phasen der ganzheitlichen Anforderungshandhabung

Die wichtigste und umfangreichste Phase ist die Planung bzw. Vorbereitung. In dieser Phase wird das mechatronische Gesamtsystem modular, hierarchisch gegliedert und die einzelnen Module miteinander verknüpft. Inhalt der zweiten Phase ist eine lösungsneutrale, eindeutige Beschreibung der Anforderungen an das zu entwickelnde System. In der dritten Phase werden die absichtlich nicht in Fachbereichen strukturierten Anforderungen durch die vom Projektmanagement definierten Rollen und Prozesse in der technischen Entwicklung genutzt.

3.2 Phase 1: Planung der Anforderungserfassung

3.2.1 Vorbereitungen für die Integration der kontinuierlichen Anforderungshandhabung

In diesem Abschnitt wird ein Vorgehen beschrieben, das die Aufnahme von Anforderungen für mechatronische Produktionssysteme und deren Integration in den Entwicklungsprozess erleichtert. Wie in Abbildung 18 dargestellt, wird dabei ausgehend von einer Analyse bereits gefertigter Anlagen eine Strukturierung erstellt, die sich an den wesentlichen Komponenten eines solchen Systems orientiert. Die einzelnen Bauteile und Funktionalitäten werden modular gegliedert und durch definierte Schnittstellen miteinander in der Struktur verknüpft. Schließlich wird die so entstandene Vorlage vom Vertrieb bei den ersten Kundenverhandlungen für eine strukturierte Aufnahme der Anforderungen genutzt und somit in den Entwicklungsprozess integriert. Durch diesen festgelegten Prozess werden die so aufgenommenen mechatronischen Anforderungen in den einzelnen Entwicklungsabteilungen durchgängig genutzt.

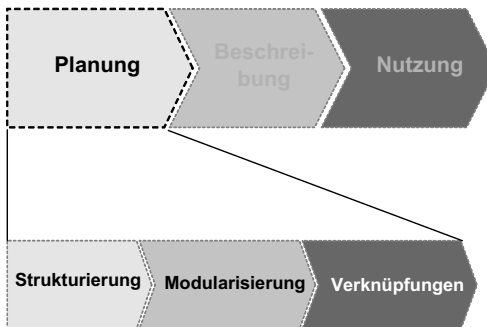


Abbildung 18: Untergliederung der ersten Phase der ganzheitlichen Anforderungshandhabung

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, bestehen bei Herstellern von Produktionsanlagen im Bereich der Mechanik bereits ausgefeilte Baukasten-Lösungen für die Konfiguration einer neuen Maschine. Bei der kundenspezifischen Entwicklung einer neuen Anlage werden häufig ähnliche Entwicklungsprojekte als Referenz herangezogen. Werden nun die Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten nicht erst während der Entwicklung genutzt, sondern bereits vor Projektbeginn

für die Erstellung einer Anlagenstruktur herangezogen, kann daraus eine System-Struktur entstehen, die

- modular aufgebaut ist,
- alle wesentlichen Subsysteme enthält,
- einen einfachen Überblick schafft,
- interne Verknüpfungen enthält und
- für die Aufnahme der Anforderungen genutzt werden kann.

Um die so entstandene Struktur für den Zweck des mechatronischen Anforderungsmanagements einsetzen zu können, ist es wichtig, dass die einzelnen Informationen in dieser Struktur modular – also mit wohl definierten Schnittstellen – versehen sind.

Werden die Anforderungen an ein zu entwickelndes System mit Hilfe der bislang vorhandenen Methoden (vgl. Abschnitt 2.2.1) aufgenommen und in ein Anforderungsmanagement-System übertragen, besteht das Risiko des Datenverlustes bzw. der Fehlinterpretation.

Für die gezielte Aufnahme von Anforderungen, die in den Entwicklungsprozess integriert werden sollen, ist es notwendig, eine geeignete Planung voran zu setzen. Inhalt dieser Planung muss zum einen die Berücksichtigung der verschiedenen Fachbereiche in der Entwicklung und zum anderen aber auch die Sicherstellung einer weitestgehenden Vollständigkeit der aufgenommenen Anforderungen sein.

Die Vorteile einer strukturierten Abfrage bzw. Aufnahme von Anforderungen soll in Abbildung 19 durch eine einfache Mengendarstellung verdeutlicht werden. Die Menge aller für die Entwicklung eines Systems relevanten Anforderungen wird durch das große, dunkle Quadrat gekennzeichnet, die kleinen helleren Quadrate stellen einzelne Fragen bzw. Informationsbausteine dar. Werden nun die kleinen Quadrate ohne festgelegte Strukturierung in dem Bereich der Gesamtmenge verteilt, ergeben sich nicht nur Überschneidungen zwischen den einzelnen Fragmenten, sondern diese können auch über die Grenzen der vorgegebenen Gesamtmenge hinaus gehen. Zudem wird die Gesamtmenge nur zu einem gewissen Teil abgedeckt.

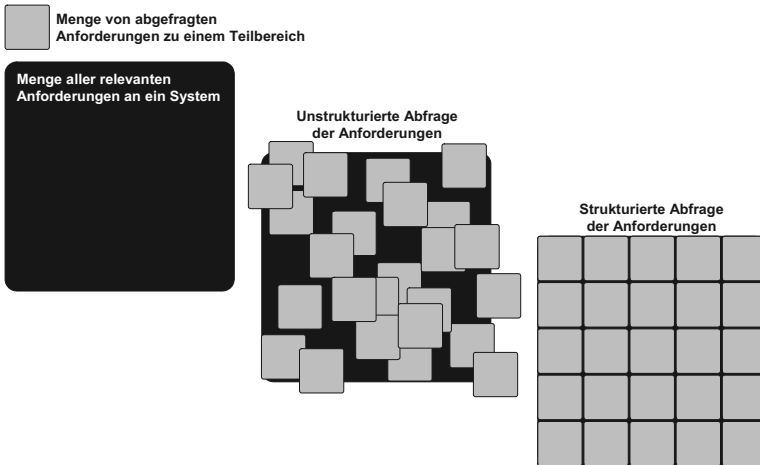


Abbildung 19: Mengendarstellung der unstrukturierten und der strukturierten Aufnahme von Anforderungen

Dies würde für die Aufnahme und Darstellung von Anforderungen bedeuten, dass zum einen die gleichen Anforderungen in verschiedenen Zusammenhängen abgefragt würden und zum anderen Anforderungen abgefragt würden, die für die Entwicklung des Systems nicht relevant sind. Eine vollständige Erfassung aller relevanten Anforderungen kann außerdem selbst durch eine deutliche Erhöhung der einzelnen Abfragen nicht sichergestellt werden.

Im Gegensatz dazu stellt sich die strukturierte Aufnahme der Anforderungen als wesentlich effizienter dar. Die Analogie in der Mengendarstellung zeigt, dass die gesamte Menge der relevanten Anforderungen ohne Überschneidungen innerhalb der Teilmengen und ohne Beschreibung nicht relevanter Anforderungen abgedeckt wird.

Diese Darstellung soll veranschaulichen, welchen enormen Vorteil eine frühzeitige Strukturierung des Systems und damit der Anforderungsaufnahme bringt.

3.2.2 Strukturierung des Gesamtsystems

Da im Bereich der Produktionsanlagen stets auf Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten zurückgegriffen werden kann, werden diese Informationen für eine Strukturierung der neu aufzunehmenden Informationen genutzt. Die so entstehende Struktur dient als Vorlage für die Aufnahme der Anforderungen im Kundengespräch.

Durch die Abbildung der gesamten Anlage in einer ganzheitlichen Struktur kann diese Vorlage auch als Checkliste für die Vollständigkeit der aufgenommenen Anforderungen fungieren. Bereiche, die zwar in der Struktur vorgesehen sind, allerdings keine Spezifikation durch den Kunden enthalten, werden offensichtlich und können schnell und einfach im Kundengespräch ergänzt werden (vgl. Abbildung 20).

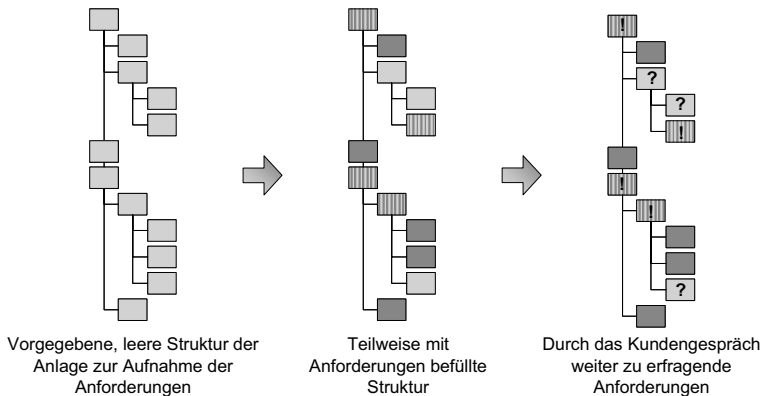


Abbildung 20: Kennzeichnung bereits befüllter und noch weiter zu detaillierender Subsysteme der Systemstruktur für die Aufnahme der Anforderungen

Zudem wird dem Kunden die Darlegung seiner Anforderungen erleichtert, da er sich bereits in dem Gespräch an einer vorhandenen Struktur orientieren kann.

Dabei kann das Gesamtsystem „mechatronische Produktionsanlage“ gemäß der in Abschnitt 2.8 dargestellten Systemtheorie (vgl. [DAENZER ET AL. 1976]) auf

verschiedene Arten in Subsysteme zerlegt werden. Die unterschiedlichen möglichen Ansätze zur hierarchischen Gliederung eines Produktionssystems werden in den nächsten Abschnitten erläutert.

3.2.2.1 Orientierung an Baugruppen

Laut [VDI 2206] orientieren sich vor allen Dingen die Ingenieure des klassischen Maschinenbaus bzw. der Mechanik an Strukturen. Betrachtet man die drei wesentlichen Fachgebiete der Mechatronik, wird auch hier ersichtlich, dass eben der mechanische Aufbau aus mechanisch, physikalischen Baugruppen, besonders für die zunächst mechanische Konstruktion intuitiv als Strukturierung dient.

Wird also der baugruppenorientierte Ansatz zur Generierung von Subsystemen für das Gesamtsystem „mechatronisches Produktionssystem“ verwendet, so wird dieses zunächst in die wesentlichen, geometrisch physikalisch leicht voneinander abgrenzbaren Baugruppen untergliedert. Diese Strukturierung ist im Werkzeugmaschinenbau üblich, da bei jeder neu zu entwickelnden Anlage so weit als möglich auf Baugruppen von bereits gefertigten und in Betrieb genommenen Anlagen bzw. einfachen Variationen davon, zurückgegriffen wird.

Am Beispiel der Werkzeugmaschine wären dies für eine systemtechnische Strukturierung zunächst die Baugruppen

- Gestell,
- Ständer,
- Bett,
- Tisch und, je nach Aufgabenstellung, auch das
- Werkzeugmagazin.

Um diese auf oberster hierarchischer Ebene gelegenen Subsysteme weiter zu untergliedern, werden wiederum die jeweils zugehörigen Hauptbaugruppen unterschieden. Abbildung 21 zeigt eine derartige weitere Gliederung.

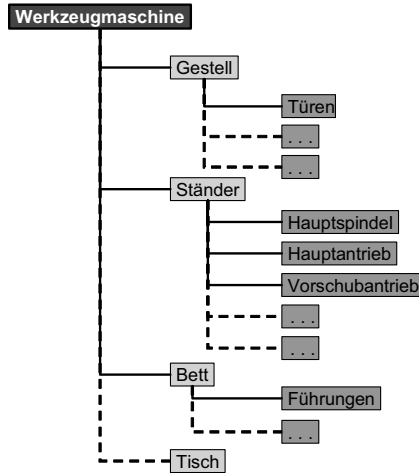


Abbildung 21: Strukturierung einer Werkzeugmaschine nach mechanischen Bau-
gruppen

Bereits auf dieser Ebene kann sich zeigen, dass nicht alle Subsysteme eine identische Hierarchisierungstiefe aufweisen, bzw. dass diese eine unterschiedliche Anzahl an Gliederungspunkten enthalten. So lässt sich in dem genannten Beispiel der Werkzeugmaschine beispielsweise das Subsystem *Bett* intuitiv in weniger mechanisch gekoppelte Subsysteme zerlegen als das Subsystem *Ständer*. Letztergenanntes enthält beispielsweise sämtliche Spindeln, deren zugehörige Antriebe sowie die notwendigen Führungen.

Um das gesamte System abzubilden, müssen für diesen Strukturierungsansatz alle Subsysteme soweit untergliedert werden, bis eine detaillierte Darstellung einer einzelnen mechanisch, geometrisch beschreibbaren Komponente als letzte Ebene vorliegt. Da ein mechatronisches Produktionssystem stets aus Elementen aller drei für die Mechatronik relevanten Fachgebieten besteht, müssen spätestens auf dieser untersten Ebene auch Komponenten aus der Elektrotechnik oder der Informationstechnik spezifiziert werden. Abbildung 22 stellt verkürzt ein derartiges „Ende“ einer Bauteil-orientierten Strukturierung dar, wobei die primär elektrotechnisch relevanten Komponenten *kursiv* gekennzeichnet sind.

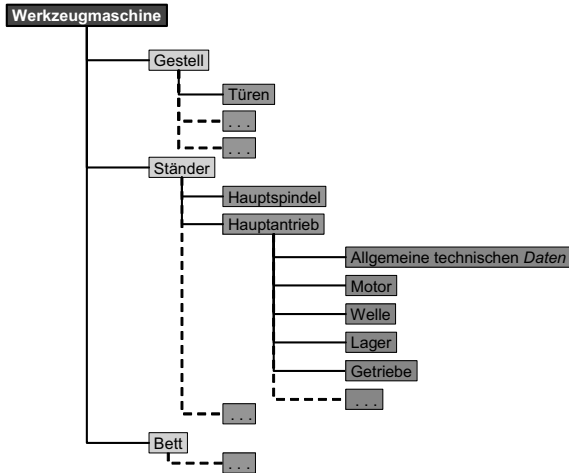


Abbildung 22: Komponenten mit elektronischen Eigenschaften bei der Strukturierung nach Bauteilen

Für die Aufnahme der Anforderungen von beispielsweise mechanischen Komponenten können dann noch abhängig von der Art dieser Komponente die zu definierenden Eigenschaften, also sowohl Geometrie als auch evtl. Material, Belastbarkeit, Lebensdauer oder Oberflächengüte, bereits als Abfragepunkte in dem auf dieser untersten Ebene anzuordnenden Modul (vgl. nachfolgende Abschnitt 3.2.3) festgehalten werden.

Für die Kostenschätzung können die jeweiligen Kosten direkt den einzelnen Baugruppen zugeordnet werden.

3.2.2.2 Orientierung an Funktionen

Speziell für die Aufnahmen von Kundenanforderungen ist eine funktionale Strukturierung des Systems von Vorteil. Der Kunde hat meist eine klare Vorstellung davon, was das System können soll und muss. Zu diesen Fakten kann er in einem gemeinsamen Gespräch sehr schnell Aussagen treffen.

Die vorgegebene Struktur erlaubt es dem Vertriebsmitarbeiter bei einem derartigen Interview systematisch die notwendigen Informationen abzufragen. Durch die vorgegebene Strukturierung des Gesamtsystems gelingt es dem Vertrieb bereits bei dem Kundengespräch, die Teile des Systems zu identifizieren, die einer weiteren Detaillierung bedürfen oder aber vom Kunden absichtlich nicht näher

spezifiziert werden. Dabei ist es für den Vertragsabschluss wichtig, auch explizit diejenigen Punkte festzuhalten, die abgefragt und vom Kunden nicht näher spezifiziert wurden, da hier andernfalls im Verlauf des Projektes Anforderungen seitens des Kunden auftreten können, die technisch oder wirtschaftlich nur sehr schwer zu erfüllen sind.

Bei dieser Strukturierung wird also zunächst in Haupt- und Nebenfunktionen unterteilt, wobei für die weitere Hierarchisierung jede der identifizierten Funktionen wiederum in Haupt- und Nebenfunktionen unterteilt werden kann. Wichtig ist hierbei, dass die einzelnen auf einer Hierarchieebene stehenden Funktionen eindeutig voneinander zu trennen sind. Funktionen, die eine beschriebene Haupt- oder Nebenfunktion unterstützen, finden sich bei der Gliederung in der nächsten Hierarchieebene wieder.

Um das hierarchische Strukturierungsvorgehen anhand von Funktionen zu erläutern, wird wiederum das Beispiel der Werkzeugmaschine bemüht. Hauptfunktion auf oberster Ebene einer solchen Anlage ist die „Bearbeitung eines Werkstücks“. Die Erfüllung dieser Funktion wird durch die Nebenfunktionen „Späneabfuhr“, „Werkzeugwechsel“ oder „Werkstück einspannen“ nicht direkt beeinflusst. Selbstverständlich kann eine nicht vorhandene Späneabfuhr nach einigen Bearbeitungsgängen zu Problemen bei der Werkstückbearbeitung führen, die Funktion „Späne abführen“ beeinflusst die Bearbeitung selbst jedoch nicht.

Die Hauptfunktion der Bearbeitung des Werkstücks lässt sich nun wiederum in verschiedene notwendige Funktionen unterteilen. Die „Realisierung der Schnittbewegung“ ist auf dieser nächsten hierarchischen Ebene eine Hauptfunktion, während die „Positionierung des Werkzeugs“ bzw. die „Positionierung des Werkstücks“ wiederum nicht zur definierten Hauptfunktion beitragende Nebenfunktionen sind. Abbildung 23 stellt dieses Beispiel grafisch dar.

Für die meist aus der mechanischen Konstruktion stammenden Vertriebsmitarbeiter bietet diese Art der Strukturierung nicht die selbe anschauliche Übersichtlichkeit wie die Strukturierung nach Baugruppen, erleichtert aber bei der Aufnahme der Kundenanforderungen die Fokussierung auf die tatsächlichen Kundenwünsche.

Die Kostenschätzung bei dieser Strukturierungsvariante muss sich an dem in Kapitel 2.6 vorgestellten Vorgehen zur Software-Kostenschätzung orientieren.

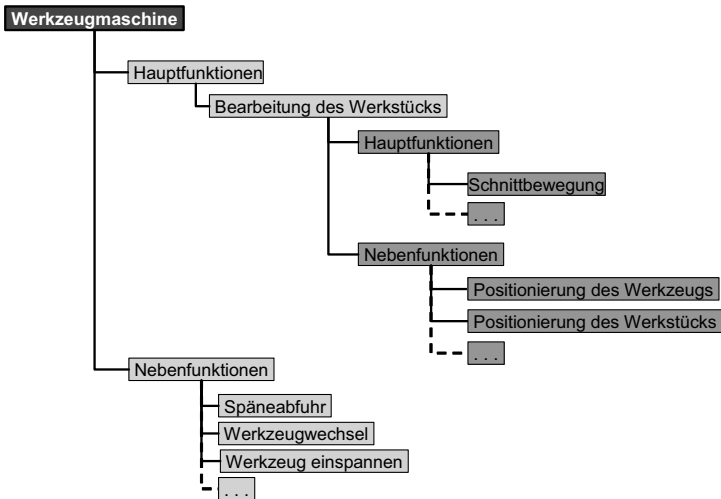


Abbildung 23: Funktionale Strukturierung einer Werkzeugmaschine

3.2.2.3 Mechatronische Struktur

Da Produktionssysteme heute stets mechatronischer Natur sind, kann diese Eigenschaft ebenfalls für den Ansatz einer Strukturierung genutzt werden. Dabei werden auf erster Ebene die drei Fachgebiete der Mechatronik, also die Mechanik, die Elektrotechnik und die Informationstechnik, unterschieden.

Die nächste Ebene lässt sich hingegen nicht analog zu der ersten Ebene gliedern. Die einzelnen Bereiche sind zwar miteinander verbunden, die Strukturierung soll aber dazu dienen, einzelne miteinander lediglich über definierte Schnittstellen gekoppelte Subsysteme zu generieren. Im Bereich der Mechanik sollen also ab der nächsten Ebene lediglich mechanische Komponenten bzw. die Anforderungen zu diesen festgehalten werden, wohingegen bei der Elektrotechnik die entsprechenden elektrotechnischen Informationen abgelegt werden. Gleiches gilt für den Bereich der Informationstechnik.

Für den Bereich der Mechanik ist eine Strukturierung auf zweiter Ebene anhand der mechanischen Baugruppen, wie in Abschnitt 3.2.2.1 dargestellt, sinnvoll. Für den Bereich der Elektrotechnik hingegen muss die Strukturierung auf zweiter Ebene nicht anhand mechanischer Baugruppen orientiert sein, sondern anhand

elektronisch relevanter Komponenten oder Funktionen. Die Strukturierung des Bereichs der Informationstechnik schließlich orientiert sich ab der zweiten Ebene anhand von Ablaufbeschreibungen, die ebenso wie die funktionale Struktur in weitestgehend unabhängige Haupt- und Nebenabläufe gegliedert sind.

Bei dieser Variante der Strukturierung ist eine Mischung aus der Bauteil bezogenen und der Aufwand bezogenen Kostenschätzung notwendig.

3.2.2.4 Beurteilung der Strukturierungsvorgehen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden verschiedene Methoden zur systematischen Strukturierung eines mechatronischen Produktionssystems vorgestellt. Das Strukturierungsvorgehen anhand von Bauteilen eignet sich dabei insbesondere für eine mechanisch-physikalisch geprägte Sicht auf das System und kann deshalb von Konstrukteuren und Kunden intuitiv verstanden werden. Für die Aufnahme von Kundenanforderungen, aber auch hinsichtlich einer eher elektro- und informationstechnisch geprägten Sicht, ist eine Strukturierung nach Funktionen besonders gut geeignet. Beide Strukturierungsvorgehen enthalten in verschiedenen Hierarchieebenen Informationen zu der jeweils anderen Sichtweise, da dies für ein mechatronisches System zwingend notwendig ist.

Die auf erster Ebene an den Fachgebieten der Mechatronik orientierte Struktur birgt sowohl für die Aufnahme der Kundenanforderungen als auch für eine intuitiv bedienbare Ablage der Informationen einige Schwächen, die nur dann in Kauf genommen werden sollten, wenn diese Art der Strukturierung aus zwingenden Randbedingungen notwendig ist.

Für eine übersichtliche und einfach bedienbare Strukturvorlage für das zu entwickelnde System ist darauf zu achten, dass

- die Zahl der Hierarchieebenen überschaubar (sieben plus/minus zwei) ist,
- die Zahl der jeweiligen Subsysteme unter einer Hierarchieebene ebenfalls möglichst kleiner oder gleich sieben ist,
- die Benennung der einzelnen Subsysteme möglichst kurz und intuitiv verständlich ist und
- die Schnittstellen zwischen einzelnen Subsystemen eindeutig in einem dieser Systeme eingeordnet und beschrieben sind.

3.2.3 Modularität der Anforderungsstrukturierung

Innerhalb der festgelegten Struktur müssen die Anforderungen in einzelnen, gegeneinander abgegrenzten Modulen festgehalten werden. Diese Module sind jeweils Inhalte der einzelnen Hierarchieebenen und können diesen direkt zugeordnet werden. In der Systemtheorie können Module also sowohl als übergeordnete Systeme als auch als sehr fein zergliederte Subsysteme verstanden werden.

Die modulare Darstellung von Anforderungen kommt dabei der objektorientierten Modellierung von Software entgegen. Allerdings führen nicht alle Anforderungsmodule in der Mechatronik, so wie die Use-Case-Diagramme der UML, direkt zum Programmcode. Vielmehr wird hierbei die flexible Erweiterbarkeit von einzelnen Modulen, da sie in sich abgeschlossene Systeme darstellen, genutzt.

3.2.3.1 Bestandteile des Anforderungsmoduls

Da die Module letztendlich die Bereiche sind, in denen die Anforderungen abgelegt werden, können dafür ganz allgemeine Regeln für die Inhalte aufgestellt werden.

Der prinzipielle Aufbau eines Moduls für die Aufnahme von Anforderungen ist in Abbildung 24 dargestellt. Dabei hat jedes Modul drei verschiedene Eigenschaftsbereiche.

- Zunächst enthält jedes Modul Informationen zur Einordnung. Diese Informationen beziehen sich primär auf die vorhandene Informationsstruktur. Jedes Modul enthält als eine wesentliche Eigenschaft die Information über seine hierarchische Zuordnung, also auf welcher Systemebene es, abhängig von der Strukturvorlage, prinzipiell angeordnet ist. Zudem ist durch die Einordnung des Moduls in die vorab erstellte Systemstruktur bereits eine thematische Zuordnung festgelegt, die ebenfalls als Information dem Modul angehört. Thematische Zuordnung heißt in diesem Fall, dass ausgehend von der Strukturierung des Gesamtsystems eine Zuordnung zu bestimmten inhaltlichen Subsystembereichen getroffen wird.
- Der zweite Eigenschaftsbereich enthält die tatsächlichen Anforderungsinformationen. Dabei wird unterschieden, ob es sich bei einer Anforderung um eine vom Kunden definierte Eigenschaft des Systems handelt, oder ob

die Anforderung sich aus daraus abgeleiteten Zwängen für das System ergibt. Diesem Bereich wird auch die Abschätzung der Kosten für die Realisierung der in diesem Modul definierten Anforderungen zugeordnet. Grafiken können in diesem Bereich die textuell beschriebenen Anforderungen ergänzen.

- In einem dritten Bereich sind ergänzende Informationen z. B. zur Historie der Anforderungen bzw. des Moduls enthalten. Dieser Bereich ermöglicht es, bei der Nutzung des Anforderungsmoduls aktuelle Änderungen, Verantwortlichkeiten, Umsetzungs- und Bearbeitungszustände oder auch aufgetretene Probleme schnell und auf die konkrete Anforderung bezogen nachzuvollziehen.

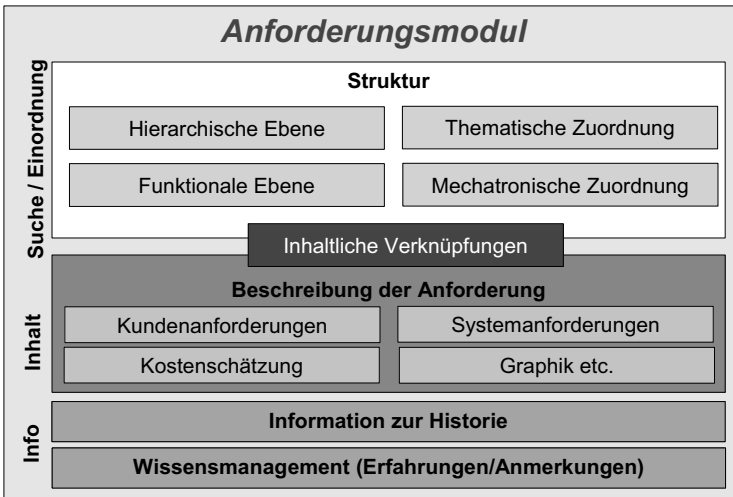


Abbildung 24: Allgemeine Inhalte eines Anforderungsmoduls

Eine Sonderstellung nehmen die inhaltlichen Verknüpfungen ein. Sie befinden sich, wie in der Zeichnung angedeutet, zwischen den beiden Bereichen *Struktur* und *Inhalt*. Diese Verknüpfungen sind ein für die weitere Nutzung der Informationen entscheidender Teil eines Anforderungsmoduls und werden in Abschnitt 3.2.4 detailliert erläutert.

3.2.3.2 Schnittstellen des Anforderungsmoduls

Die Schnittstellen eines Anforderungsmoduls sind auf Grund der systemtheoretischen Strukturierung zwischen verschiedenen Hierarchisierungsstufen eindeutig definiert. Über diese Schnittstellen wird der Bereich „Einordnung“ maßgeblich geprägt.

Die wichtigste zu definierende Schnittstelle des Moduls ist die Anknüpfung an das (Sub)System eine Hierarchieebene höher in der Struktur. Dabei kann die Form dieser Verbindung eine beliebige Ausprägung in einer der drei wesentlichen Elemente eines mechatronischen Systems aufweisen. Die Schnittstelle kann also entweder eine mechanische, eine elektrotechnische oder eine Software-technische Verbindung zwischen dem aktuellen Modul und dem Modul auf der darüber liegenden Hierarchieebene darstellen.

Ausprägungen einer solchen Verbindung könnten z. B. sein:

- Auf mechanischer Ebene:
Führungen, Lager, Wellen, Schraubverbindungen o. ä
- Auf elektrotechnischer Ebene:
Kabel, Sensoren, Aktoren, Widerstände o. ä.
- Auf Software-technischer Ebene:
Endlagen, Bewegungszustände, Bedienungseingaben o. ä.

Wichtig ist, dass diese Schnittstelle eindeutig dem Modul auf der nächst niedrigeren Ebene zugeordnet wird, damit in diesem Bereich keine Redundanzen in den festgehaltenen Informationen auftreten. Als Verknüpfung in dem hierarchisch darüber liegenden Modul ist ein Verweis bzw. die strukturelle Vorgabe ausreichend, da ja in den darunter liegenden Modulen die Schnittstellen exakt definiert werden.

Auch sollte die Schnittstelle stets genau einem Bereich der Mechatronik zuordenbar sein, also nie eine Kombination aus mehreren Fachgebieten abbilden. Anderenfalls ist es sinnvoll, die vorhandene Systemstruktur zur Anforderungsaufnahme so anzupassen, dass diese Bedingung erfüllt ist.

Schnittstellen zu Modulen auf gleicher hierarchischer Ebene innerhalb eines Subsystems sind ebenfalls dem Bereich „Einordnung“ zuzuordnen. Hinsichtlich der Eindeutigkeit der Zuordnung zu einem Modul gilt dasselbe, wie für die zuvor

beschriebenen Schnittstellen. Die mechatronische Ausprägung der Schnittstelle zwischen zwei Modulen auf ein und derselben hierarchischen Ebene kann hingegen durchaus mehrere Fachbereiche der Mechatronik beinhalten.

In jedem System, das nach einer wie in Abschnitt 3.2.2 dargelegten Strukturierung untergliedert ist, bestehen zwischen einzelnen Modulen auf unterschiedlichen hierarchischen, aber auch strukturellen Ebenen logische Zusammenhänge. Diese Zusammenhänge werden in Abschnitt 3.2.4 erläutert.

3.2.3.3 Zustände im Anforderungsmodul

Da die vorgegebene Strukturierung zur leichteren Überprüfbarkeit der Vollständigkeit der Anforderungen dienen soll, ist es notwendig, die Information, zu welchem Grad ein Anforderungsmodul bereits mit Kundeninformationen befüllt ist, darstellen zu können. Hierfür werden fünf unterschiedliche Zustände für jedes Modul definiert:

- unerwünscht,
- neu,
- angelegt,
- weiter zu ergänzen und
- vollständig.

Jedem dieser Zustände wird zur besseren Übersichtlichkeit für die Darstellung eine eigene Farbe zugeordnet, so dass allein anhand dieser Farbcodierung schnell und einfach die noch zu befüllenden Module identifiziert werden können.

Der Zustand „unerwünscht“ zeichnet sich dadurch aus, dass in dem strukturierten Kundengespräch vom Kunden ausdrücklich dieses Subsystem als nicht für das erwünschte System relevant bezeichnet wird. So kann für die weitere Entwicklung ebenfalls festgehalten werden, welche Subsysteme für den Kunden eine inakzeptable Ausprägung des Systems sind. Dies könnte beispielsweise bedeuten, dass die vorgegebene Strukturierung einer Werkzeugmaschine standardmäßig einen automatischen Werkzeugwechsler vorsieht, die spezielle Bearbeitungsaufgabe beim Kunden allerdings lediglich die Verwendung eines Werkzeugs beinhaltet und deshalb dieser in der Struktur vorgesehene Aspekt der Maschine ausgeschlossen werden kann.

Der Zustand „neu“ beschreibt ein vom Kunden grundsätzlich erwünschtes, aber bislang nicht weiter spezifiziertes Modul. Dieser Zustand stellt den Ausgangszustand aller in der Strukturvorlage vorhandenen Module dar. Das bedeutet, dass alle in der Struktur vorhandenen Module vor dem ersten Kundengespräch diesen Zustand haben. Erst durch eine Spezifizierung durch den Kunden wird dieser Zustand verändert. Bei einer Überarbeitung der Kundenanforderungen sind vor allen Dingen die so gekennzeichneten Module zu fokussieren, da hierzu noch keine Kundenangaben vorhanden sind.

Der Zustand „angelegt“ beschreibt ein von dem Kunden erwünschtes Subsystem der Anlage. Zu diesem System sind bereits Angaben von dem Kunden zur Verfügung gestellt worden, weshalb es nicht mehr den Zustand „neu“ hat, allerdings sind noch nicht alle für das Subsystem relevanten Anforderungen vom Kunden definiert worden. In dem strukturierten Interview mit dem Kunden muss ein mit „angelegt“ gekennzeichnetes Modul soweit konkretisiert werden, bis alle vom Kunden notwendigen Angaben zur Funktion bzw. zu den speziellen Ausführungswünschen spezifiziert sind.

Einem Modul, für das in einem Kundeninterview alle notwendigen Informationen abgefragt worden sind, wird der Zustand „weiter zu ergänzen“ zugeordnet. Bei den noch notwendigen Ergänzungen handelt es sich zum einen um eine interne Kostenschätzung für die Realisierung des angeforderten Moduls, zum anderen sind aus den Kundenanforderungen weitere eindeutig ableitbare Systemanforderungen zu definieren. Inhaltliche Verknüpfungen wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben müssen ebenfalls in diesem Zustand ergänzt werden.

Erst wenn alle für die komplette Beschreibung eines Moduls notwendigen Informationen abgelegt sind, wird dem Modul der Zustand „vollständig“ zugewiesen.

Hinsichtlich der farblichen Codierung empfiehlt es sich, dem allgemeinen Farbverständnis entsprechend vorzugehen. Also ist ein vollständig definiertes Modul grün zu kennzeichnen, ein neues Modul rot, die beiden Stufen dazwischen orange und gelb. Ein vom Kunden nicht erwünschtes Modul ist beispielsweise schwarz zu codieren.

3.2.4 Verknüpfungen zwischen Anforderungsinhalten

Über die vorab definierte Struktur hinaus, anhand derer die Kundenanforderungen evaluiert werden, können zwischen einzelnen Inhalten der Anforderungsspezifikation Zusammenhänge bestehen. Diese Zusammenhänge werden durch bidirektionale Verknüpfungen (vgl. Abbildung 24 in Kapitel 3.2.3.1) zwischen den jeweils betroffenen Informationen rechnerisch abgebildet. Am Beispiel einer Strukturierung für eine Werkzeugmaschine soll dies erläutert werden.

Während die Strukturierungsvorlage sich beispielsweise an Baugruppen orientiert und die Zusammenhänge zwischen diesen Subsystemen über die hierarchische Struktur offensichtlich sind und als solche auch im Einordnungsbereich des Anforderungsmoduls hinterlegt sind, bestehen zwischen Teilen der einzelnen Baugruppen funktionale Zusammenhänge. Um diese Zusammenhänge bereits bei der Aufnahme der Anforderungen abzubilden, müssen in den einzelnen Modulen diese Verknüpfungen bereits hinterlegt sein.

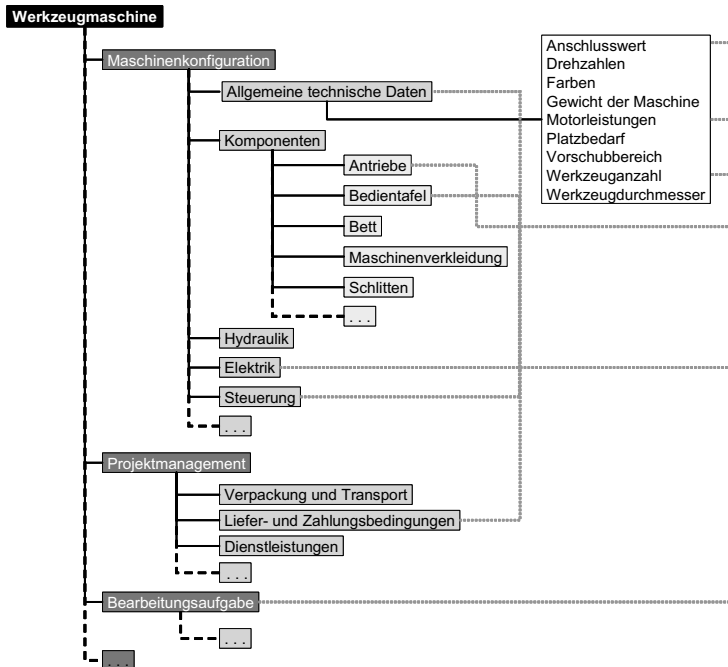


Abbildung 25: Abbildung funktionaler Zusammenhänge über die Bauteilorientierte Struktur hinaus

Abbildung 25 zeigt ausschnittsweise die nach einer organisatorischen Ebene zunächst an den Bauteilen orientierte Strukturierung einer Werkzeugmaschine. Dabei wird ein Strukturierungsast exemplarisch bis zur Ebene eines Moduls detailliert. Von den einzelnen in dem Modul enthaltenen Informationen werden dann die logisch bedingten Verknüpfungen, die über die vorgegebene Struktur hinaus gehen, gestrichelt dargestellt. Diese Verknüpfungen können bereits in der Phase der Vorbereitung aufgrund logisch offensichtlicher Zusammenhänge eingefügt werden.

3.2.5 Modulare hierarchische Strukturvorlage zur Aufnahme von Anforderungen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Vorgehensweisen zur systemtechnischen Strukturierung von Produktionssystemen, kombiniert mit der modularen Darstellung der einzelnen Subsysteme zur Anforderungsaufnahme, bilden den ersten, wesentlichen Schritt bei dem Vorgehen zur kontinuierlichen Anforderungshandhabung für mechatronische Produktionssysteme. Die besonderen Ausprägungen der Mechatronik werden sowohl bei der Strukturierung als auch bei der Definition der Schnittstellen zwischen einzelnen Modulen berücksichtigt.

Der in Abschnitt 3.2.3.2 vorgestellte Aufbau eines Moduls bildet alle wesentlichen Informationsbausteine und notwendigen Funktionalitäten für diese Strukturierung ab. Damit steht eine Vorlage für die einfache, strukturierte Erfassung von Anforderungen an mechatronische Produktionssysteme zur Verfügung.

3.3 Phase 2: Beschreibung der Anforderungen

3.3.1 Aufnahme und Darstellung der Anforderungen

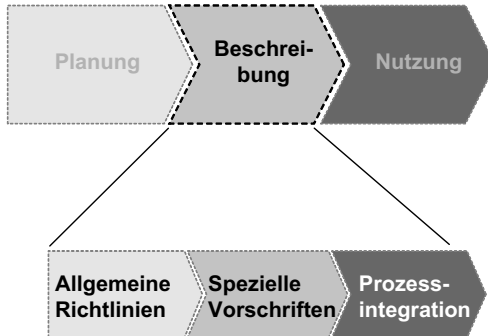


Abbildung 26: Gliederung der zweiten Phase der kontinuierlichen Anforderungshandhabung

In diesem Abschnitt wird die textuelle Beschreibung und Darstellung der aufzunehmenden Kundenanforderungen dargestellt. Zunächst werden allgemeine Richtlinien für das sinnvolle, textmäßige Formulieren von Anforderungen dargestellt. Aufbauend auf diesen allgemeinen Regeln wird das Vorgehen zur nachhaltigen Anforderungsformulierung für mechatronische Produktionssysteme erläutert und abschließend eine Integration dieses Vorgehens in den gesamten Anforderungsmanagement-Prozess vorgenommen. Abbildung 26 stellt die Untergliederung dieser Phase grafisch dar.

3.3.2 Allgemeine Richtlinien für die Formulierung von Anforderungen

Bezug nehmend auf [TELELOGIC 2002] ist es für die Beschreibung von Anforderungen entscheidend, dass diese

- korrekt (im Sinne von möglich, durchführbar, legal),
- abgeschlossen (als Satz),
- klar (eindeutig, nicht verwirrend),
- konsistent (untereinander nicht widersprüchlich),

- verifizierbar (überprüfbar),
- rückverfolgbar (eindeutig identifizierbar) und
- realisierbar (innerhalb der Zeit- und Kostengrenzen) sind.

Um diese Kriterien zu gewährleisten, ist es sinnvoll, gewisse Regeln für die Formulierung von Anforderungen einzuhalten. Jede einzelne Anforderung sollte als eigener Satz formuliert werden und nicht durch Konjunktionen mit einer weiteren Anforderung, die unter Umständen auch noch ganz unterschiedliche Verknüpfungen zu anderen Anforderungen erfordert, verbunden werden. Einschränkende Formulierungen sollten bei der Anforderungsbeschreibung vermieden werden. Sollte die Einschränkung eines Sachverhaltes notwendig sein, kann dies in einer eigenen verknüpften Anforderung geschehen. Für eine spätere eindeutige Verknüpfung ist es wichtig, dass in einer einzelnen formulierten Anforderung genau eine Information enthalten ist.

Beispiel zur Erläuterung:

Schlecht:

Der Wellendurchmesser soll 40 mm betragen, außer an der Einspannstelle.

Besser:

Auf einer Länge von 75 mm soll der Wellendurchmesser 40 mm betragen. An der 20 mm langen Einspannstelle soll der Wellendurchmesser 46 mm betragen.

Dieses Beispiel enthält auch einen weiteren wesentlichen Aspekt für eine gute Anforderungsformulierung. Die Angabe von konkreten Werten ist unerlässlich, um die Überprüfbarkeit, aber auch eine weitestgehend automatisierte Nutzung der Informationen sicherstellen zu können. Formulierungen, die Randbedingungen für das System beschreiben, ohne dabei konkrete Zahlenwerte zu nennen, können bereits während der Entwicklung auf verschiedene Arten interpretiert und umgesetzt werden. Im Projektverlauf führt eine nicht konkret genannte Anforderung eventuell zu nachträglichen Einschränkungen durch den Auftraggeber, so dass die Systementwicklung deutlich erschwert wird.

Im Kundeninterview ist darauf zu achten, dass alle in der Strukturvorlage vorhandenen Elemente abgefragt und konkret beschrieben werden. Einschränkungen seitens des Kunden müssen klar dokumentiert werden, damit man sich zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung auf diese Angaben beziehen kann.

3.3.3 Spezielle Vorschriften für ein nachhaltiges Formulieren von Anforderungen

Für die Integration der einmal festgehaltenen Anforderungen in den kontinuierlichen mechatronischen Entwicklungsprozess ist es notwendig, dass neben den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten allgemeinen Richtlinien zur Anforderungsformulierung weitere Formulierungsregeln eingehalten werden.

Da eine Verknüpfung der Informationen zwischen dem Anforderungsmanagement-System und den Entwicklungswerkzeugen möglichst automatisiert erfolgen soll, müssen für eine automatische Identifikation der notwendigen Daten bestimmte Identifikationswörter oder Zeichen benutzt werden. Dadurch kann ein einfacher Suchalgorithmus ohne tatsächliche Spracherkennung Informationen aus den Anforderungsmodulen zielorientiert auslesen und mit dem entsprechenden Entwicklungswerkzeug verknüpfen.

Es ist also beispielsweise möglich, festzulegen, dass Zahlenwerte, die sich auf eine konkrete davor genannte Komponente beziehen, mit einem Sonderzeichen – z. B. dem * - gekennzeichnet werden. Ein Suchalgorithmus kann dann ganz einfach den vor dem Sonderzeichen stehenden Zahlenwert auslesen und mit dem direkt davor genannten Objekt in Verbindung bringen, ohne die Bedeutung genau zu kennen.

3.3.4 Umsetzung im Anforderungsmanagement-Prozess

Sowohl die strukturierte Aufnahme als auch die nachhaltige Beschreibung der Anforderungen muss in den Prozess des Anforderungsmanagements integriert werden. Durch das Erstellen einer verbindlichen Strukturvorlage ist die Integration der strukturierten Anforderungsaufnahme eine leicht umzusetzende Maßnahme für die Realisierung des beschriebenen ganzheitlichen Vorgehens zur Anforderungshandhabung.

Für die Umsetzung der Richtlinien für die Beschreibung der Anforderungen ist bei jeder neuen Erstellung eines Lasten- bzw. Pflichtenheftes das Problem der alleinigen Verwendung von Schlüsselbegriffen, konkreten Werten und definierten Sonderzeichen vorhanden. Um den Verfasser der Anforderungen dabei zu unterstützen, alle beschriebenen Richtlinien einzuhalten, müssen in den einzelnen neu angelegten Anforderungsmodulen sowohl zu verwendende Schlagworte als auch Sonderzeichen automatisch hinterlegt sein.

Damit erhält der Vertriebsmitarbeiter zusätzlich zu der strukturierten Systemhierarchie ein bereits mit wesentlichen Beschreibungsdetails befülltes Anforderungsmodul zur Verfügung gestellt. Konkret könnte ein solches hierarchisch eingeordnetes Modul wie in Abbildung 27 dargestellt aussehen.

Somit stellen die strukturierte Aufnahme und die nachhaltige Beschreibung der Anforderungen zwei wesentliche Prozessschritte im Anforderungsmanagement-Prozess dar.

Anforderungsmodul		
Identnummer:12.1.1. / Titel: Schnittbewegung		
Struktur / Einordnung:	Werkzeugmaschine / Hauptfunktion Bearbeitung / Hauptfunktion Schnittbewegung	Projekt 12 12.1 12.1.1
Geschwindigkeiten maximal* minimal#		
Zeiten maximal*		
Entfernungen minimal#		
Genauigkeit mindestens# / Abweichung maximal*		
Kostenschätzung: Materialkosten Entwicklungskosten Gemeinkosten		
Erstellt von:		
Erstellt am:		

Abbildung 27: Beispiel für eine Vorlage für das hinterlegte Anforderungsmodul „Schnittbewegung“

Für die durchgängige Nutzung von Anforderungen während der Entwicklung eines mechatronischen Produktionssystems steht mit der in diesem Abschnitt vorgestellten Vorgehensweise ein leicht umzusetzendes Werkzeug in der industriellen Anwendung zur Verfügung.

3.4 Phase 3: Nutzung der Anforderungen in der Entwicklung

3.4.1 Durchgängige Nutzung der Anforderungen im Entwicklungsprozess

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie, aufbauend auf der Einhaltung des in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Vorgehens, die Anforderungen während der mechatronischen Entwicklung genutzt werden können. Dabei wird sowohl auf die Problematik der drei zu integrierenden Fachdisziplinen Mechanik, Elektronik und Software-Entwicklung eingegangen als auch die zu realisierenden Funktionalitäten zur Verknüpfung von Anforderungen mit Entwicklungsergebnissen erläutert. In Abbildung 28 ist die Untergliederung der letzten Phase in verschiedene Teilbereiche dargestellt.

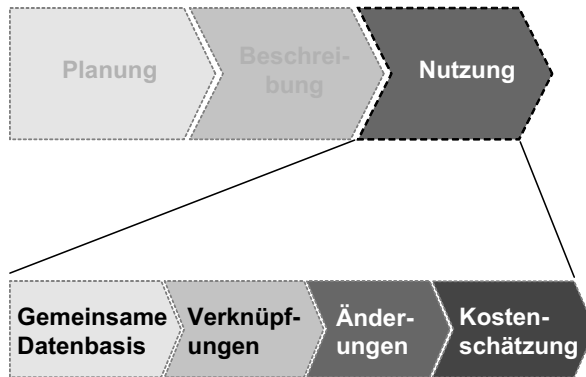


Abbildung 28: Gliederung der dritten Phase der kontinuierlichen Anforderungshandhabung

3.4.2 Gemeinsame Datenbasis

Da bei der mechatronischen Entwicklung stets mindestens die drei verschiedenen Fachbereiche der Mechanik, der Elektrotechnik sowie der Software-Technik gemeinsam an der Realisierung eines Produktes arbeiten, besteht ein hoher Abstimmungsbedarf bzw. auch ein hohes Risiko der Fehlinformation.

Das Spannungsfeld zwischen Kundenanforderungen, fachspezifischer Entwicklung und domänenübergreifender Synthese, wie in Abschnitt 1.7.3 erläutert, kann nur durch eine gemeinsame Datenbasis gelöst werden. Dabei stellen die strukturiert vorliegenden und mit den jeweiligen fachbereichsspezifischen Merkmalen versehenen Anforderungen eine derartige Basis dar.

Die verschiedenen Fachbereiche können gezielt auf die Kundenanforderungen zugreifen, die sich auf die für sie gerade aktuell weiter zu entwickelnde Komponente beziehen. Dadurch, dass diese Anforderungen konsistent in einem System abgelegt sind, entstehen bei dieser Art des Zugriffs keine Diskontinuitäten in der Informationsnutzung.

Durch die funktionalen logischen Verknüpfungen der Anforderungen untereinander können auch während der Entwicklung sehr schnell Auswirkungen von Änderungen oder Problemen auf andere Bereiche des Systems analysiert werden.

3.4.3 Automatische Verknüpfung

In der mechatronischen Entwicklung werden, wie in Abschnitt 1.7.1 beschrieben, von den einzelnen Konstruktionsabteilungen der verschiedenen Fachbereiche unterschiedliche Entwicklungswerkzeuge eingesetzt. Damit jeder Entwickler zu jeder Zeit alle für ihn relevanten Informationen erhält, müssen die in dem Anforderungsmanagement-Werkzeug strukturiert beschriebenen Anforderungen an das mechatronische Produktionssystem rechnerisch mit den einzelnen Entwicklungswerkzeugen verknüpft werden.

Eine Möglichkeit für eine solche automatische Verknüpfung würde die Zuordnung eines Anforderungsmoduls zu einem bestimmten Fachbereich bieten. Allerdings würde dadurch der gesamte Inhalt des Moduls mit allen an einem Fachbereich beteiligten Entwicklungswerkzeugen verknüpft werden. Sinnvoller ist es deshalb, die einzelnen Anforderungsinformationen mit den jeweils betroffenen Entwicklungswerkzeugen zu verbinden.

Damit diese Verknüpfung zwischen den Informationen in den einzelnen Systemen automatisiert erfolgen kann, muss ein während der Anforderungsaufnahme definiertes Attribut für die Verknüpfung ausgewählt werden. Durch dieses Attribut, also z. B. eine automatisch auffindbare Buchstabenkodierung, können mit Hilfe eines einfachen Suchalgorithmus alle relevanten Informationen identifiziert und ausgelesen werden.

Die ausgelesenen Daten müssen dann so abgebildet werden, dass das zu verknüpfende Entwicklungswerkzeug darauf zugreifen und die Informationen für die Konstruktion unterstützend darstellen kann.

3.4.4 Änderung und Aktualisierung von Daten

Während einer Systementwicklung entstehen ständig neue Versionen der zu entwickelnden Komponenten in den einzelnen Fachbereichen. Um den Datenbestand in der gemeinsamen Datenbasis konsistent und zu jedem Zeitpunkt aktuell zu halten, müssen die Entwicklungsfortschritte und die sich daraus ergebenden Randbedingungen in das Anforderungsmanagement-Werkzeug zurückgemeldet werden.

Sobald also von einem Fachbereich eine Aktualisierung der Informationen in der Datenbasis vorgenommen wird, werden alle anderen ebenfalls auf diese Anforderungsinformation zugreifenden Entwicklungsabteilungen über den neuen Status informiert. Führen die Auswirkungen der Aktualisierung zu der Notwendigkeit einer Änderung des Systems bzw. der Anforderungen, wird dadurch ein Änderungsprozess ausgelöst.

Bei dem Änderungsprozess handelt es sich zunächst um eine Anfrage hinsichtlich der Verträglichkeit einer Änderung mit den Konzepten und aktuellen Ausführungen aller an der Entwicklung beteiligten Fachbereiche. Stellt die vorgeschlagene Aktualisierung in keinem Bereich ein Problem dar, wird das Ergebnis der Änderung in dem Anforderungsmanagement-System als aktuelle Version gespeichert. Dieser Fall liegt beispielsweise dann vor, wenn die durch die konstruktive Ausführung umgesetzte Anforderung in dem Anforderungsmanagement-System keinerlei Verknüpfungen mit anderen Anforderungsinhalten hat.

Verursacht die Änderung in einem anderen betroffenen Fachbereich zusätzlichen Anpassungsaufwand, werden die Auswirkungen dieser Anpassungen an das Gesamtsystem bzw. auf den Projektablauf kontrolliert. Die logisch verknüpfte Anforderungsstruktur ermöglicht das leichte Verfolgen von Auswirkungen einer Änderung auf die verschiedenen Subsysteme. Letztendlich muss abgeschätzt werden, ob die Aktualisierung des Systems auf den Änderungsvorschlag hin sinnvoll und notwendig ist, also ob die zunächst nur in dem erstellenden Fachbereich offensichtlichen Verbesserungen für die anderen Fachbereiche nicht zu einem zu hohen Anpassungsaufwand führen, der eine eventuell nur kleine Verbesserung in einem Bereich nicht rechtfertigen würde.

Der Aspekt der Rückverfolgbarkeit von Auswirkungen einer Änderung in einer Anforderungsspezifikation ist in Abbildung 29 grafisch veranschaulicht.

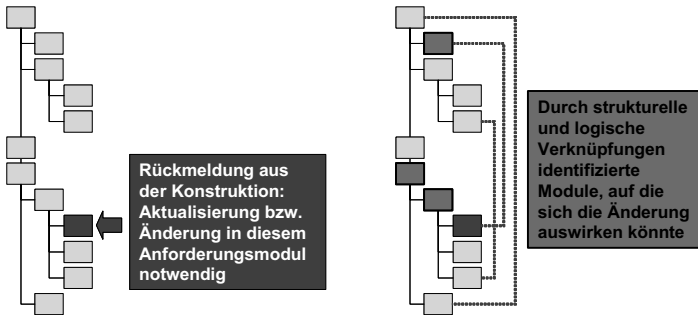


Abbildung 29: Rückverfolgbarkeit der Auswirkungen einer Änderung auf die Anforderungsdatenbasis

Kann aber eine technisch notwendige Änderung eines Subsystems in keinem Fall mit den vom Kunden vorgegebenen Rahmenbedingungen vereint werden, ist ein größerer Änderungszyklus notwendig. Die betroffenen Anforderungen im Anforderungsmanagement-System müssen identifiziert und die technisch notwendigen Anpassungen beschrieben werden. In einem Abstimmungsprozess mit dem Kunden müssen die Kundenanforderungen und die technisch notwendigen Anforderungen abgeglichen werden. Der Abstimmungsprozess mit dem Kunden kann, je nach Umfang und Wichtigkeit der einzubringenden Änderung telefonisch, per E-Mail oder auch in ein weiteres gemeinsames Gespräch und einer anschließenden Aktualisierung des Vertrages erfolgen.

Abbildung 30 zeigt den Ablauf eines Änderungsprozesses mit den verschiedenen geschilderten Varianten der Änderungsschleifen. Das heißt je geringer die Reichweite einer Änderung, umso kleiner ist die Änderungsschleife und umso geringer ist die Zahl der notwendigen Abstimmungsschritte. So stellt der kleinste Bogen (im Bild links) einen Änderungszyklus mit äußerst geringen Zusammenhängen, der größte Bogen einen Änderungszyklus mit vielen Zusammenhängen und deshalb großem Abstimmungsbedarf dar.

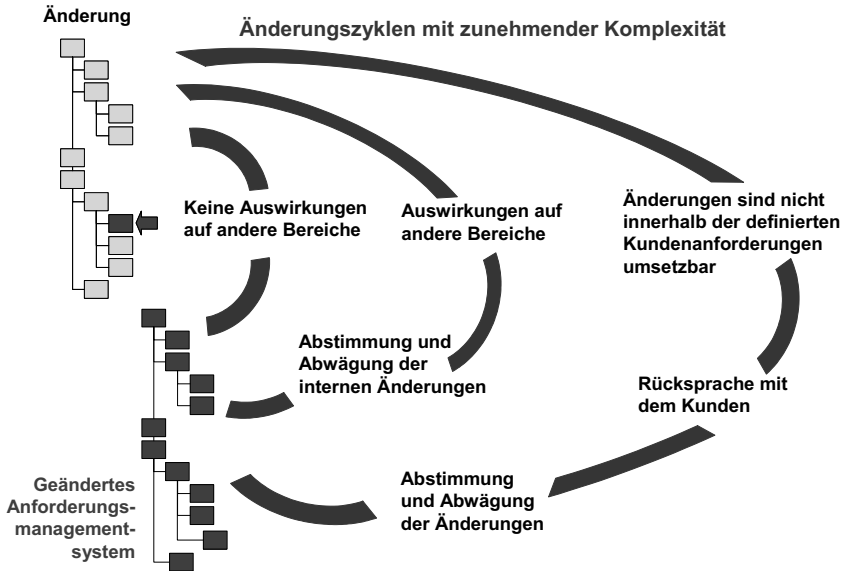


Abbildung 30: Unterschiedliche Änderungszyklen in Abhängigkeit von den Auswirkungen der Änderung auf die Anforderungen

3.4.5 Kostenabschätzung

Wie in Abschnitt 2.6 erläutert, stellt die Kostenabschätzung eine wichtige Tätigkeit im Entwicklungsprozess dar. Durch die Aufteilung des gesamten zu entwickelnden Systems in kleine, gut überschaubare Module wird die Zuweisung von Kosten erleichtert. Die abgeschlossenen und weitestgehend spezifizierten Subsysteme bilden jeweils einzeln eine Grundlage für eine Kostenschätzung.

Bei der Kostenschätzung für die Realisierung eines Moduls müssen die für ein mechatronisches System relevanten Kosten berücksichtigt werden, also

- Materialkosten,
- Fertigungskosten sowie
- Entwicklungskosten
 - für Hardware und
 - für Software.

Da jedes Modul sich auf eine konkrete Komponente bezieht, können diese einzelnen Kostenkomponenten leicht abgeschätzt und im Entwicklungsverlauf überprüft und angepasst werden.

Im Zusammenhang mit der hier dargelegten kontinuierlichen Anforderungshandhabung bietet sich die Möglichkeit, bereits direkt nach der Aufnahme der Anforderungen eine erste Kostenschätzung durchzuführen. Diese Kostenschätzung bildet dann eine gut fundierte Grundlage für den im Vertrag zu verhandelnden Preis. Der Zeitpunkt für diese frühzeitige Kostenschätzung lässt sich also durch die Verwendung einer durchgängigen Anforderungshandhabung im Projektverlauf signifikant nach vorne verschieben, da nicht erst in der Phase der technischen Entwicklung eine Grundlage für die Schätzung vorhanden ist.

Erst durch die modulare Zuordnung von Kosten kann in dieser sehr frühen Projektphase eine erhöhte Zuverlässigkeit und Aussagekraft der abgeschätzten Kosten erreicht werden.

3.5 Umsetzung in einem Rechnerwerkzeug

Um das dargestellte Vorgehen rechnertechnisch zu unterstützen bzw. umzusetzen, sind die folgenden Anforderungen zu berücksichtigen:

- Modulare hierarchische Struktur
- Modulvorlage
- Strukturübergreifende Verknüpfungen
- Verknüpfung von internen Daten
- Identifikationsmöglichkeit von Kosten
- Ausgabemöglichkeit in einem einfachen Datenformat
- Verknüpfungen zwischen den einzelnen Entwicklungswerkzeugen

Unabhängig von dem vorhandenen Basissystem kann das Vorgehen zur rechnertechnischen Umsetzung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes wie in Abbildung 31 dargestellt werden.

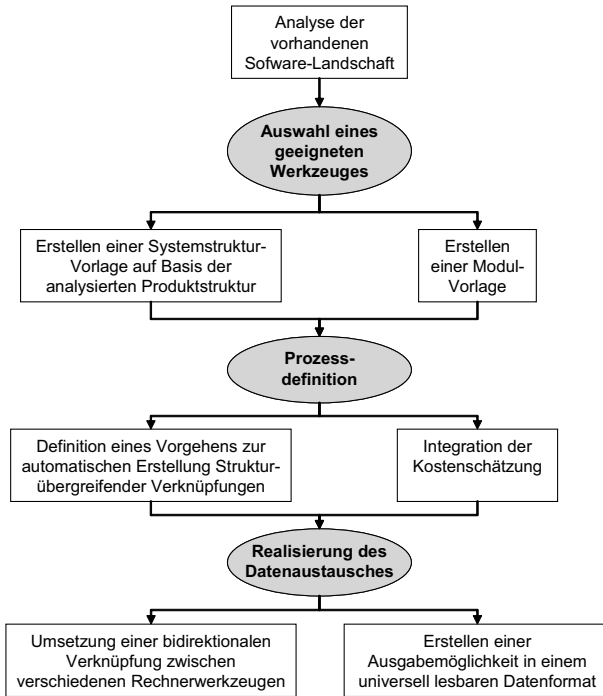


Abbildung 31: Software-unabhängiges Vorgehen zur rechnertechnischen Umsetzung der beschriebenen Methode

Durch die *Analyse der vorhandenen Softwarelandschaft* werden Schnittstellen und Funktionalitäten erfasst und bewertet, die von der kommerziell erhältlichen Software bereits zur Verfügung gestellt werden. Dabei sind insbesondere die verschiedenen eingesetzten Entwicklungs-Software-Systeme der einzelnen Fachbereiche hinsichtlich vorhandener Austauschformate und verwendbarer Datenformate zu untersuchen. Wichtig ist tatsächlich alle verwendeten Systeme, Daten und Formate zu berücksichtigen.

Auf der Basis der gewonnenen Informationen zu Datenformaten und Schnittstellen einzelner Programme der Entwicklung kann dann *ein geeignetes Werkzeug ausgewählt* werden. Bietet ein vorhandenes Software-System ausreichende Möglichkeiten für eine durchgängige Datenverknüpfung zwischen allen Abteilungen

und in allen Entwicklungsphasen, ist die Anschaffung eines neuen Anforderungsmanagementsystems nicht zwingend erforderlich.

Das *Erstellen der Systemstrukturvorlage* beinhaltet die Analyse der vorhandenen Produktstruktur sowie die Umsetzung dieser Struktur in dem ausgewählten Software-System als eine allgemein verfügbare Vorlage. Diese Verfügbarkeit kann für verschiedene Projekte bzw. im Kundenauftrag entwickelte Produkte auch durch einfaches Kopieren der Struktur erfolgen. Hinweise zur Strukturierung sind in Abschnitt 3.2.2 näher erläutert.

Das *Erstellen und Verfügbarmachen der Modulvorlage* kann parallel zum Erstellen der Struktur erfolgen. Die Vorlage für ein Modul muss alle wesentlichen Merkmale eines mechatronischen Subsystems (vgl. Abschnitt 3.2.3) – also alle Ausprägungen der möglichen Anforderungen aus den Fachbereichen – beinhalten.

Um die erstellte Struktur und die Modulvorlage sinnvoll für die Entwicklung nutzen zu können, ist als nächstes die *Definition von Prozessen* notwendig. Dabei müssen die Verantwortlichen festgelegt, ein Ablauf beschrieben und die notwendigen Software-technischen Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. In der Regel dürften Schulungen der einzelnen Mitarbeiter und eine Anlaufphase für die Umsetzung der vorgegebenen Prozesse notwendig sein.

Für die *automatische Erstellung von strukturübergreifenden Verknüpfungen* muss dann *ein einheitliches Vorgehen definiert* werden. Gemeinsam mit den Nutzern der Struktur- und Modulvorlagen werden dafür Schlüsselbegriffe und deren Verwendung festgelegt. Es ist darauf zu achten, dass typische, prägnante Begriffe gewählt werden, da andernfalls unnötige Verknüpfungen erstellt werden oder notwendige Verknüpfungen unbemerkt fehlen können.

Um alle beschriebenen Funktionalitäten der Methode umzusetzen, ist zudem die *Integration der Kostenschätzung* in die definierten Prozesse vorzusehen. Kosten müssen dafür automatisch als solche in den in der Struktur hinterlegten Anforderungen erkennbar sein (z.B. durch Kennzeichnung mit einem €-Symbol).

Anschließend wird der vorgesehene *Datenaustausch realisiert*. Das bedeutet, dass die in der Struktur bzw. in den einzelnen Modulen abgelegten Anforderungen als Grundlage für die Generierung von Entwicklungsdaten in den einzelnen Fachbereichen zur Verfügung stehen.

Die Implementierung der *Ausgabe der Daten in einem einfachen, universell lesbaren Datenformat* ist dafür ein wichtiger Schritt. Welches Format sich hierfür anbietet, ist abhängig von der Art und Anzahl der verknüpften Software-Systeme und der realisierten Strukturvorlage.

Um für die weitere Entwicklung einen Abgleich zwischen technischen Entwicklungsergebnissen und Kundenanforderungen vornehmen zu können, muss *die Verknüpfung der Systeme bidirektional* umgesetzt werden. Am einfachsten kann dies über einen automatischen Abgleich der generierten Informationen mit den Anforderungen am Ende eines Bearbeitungsschrittes realisiert werden.

3.6 Zusammenfassung

Durch die Intensivierung der Planung und Strukturierung der Anforderungshandhabung kann die Überprüfung der Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit der Anforderungen schon zu Beginn des Entwicklungsprojektes für eine mechatronische Produktionsanlage durchgeführt werden. Dies erleichtert nicht nur eine Risiko-Abschätzung, sondern ermöglicht auch eine frühzeitige Klärung offener Fragen.

Das in diesem Abschnitt vorgestellte Vorgehen zur ganzheitlichen, kontinuierlichen Anforderungshandhabung während des Projektverlaufs unterstützt einen reibungslosen, fachbereichsübergreifenden Ablauf der kundenorientierten Entwicklung von Produktionssystemen.

Die beschriebenen Anforderungen an ein Rechnerwerkzeug zur Umsetzung des Vorgehens bilden eine Spezifikation, auf deren Grundlage einzelne Funktionalitäten in einem Werkzeug umgesetzt wurden, um im anschließenden Kapitel 4 die prinzipielle Realisierung der dargestellten Eigenschaften nachzuweisen.

4 Exemplarische Umsetzung in einem Anforderungsmanagement-Werkzeug

4.1 Allgemeines

Die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterte Vorgehensweise zur kontinuierlichen Berücksichtigung von mechatronischen Anforderungen vom ersten Kundenkontakt bis hinein in den Entwicklungsprozess wurde im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch umgesetzt. Als Beispiel für das entwickelte System dient hierbei eine Werkzeugmaschine als mechatronisches Produktionssystem. Die Basis für die Applikationen bildet das Requirements-Management-Werkzeug DOORS, da dieses durch die DXL (Doors eXtension Language) recht flexibel erweiterbar ist und eine kostenlose Hochschullizenz bietet. Zudem ist es laut einer aktuellen Studie derzeit das beste System auf dem Markt (vgl. Kapitel 2.5).

4.2 Anforderungen an ein unterstützendes Rechnerwerkzeug

Um die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Prozesse und Funktionen unterstützen bzw. abbilden zu können, bestehen einige Anforderungen an ein Rechnerwerkzeug.

Zunächst muss das Tool die Möglichkeit einer hierarchischen Strukturierung bieten. Jede Systemebene muss beliebig viele Unterebenen enthalten können und die angelegten Strukturierungspunkte müssen von dem Bediener frei benennbar sein. Auch darf keine Einschränkung in der Hierarchisierungstiefe vorliegen, so dass Subsysteme bis zu dem notwendigen Grad weiter unterteilt werden können.

Das Software-System muss eine einfache Replikation der einmal allgemein angelegten Struktur erlauben, damit die Strukturvorlage für jedes neue Projekt einfach und schnell zur Verfügung steht.

Für den intuitiven Umgang eines Vertriebsmitarbeiters mit dem System ist eine an den Microsoft Explorer angelehnte Notation hilfreich, da damit ein gewisser Wiedererkennungscharakter der verwendeten Symbole gegeben ist. Die einfache und ohne weitere Erklärung verständliche Navigation durch die Strukturvorlage kann damit sichergestellt werden.

Neben der hierarchischen Strukturierung ist auch die modulare Beschreibung der einzelnen Subsysteme notwendig.

4.3 Vorhandene Funktionalitäten des Anforderungsmanagement-Werkzeugs

4.3.1 Übersicht der vorhandenen Funktionalitäten von DOORS

Zunächst wird das verwendete Anforderungsmanagement-Werkzeug DOORS vorgestellt. Grundlegende Eigenschaften des Systems sind bereits in Abschnitt 2.5 beschrieben, weshalb in diesem Abschnitt lediglich einige für die weitere Nutzung und Umsetzung relevanten Features genauer beschrieben werden sollen.

4.3.2 DOORS Extension Language DXL

Die DXL ist eine leicht zu erlernende Script-Sprache, um die Funktionalitäten des Grundsystems zu kontrollieren bzw. zu erweitern. Die verwendete Syntax ist ähnlich zu den Programmiersprachen C oder C++. Im Speziellen kann DXL eingesetzt werden, um:

- Routinen oder komplexe Aufgaben zu automatisieren,
- auf bestimmte Ereignisse durch maßgeschneiderte Programme zu reagieren oder
- neue Optionen in das DOORS-Menue aufzunehmen.

Um kleine DXL-Programme zu generieren, kann das DXL-Interaction Fenster genutzt werden. Für das Erstellen größerer Programme wird die Verwendung eines externen Editors empfohlen, aus dem der Code nach der Programmierung in das DXL-Fenster übertragen und anschließend ausgeführt wird und ggf. Fehler behoben werden können.

Zudem existiert eine DXL-Bibliothek, aus der vorhandene Programme hochgeladen und modifiziert werden können. In dieser Bibliothek können auch neu erstellte Programme abgelegt und verwaltet werden.

4.3.3 Anforderungsobjekte

Anders als in rein Dokument-basierten Systemen werden in DOORS einzelne Textbausteine als eigene Objekte definiert.

4.3 Vorhandene Funktionalitäten des Anforderungsmanagement-Werkzeugs

Da viele Anforderungslisten in den Microsoft-Tools MS-Word bzw. MS-Excel verfasst werden, ist eine Anbindung von DOORS an diese Standard-Programme bereits in dem System integriert. Eine automatische Übertragung von Inhalten beispielsweise aus einem Word-Dokument findet über eine in der Symbolleiste integrierte Schaltfläche statt.

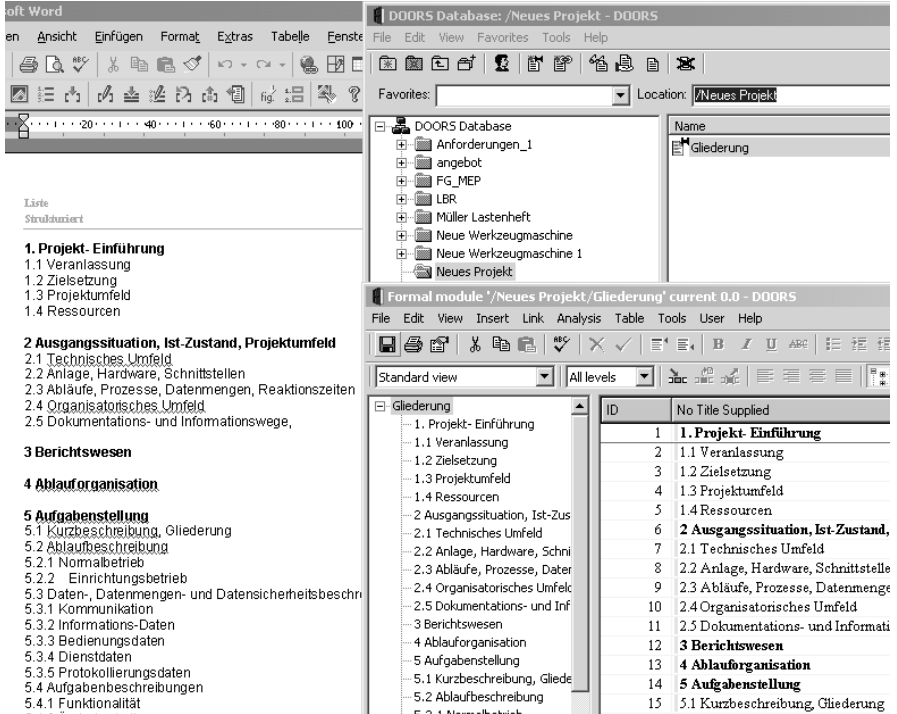


Abbildung 32: Übertragung der Inhalte eines MS Word-Dokumentes in Anforderungsobjekte in DOORS

Bei der Übertragung der Inhalte werden die im Dokument enthaltenen Zeilenumbrüche jeweils als Auslöser für ein neues Anforderungsobjekt übersetzt. Dadurch wird ein Dokument in viele, einzeln identifizierbare Informationen übersetzt. Abbildung 32 zeigt ein durchgängiges Word-Dokument und das daraus in DOORS entstandene Modul mit einzelnen Objekten.

4.3.4 Verknüpfungen zwischen Anforderungsobjekten

Für die Rückverfolgbarkeit von Anforderungen sind in DOORS so genannte Link-Module definiert. Diese Module beschreiben Verknüpfungen zwischen einzelnen Objekten eines inhaltlichen Moduls zu beliebigen anderen Anforderungsobjekten. Beliebig heißt in diesem Fall, dass die Verknüpfung sowohl innerhalb des eigenen Moduls stattfinden kann, aber auch Verknüpfungen zu Objekten anderer Module zulässig sind.

Die Links haben unterschiedliche „Richtungen“. Dabei wird zwischen ausgehenden und ankommenden Links unterschieden. Von einem Objekt können sowohl ein Link oder auch mehrere Links auf andere Objekte verweisen. Aber auch von verschiedenen anderen Objekten kann auf dieses Objekt verwiesen werden.

Die Eigenschaften der Links lassen sich ebenfalls darstellen. So kann mit wenig Aufwand schnell überprüft werden, von und zu welchen Informationen Verknüpfungen bestehen. Abbildung 33 zeigt ein Beispiel für ein Anforderungsobjekt, von dem verschiedene Verknüpfungen in andere Module, aber auch in andere Projekte und Ordner ausgehen.

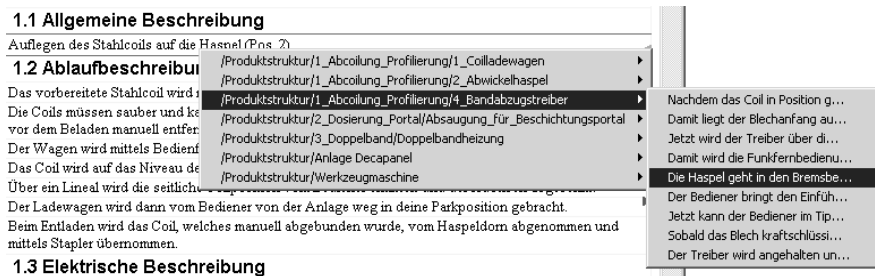


Abbildung 33: Modul und ordnerunabhängige Verknüpfung eines Objektes in DOORS am Beispiel einer Anlage für die Herstellung von Bauelementen

4.3.5 Projekte und Ordner

Bei der Anlage einer Struktur in DOORS kann auf jeder Ebene zwischen zwei verschiedenen Typen der Strukturierungselemente unterschieden werden. Es handelt sich dabei um Projekte oder Ordner. Beide Elemente können auf jeder

hierarchischen Ebene, unabhängig davon, was in der darüber oder darunter liegenden Ebene verwendet wurde, eingesetzt werden. Die Entscheidung, ob als Strukturierungselement ein Projekt oder ein Ordner verwendet wird, ist lediglich von den einzelnen für die beiden Typen definierten Eigenschaften und weiteren Funktionsmöglichkeiten abhängig.

Projekte haben die Eigenschaft, dass ihre Namensgebung in der gesamten Datenbasis singular sein muss, damit das Auffinden einer Information in dem Projekt durch einen Pfad beschrieben wird, der nur genau in diesem Projekt startet. Auch können Projekte im Gegensatz zu Ordnern partitioniert und archiviert werden. Das in DOORS vorhandene Change-Proposal-System kann ebenfalls nur für ein Projekt, nicht aber für einen Ordner angelegt werden.

Soll ein Ordner in ein Projekt umgewandelt werden, müssen

- alle enthaltenen Module aus dem Status des „Reviews“ im Change-Proposal-System ausgeschieden sein und
- alle darunter liegenden Module bzw. Ordner geschlossen sein.

Zudem müssen die Regeln für die Namensgebung eines Projektes beachtet werden.

Soll hingegen ein Projekt in einen Ordner umgewandelt werden, dürfen

- keine Change-Proposal-Systeme in dem Projekt installiert sein,
- keine Partitionierungen vorhanden sein und
- keine darunter liegenden Systeme geöffnet sein.

4.4 Umsetzung identifizierter Funktionalitäten

4.4.1 Erweiterungen und Ergänzungen von Funktionen

In das beschriebene Basissystem in DOORS wurden im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der in Kapitel 3.5 beschriebenen, notwendigen Funktionalitäten für die kontinuierliche Anforderungshandhabung bei der Entwicklung mechatronischer Systeme zusätzliche Module implementiert. Diese einzelnen Module werden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt und erläutert.

4.4.2 Modulare, hierarchische Systemstruktur

Wie bereits erläutert, lassen sich in dem Werkzeug DOORS Projekte und Ordner hierarchisch anordnen. Um eine Vorlage für die Anforderungsaufnahme eines künftigen mechatronischen Entwicklungsprojektes umzusetzen, wird die Möglichkeit genutzt, dass einmal definierte Projektstrukturen kopiert und für weitere Projekte identisch benutzt werden können. Abbildung 34 zeigt eine solche in DOORS hinterlegte Systemstruktur am Beispiel einer Dreh-Räum-Maschine.



Abbildung 34: Beispiel einer in DOORS definierten Systemstrukturierung

Als Basis für die Strukturvorlage wurde ein existierendes Pflichtenheft von einer bereits realisierten Anlage verwendet. Dadurch ist sicher gestellt, dass diese Strukturvorlage alle für ein Lastenheft relevanten Informationen enthält. Sie kann

durch einfaches Kopieren für jedes beliebige weitere Projekt zur Entwicklung einer neuen Dreh-Räum-Maschine bei dem Hersteller genutzt werden.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, war es für die Erstellung einer Strukturvorlage notwendig, auf Dokumentationen und Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten zurückzugreifen.

Diese in DOORS hinterlegte Strukturvorlage für eine Dreh-Räum-Maschine lässt sich durch entsprechende Ergänzungen leicht für eine andere Art der mechatronischen Produktionsanlage anpassen. Dabei dienen die angelegten Ordner und Strukturen als Richtlinie bzw. Checkliste für eine beliebig abgewandelte Vorlage.

4.4.3 Modulvorlage

Als nächster Schritt musste neben der hierarchischen Strukturierung eine Vorlage für die modulare Aufnahme der Anforderungen erstellt werden. Die notwendigen Inhalte einer solchen Vorlage sind in Abschnitt 3.2.3.1 beschrieben. Für die Umsetzung dieser Funktionalität wurde die Möglichkeit genutzt, dass neue Module in DOORS mit der Hilfe von strukturierten Vorlagen erstellt werden können. Dadurch konnte eine allgemeine Vorlage für die Eingabe von Anforderungen der Mechatronik eingerichtet werden.

Die vorhandene Bibliothek von Modulvorlagen musste so ergänzt werden, dass beim Aufruf der verschiedenen Modulvorlagen die notwendige Vorlage leicht ersichtlich vom System angezeigt wird.

Diese neu integrierte Vorlage enthält zunächst alle in Abschnitt 3.2.3.1 beschriebenen Eigenschaften für die Aufnahme mechatronischer Anforderungen. Sie kann ebenso wie alle anderen Vorlagen für formale Module in DOORS bei der neuen Erstellung eines Moduls aufgerufen werden.

Abbildung 35 zeigt im oberen linken Bereich das Fenster, in dem ein neues Modul erstellt wird. Wählt man hier die Verwendung einer Vorlage (template) aus, so öffnet sich nach Drücken der Browse-Schaltfläche das Fenster oben rechts. Hier sind alle vorhandenen Modulvorlagen hinterlegt. Die neu erstellte Vorlage für ein mechatronisches Anforderungsmodul ist mit „Modulvorlage“ bezeichnet. Im unteren Teil von Abbildung 35 ist das so erstellte neue Modul zu erkennen.

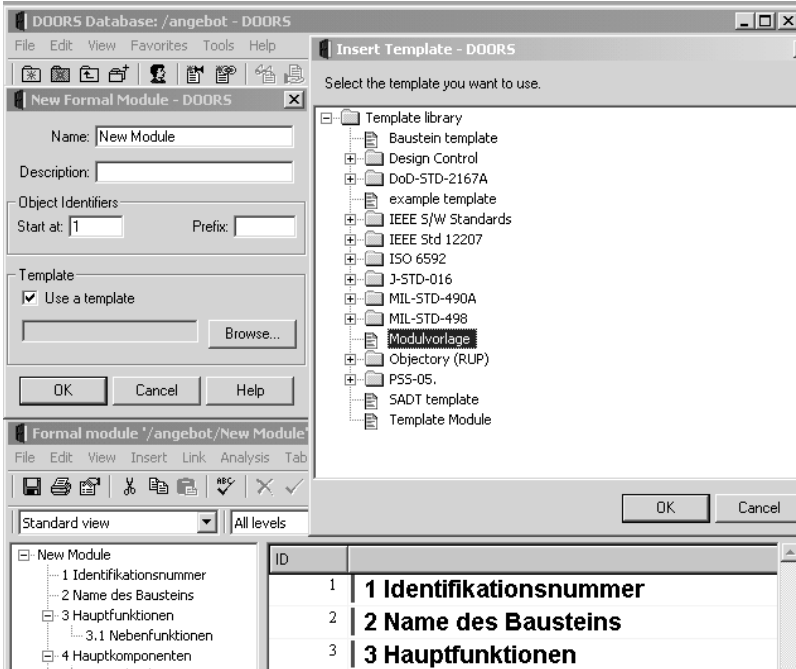


Abbildung 35: Erstellen eines neuen Moduls in DOORS unter Verwendung der ergänzten Modulvorlage

4.4.4 Automatische interne Verknüpfung

Die in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Verknüpfungen zwischen einzelnen Anforderungsinhalten über die Systemstruktur hinweg sollten nun auch in dem verwendeten Rechnerwerkzeug möglichst automatisch erstellt werden, um den Aufwand für alle Projektbeteiligten möglichst gering zu halten.

Nachdem der Vertriebsmitarbeiter alle Kundenanforderungen in der vorgegebenen Systemstruktur bzw. den zur Verfügung stehenden Modulvorlagen abgelegt hat, sollte ihn ein Programm bei der Erstellung der logischen, über die mechatronische Struktur hinaus gehenden Verknüpfung von Anforderungen unterstützen. Dabei ist es wichtig, dass die Verknüpfungen zwischen einzelnen Anforderungen

(Objekte in den DOORS-Modulen) flexibel und unabhängig von der vorgegebenen Struktur erstellt werden können.

Bislang müssen in dem Rechnerwerkzeug DOORS Verknüpfungen zwischen einzelnen Objekten von Hand eingetragen werden. Dieses Vorgehen ist aufwändig und birgt das Risiko, dass wichtige Verknüpfungen aus Zeitgründen nicht in dem System aufgenommen werden.

Deshalb wurde eine Funktion implementiert, die Verknüpfungen zwischen verschiedenen Objekten innerhalb eines Projektes automatisch anlegt. Dabei werden zu verknüpfende Objekte mit Hilfe der Analyse der Objekttexte identifiziert. Wurden die in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Richtlinien für das nachhaltige Formulieren von Anforderungen eingehalten, kann diese automatische Verknüpfung der fachbereichsübergreifenden Informationen durch die Suche nach bezeichnenden Ausdrücken in allen vorhandenen Objekten in einem Projekt erfolgen. Als „bezeichnend“ soll ein Wort oder Ausdruck in diesem Kontext gelten, wenn Anforderungsobjekte, die diesen Ausdruck enthalten, mit höchster Wahrscheinlichkeit inhaltlich zusammenhängen. Dies können beispielsweise Schlagwörter oder Fachbegriffe sein.

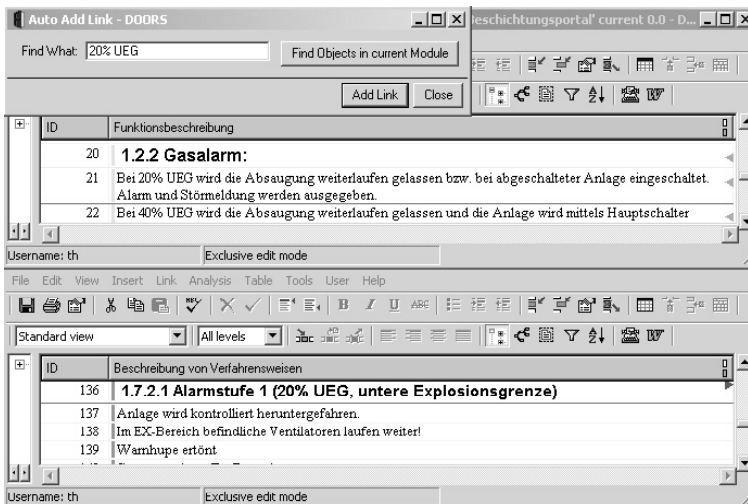


Abbildung 36: Automatische Verknüpfung von Anforderungsobjekten in DOORS durch so genannte bezeichnende Ausdrücke

Abbildung 36 zeigt die Umsetzung dieser Funktionalität. Durch die Erweiterung der Verknüpfungsmöglichkeiten um die automatische Generierung von Verknüpfungen zwischen Objekten, die einen eingegebenen Text enthalten, wird die interne Verknüpfung von logisch zusammenhängenden Inhalten realisiert.

Das im oberen linken Bereich abgebildete Fenster bietet die Möglichkeit der Eingabe eines bezeichnenden Ausdrucks für die Suche in allen Objekten eines Projektes. Hier dargestellt sind zwei Objekte in unterschiedlichen Modulen, die einen bestimmten Alarmzustand der Anlage enthalten. Die auf der rechten Seite abgebildeten Pfeile stellen die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Objekten dar.

4.4.5 Abschätzung von Kosten im Anforderungsmanagement-Werkzeug

Da die Kostenabschätzung wie in Abschnitt 2.6 beschrieben eine weitere wichtige Funktionalität im Entwicklungsprozess darstellt und die Abschätzung der Kosten auf Grund der aufgenommenen Anforderungen modular erfolgen kann, sollte auch diese Funktionalität in dem Anforderungsmanagement-Werkzeug integriert werden.

Die erstellte Modulvorlage enthält bereits, als verschiedene Objektüberschriften angelegt, die wesentlichen voraussichtlich für eine Komponente anfallenden Kostenarten:

- Entwicklungskosten
- Fertigungskosten
- Materialkosten.

Da die Objekt-Ident-Nummer in jedem Modul nur einmal vergeben wird und durch Verwendung der Vorlage die Objekt-IDs für die verschiedenen Kosten stets identisch sind, kann die Verknüpfung der Objekthinhalte in diesem Fall auf Grund der Objekt-ID erfolgen.

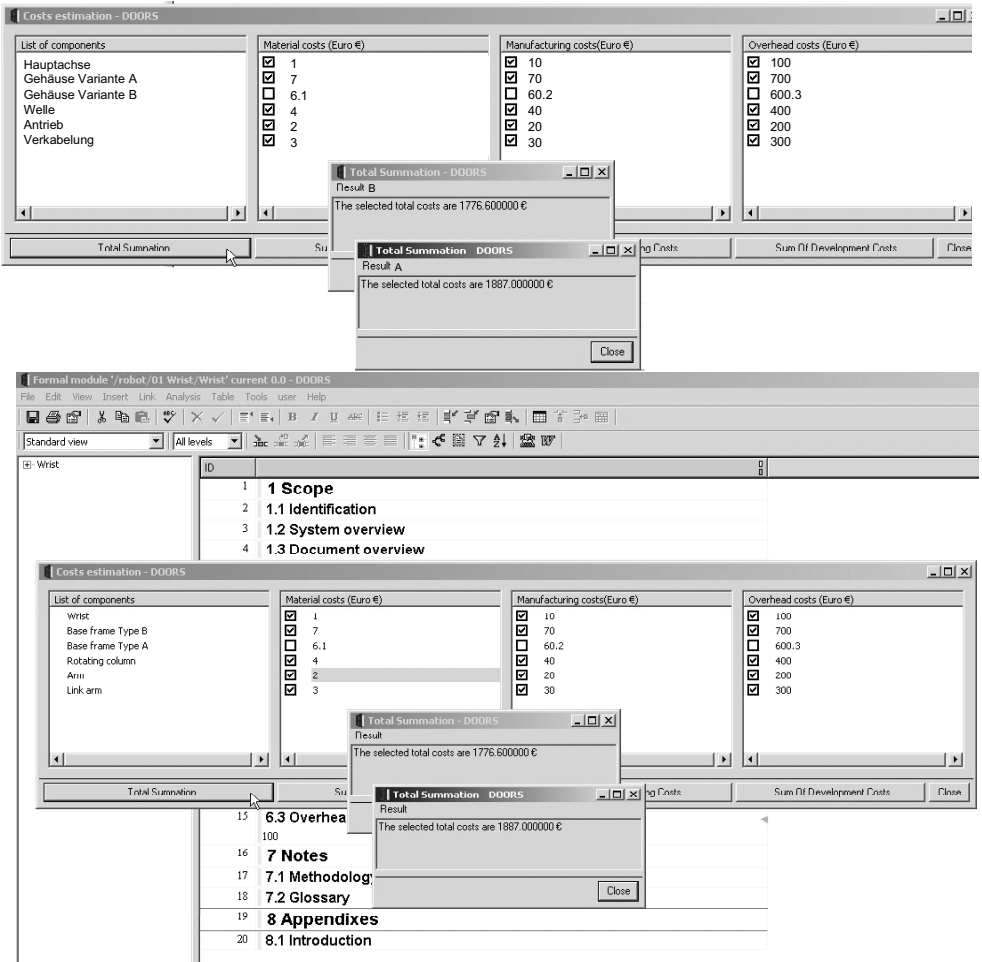


Abbildung 37: Automatische Summation von Kosten für einzelne Komponenten

Die in den Objekten festgehaltenen Werte müssen ausgelesen werden. Um nun eine Abschätzung der Gesamtkosten eines Produktes treffen zu können, müssen alle ausgelesenen Werte summiert werden. Abbildung 37 stellt diese Summation in DOORS dar.

Bei der implementierten Funktionalität zur Kostenabschätzung besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Kosten von verschiedenen Modulen für die Summation auszublenzen. Dies erlaubt einen kostentechnischen Vergleich von Alternativ-Lösungen für einzelne Komponenten, die in dem System hinterlegt sind. In Abbildung 37 ist diese Funktion in der Bildmitte anhand der aktivierten bzw. nicht aktivierten Zeilen in der Aufstellung der Modul-Kosten zu erkennen.

4.4.6 Ausgabe in XML

Um einen Austausch der in dem Anforderungsmanagement-Werkzeug hinterlegten Daten mit den anderen an der mechatronischen Entwicklung beteiligten Rechnerwerkzeugen zu realisieren, müssen diese Daten bei dem Auslesen in ein Format übersetzt werden, das von dem Entwicklungswerkzeug leicht gelesen werden kann.

Die Extensible Markup Language, abgekürzt XML, ist ein Standard zur Erstellung maschinen- und menschenlesbarer Dokumente in Form einer Baumstruktur. Ein Grundgedanke hinter XML ist es, Daten und ihre Repräsentation zu trennen, also beispielsweise Wetterdaten einmal als Tabelle oder als Grafik auszugeben, aber für beide Anwendungen die gleiche Datenbasis im XML-Format zu nutzen [HAROLD 2002, MINTERT 2002, RAY 2004, VONHOEGEN 2005, BITZER 2003, FUELLE ET AL. 2005]. Aus diesem Grund stellt der XML-Standard eine gute Möglichkeit dar, die in DOORS hinterlegten Informationen so auszulesen und verfügbar zu machen, dass alle anschließenden Entwicklungswerkzeuge die für den speziellen Fall notwendigen Daten auslesen können.

Das kommerziell vertriebene System DOORS bietet zwar zahlreiche Schnittstellen zu verschiedenen anderen Software-Systemen, eine Ausgabe der Daten in XML ist allerdings derzeit noch keine im Standard enthaltene Funktionalität. Deshalb wurde diese ebenfalls als Erweiterung umgesetzt.

Abbildung 38 zeigt das Ergebnis dieser in DOORS implementierten Funktion. Im oberen Bildteil ist ein Teil der Struktur in dem Anforderungsmanagement-Werkzeug sowie das betroffene Objekt in dem Anforderungsmodul dargestellt. Die in DXL exportierten Daten sind als dxl-Datei im unteren Bildbereich dargestellt. Gut zu erkennen ist dabei, dass alle dem Objekt anhaftenden Informationen, also Ersteller, Änderungsdatum, Identifikationsnummer und der Inhalt, in XML übertragen wurden.

The screenshot shows two windows from the DOORS Database. The top window displays a table with the following data:

ID	Funktionsbeschreibung
10	Jetzt kann der Bediener über die Funkfernbedienung den Treiber schließen.
11	Danach wird die Funkfernbedienung von der Haspel auf den Treiber/Profilierer Haspel wechselt in Bremsbetrieb.

The bottom window shows the XML representation of the data for ID 10:

```

- <ID>
  <ObjectIdentifier>10</ObjectIdentifier>
</ID>
- <Object10Properties>
  <AbsoluteNumber>10</AbsoluteNumber>
  <CreatedBy>th</CreatedBy>
  <CreatedOn>22 August 2002</CreatedOn>
  <CreatedThru>Manual Input</CreatedThru>
  <LastModifiedBy>th</LastModifiedBy>
  <LastModifiedOn>22 August 2002</LastModifiedOn>
  <ObjectHeading />
  <ObjectShortText />
  <ObjectText>Jetzt kann der Bediener über die Funkfernbedienung
    den Treiber schließen.</ObjectText>
</Object10Properties>

```

Abbildung 38: Ausgabe der in DOORS abgelegten Daten als XML

4.4.7 Verknüpfung mit einem Werkzeug der Installationsplanung

Um die in Abschnitt 3.4 geforderte Integration der Anforderungen in den mechatronischen Entwicklungsprozess zu unterstützen, ist zusätzlich zu einer Übertragung der vorhandenen Daten in ein leicht nutzbares Format (vgl. vorangegangener Abschnitt) eine möglichst direkte Verknüpfung zwischen den verschiedenen Rechnerwerkzeugen notwendig.

Exemplarisch wurde dabei die Übertragung von Anforderungen aus DOORS in das Werkzeug zur Installationsplanung COMOS PT realisiert. Für die Anbindung an Werkzeuge zur Software-Entwicklung ist in DOORS bereits eine Schnittstelle vorhanden, eine Kopplung an ein mechanisches CAD-System hingegen müsste auf ähnliche Weise umgesetzt werden.

Wesentlicher Aspekt dieser Kopplung war neben der einfachen und korrekten Übermittlung von Daten zwischen den Systemen die Rückverfolgbarkeit. Änderungen, die in COMOS an den von DOORS übertragenen Daten vorgenommen werden, müssen zur Wahrung der Konsistenz wieder an das Anforderungsmanagement-Werkzeug zurückgegeben werden. Um diese Übertragung zu realisieren, wird zusammen mit den in DOORS hinterlegten Anforderungsinformationen die gesamte hierarchische Strukturierung übertragen.

Abbildung 39 zeigt ein in DOORS hinterlegtes Anforderungsmodul mit seiner hierarchischen Zuordnung. In dem Screenshot von Abbildung 40 ist dieselbe Struktur sowie das automatisch angelegte Objekte in COMOS zu erkennen.

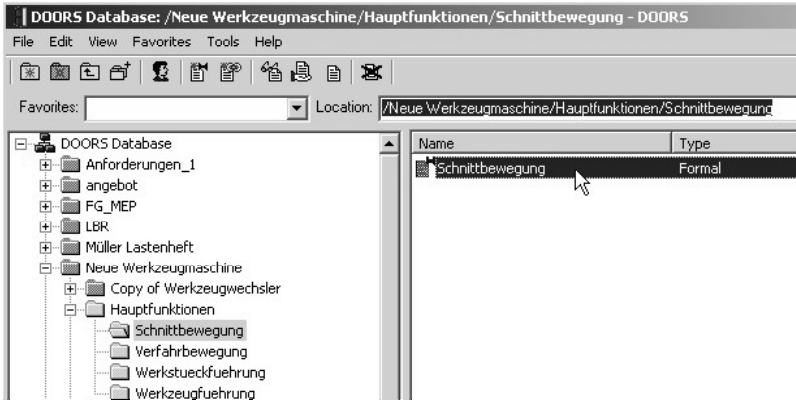


Abbildung 39: Markiertes Modul in DOORS

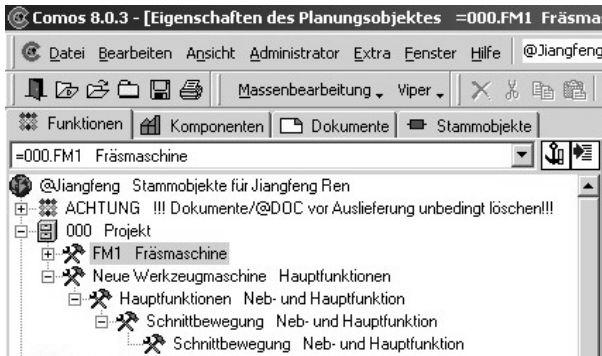


Abbildung 40: Aus DOORS in COMOS übertragene Struktur

Ermöglicht wird diese Übertragung durch eine TCP/IP-Verbindung zwischen den beiden Rechnern bzw. Systemen. Das TCP/IP-Protokoll wurde gewählt, da es einen weit verbreiteten Standard für die Verknüpfung verschiedener Rechner darstellt und zum anderen einen Online-Abgleich der Daten ermöglicht. So können Entwicklungsergebnisse noch während der Durchführung der Installationsplanung bereits an DOORS übertragen werden. Ebenso können Aktualisierungen in DOORS jederzeit an COMOS übertragen werden.

4.4.8 Zusammenfassung

Die in Absatz 3.5 beschriebenen Anforderungen an ein Rechnerwerkzeug zur Umsetzung des Vorgehens zur Integration des Anforderungsmanagements in den mechatronischen Entwicklungsprozess bilden eine Spezifikation, auf deren Grundlage einzelne Funktionalitäten in einem Werkzeug umgesetzt wurden, um die prinzipielle Realisierung der dargestellten Eigenschaften nachzuweisen.

Durch die Umsetzung der beschriebenen Programmbausteine im Rahmen dieser Arbeit stehen nun verschiedene unabhängige Module zur Erweiterung der kommerziell erhältlichen Funktionalitäten des Anforderungsmanagement-Werkzeugs DOORS zur Verfügung.

Die erstellten Funktionsmodule können durch einfaches Einfügen in die entsprechenden Programmpfade auf jeder Arbeitsstation flexibel installiert werden. Dadurch konnten im Rahmen dieser Arbeit erste Funktionalitäten zur Integration des Anforderungsmanagements in die mechatronische Entwicklung realisiert werden. Wie schon in Kapitel 3 beschrieben, ist die Anwendung der vorgestellten Methode unabhängig von dem eingesetzten Rechnerwerkzeug. Wesentlich ist stets das Ergebnis der Analyse der vorhandenen Software-Landschaft in dem entsprechenden Unternehmen.

5 Anwendungsbeispiel

In diesem Kapitel wird anhand eines Beispiels aus der industriellen Praxis die vorgestellte Anlagenstrukturierung dargelegt sowie die Definition und Zuordnung von Anforderungen an einem konkreten Beispiel beschrieben.

5.1 Lastenheftmanagement bei einem Anlagenbetreiber

Um die Vielseitigkeit der vorgestellten Methode zu zeigen wurde ein System aus der Produktion von Lebensmitteln verwendet. Mit einem großen deutschen Hersteller von Molkerei-Erzeugnissen wurde ein Projekt zur Lastenheftstrukturierung durchgeführt. Neben den Molkerei-Produkten sind auch die Herstellung der Verpackungen sowie die Transport-Logistik Teilbereiche der Unternehmensgruppe.

5.1.1 Ausgangssituation

Der Betreiber mechatronischer Anlagen aus dem Bereich der Lebensmittelverarbeitung konnte seine Umsatzzahlen in den vergangenen fünf Jahren um über 50 % steigern. Der Hauptsitz in Bayern ist nach dem Erwerb eines ostdeutschen Werkes nur mehr der zweitgrößte Produktionsstandort der Unternehmensgruppe. Es existieren zwei weitere Produktionsstandorte in Deutschland sowie ein Werk in England. Diese starke Expansion wird nach aktuellen Prognosen auch in den kommenden Jahren anhalten. So war für das folgende Jahr bereits eine Erweiterung des Standortes in Ostdeutschland um ein weiteres Verpackungs-Werk geplant. Für diese Erweiterung der Fertigungskapazitäten werden in so genannten technischen Investitionsprojekten Aufträge an Anlagenhersteller vergeben. Grundlage dieser Aufträge sind die von dem Anlagenbetreiber erstellten Lastenhefte.

Die Lastenhefte werden an den verschiedenen Standorten basierend auf den jeweils dort vorhandenen Erfahrungen in vorangegangenen Projekten erstellt. Den Auftragnehmern werden neben den projektspezifischen Informationen auch der umfangreiche Werkvertrag (in dem u. a. die allgemeinen Geschäftsbedingungen festgehalten sind) und die für einzelne Standorte existierenden Richtlinien übergeben. Um das Vorgehen zur Erstellung von Lastenheften unternehmensweit zu vereinheitlichen, wurde in der Zentralabteilung Technik die Funktion des zentralen Lastenheftmanagements eingerichtet. Aufgabe dieser neu installierten Funk-

tion ist das Zusammenfassen, Modularisieren und Vereinheitlichen der Anforderungs-Informationen in der gesamten Unternehmensgruppe.

5.1.2 Problemstellung

Bei der Erstellung und Vergabe von Lastenheften kommt es immer wieder zu Inkonsistenzen zwischen den einzelnen Anforderungen. Für die Ersteller der Lastenhefte sind solche Widersprüche auf Grund des großen Umfangs der Dokumente und des hohen terminlichen Drucks für die Erstellung nicht oder nur schwer zu entdecken. Für den Auftragnehmer, also den Hersteller des mechatronischen Systems Produktionsanlage auf der anderen Seite ist nicht ersichtlich, welche der Anforderungen Priorität haben und welche irrtümlich in das Lastenheft aufgenommen wurden.

Hinzu kommt eine in der Unternehmensgruppe nicht einheitliche Dokumentation vorangegangener Ausschreibungen und Lastenhefte, weshalb ein neuer Projektbearbeiter große Schwierigkeiten bei der Suche nach den relevanten Informationen hat. Auch Erfolgsbeispiele werden nicht einheitlich und konsequent dokumentiert. Die Gefahr, in einem neuen Projekt den gleichen oder ähnliche Fehler zu begehen, wie in einem anderen vorangegangenen Projekt, wird durch eine fehlende Dokumentation unnötig erhöht.

Durch das nicht einheitlich definierte Vorgehen zur Erstellung der Lastenhefte haben diese auch je nach Erfahrung des Bearbeiters eine jeweils unterschiedliche Qualität und Detaillierung, wodurch auch die Qualität der vom Anlagenhersteller verfassten Pflichtenhefte direkt beeinflusst wird.

Für die Unternehmensgruppe können sich dann bei der Ab- und Inbetriebnahme der Anlage, also erst gegen Ende des technischen Investitionsprojektes, Probleme aus der unabgestimmten Anforderungsstellung ergeben. Durch eine Aufnahme aller verfügbaren Informationen in das Lastenheft kann zwar rechtlich die Nachbesserung aller gewünschten Funktionalitäten ohne zusätzliche Kosten eingefordert werden, die tatsächliche Inbetriebnahme und der Produktionsbeginn werden allerdings dennoch verzögert. Diese Verzögerung kann im schlimmsten Fall einen späteren Markteintritt mit einem neuen Produkt und damit verbunden ausgesprochen hohe Einbußen bei der Marktdurchdringung bis hin zum Verlust der Marktführerschaft verursachen.

5.1.3 Zielsetzung

Auf Grund der geschilderten Problemstellung sollte die Lastenhefterstellung für mechatronische Anlagen

- vereinfacht und
- vereinheitlicht

werden.

Grundlage für eine weitestgehend redundanzfreie Formulierung der Lastenhefte ist eine modulare Ablage der vorhandenen relevanten Informationen. Um die Qualität der Lastenhefte unternehmensweit sicher zu stellen, war die Einführung eines Standards für die Lastenhefterstellung notwendig.

Ziel dieses Projektes war deshalb die Erarbeitung und Einführung eines Standards für die Erstellung von Lastenheften bei dem Unternehmen. Die dabei verwendete Strukturierung der Informationen sollte einen allgemein gültigen Teil, der für alle Lastenhefte identisch ist, und einen modular hierarchisierten Teil, welcher nach einer an die Ansprüche der gesamten Unternehmensgruppe angepassten Struktur ausgelegt ist, enthalten.

Um den Aufwand und dadurch auch die notwendige Zeit für die Erstellung eines Lastenheftes zu verringern, ist die Einführung einer modularen, unternehmensweit gültigen Vorlage für ein Lastenheft eine effektive Maßnahme.

Die Teile des Lastenheftes werden anhand der bei der Unternehmensgruppe vorliegenden Anlagenstruktur gegliedert. Dabei werden alle möglichen Bestandteile einer Anlage vollständig erfasst und nach den verschiedenen Fachbereichen strukturiert. Die daraus entstehenden Module werden hierarchisch angeordnet und als Referenzvorlage abgelegt. Mit Hilfe einer solchen Standardisierung können Lastenhefte zukünftig effizienter erstellt und systematisch auf Vollständigkeit überprüft werden.

Es sollte zudem eine Methodik erarbeitet werden, die eine Lastenhefterstellung für mechatronische Standard- und Neuprodukte ermöglicht. Diese wurde auf Basis einer Analyse der derzeitigen Prozesse der Lastenhefterstellung bei der Unternehmensgruppe und des Standes der Forschung und Technik in diesem Bereich entwickelt. Die Ergebnisse sollten unter anderem in kommerzielle DV-Systeme integriert werden können.

Mit Hilfe dieser Methoden können Lastenhefte systematisch erstellt und damit klar und vollständig dokumentiert werden. Weiterhin erlaubt die Methode eine einfache Anpassung von Lastenheften an sich ändernde Eingangsinformationen und trägt damit zur Effizienzsteigerung bei der Projektabwicklung bei.

5.1.4 Analyse der Anlagenstrukturen

Neben den zu Projektbeginn zur Verfügung gestellten Informationen zum Prozess sowie den Inhalten der Lastenhefterstellung wurden zur Analyse der Anlagenstruktur Interviews mit Vertretern der einzelnen produktbezogenen Fachbereiche geführt. Ziel dieser Interviews war eine detaillierte Strukturierung der jeweiligen fachbereichsspezifischen Anlagen sowie eine allgemeine Strukturierung und Einordnung des einzelnen Fachbereichs in die Produktionsstruktur in einem Werk.

Das Ergebnis eines dieser Interviews war z. B. die in Abbildung 41 dargestellte Strukturierung des Bereichs „Frucht“, der sich wiederum in den Fachbereich „Verfahrenstechnik“ einordnen lässt.

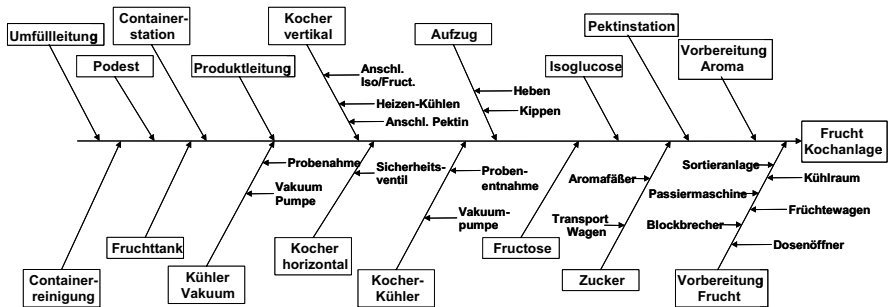


Abbildung 41: Beispiel für ein entwickeltes Fischgrätendiagramm zur Strukturierung der Fruchtkochanlage

5.1.5 Analyse der Anwendungsfälle

Ein weiterer wesentlicher Inhalt der Analysephase war die Analyse der für die Nutzung der Lastenheft-Struktur möglichen Anwendungsfälle. Hierbei wurden zunächst als mögliche Nutzer der Lastenheft-Vorlage folgende Personengruppen identifiziert:

- Projektverantwortliche,
- Bereichsverantwortliche,
- Betreiber (Feedback zu Ausführung und Funktion) und
- das zentrale Lastenheftmanagement.

Dabei sollten die Projektverantwortlichen in erster Linie die Vorlage entsprechend der jeweiligen Projekterfordernisse befüllen können. Für die Bereichsverantwortlichen sollte die Lastenheft-Vorlage eine Checkliste darstellen, anhand derer schnell und einfach die wesentlichen Merkmale des Projektes bzw. des mechanischen Produktionssystems überprüft werden können. Die Betreiber der projektierten Anlage sollten durch ihren Zugriff auf die Lastenheft-Vorlage qualitative oder funktionale Änderungen für weitere Lastenhefte rückmelden können. Als übergeordnete Verwaltungseinheit sollte das zentrale Lastenheftmanagement schließlich die Vorlage stetig weiter verbessern können.

Für diese Personengruppen bestehen die folgenden möglichen Anwendungsfälle:

- Überarbeitung und Pflege
- Erstellen eines Lastenhefts für ein technisches Investitionsprojekt
- Extrahieren von Informationen aus der Lastenheftvorlage

Für die *Überarbeitung und Pflege* der Lastenheft-Vorlagen ist in erster Linie das zentrale Lastenheftmanagement verantwortlich. Die Lastenheft-Struktur sollte nur von dieser zentralen Stelle veränderbar sein, da diese Veränderung im vollen Umfang nur hier abgeschätzt werden kann. Für die Überarbeitung und Pflege der Lastenheft-Inhalte hingegen sollten die Rückmeldungen aus den einzelnen Projekten genutzt werden und für einzelne Bereiche Verantwortliche festgelegt werden, die schnell, flexibel und mit einem ausreichenden thematischen Bezug auf Änderungswünsche aus den Projekten reagieren können. Die Änderung der Standards im Unternehmen sollte wiederum nur vom zentralen Lastenheftmanagement in der Lastenheft-Vorlage eingepflegt werden.

Der wichtigste Anwendungsfall der Lastenheft-Vorlage ist das Erstellen *eines Lastenhefts für ein technisches Investitionsprojekt*. Für die Projektverantwortlichen ist es dabei wichtig, zwischen einem Lastenheft für eine Gesamtanlage, eine Teilanlage oder lediglich für eine Komponente unterscheiden zu können. Das Erstellen eines entsprechenden Lastenhefts muss möglichst einfach sein und durch die Strukturierung der Vorlage unterstützt werden.

Für die Einbindung der Lastenheftvorlage nicht nur in den Investitionsprozess, sondern auch in die anderen Unternehmensprozesse ist das *Extrahieren von Informationen aus der Lastenheftvorlage* ein wichtiger Anwendungsfall. Dabei müssen die Anforderungen, die für einen bestimmten Fachbereich allgemeine Gültigkeit haben, direkt ausgelesen werden können. Ebenso wichtig ist es, den verschiedenen Abteilungen Zugriff auf eventuell geltende (Sonder-)Anforderungen an eine Anlage oder Komponente für ein bestimmtes Werk zu geben. Für den Bereich der Instandhaltung schließlich ist die Möglichkeit einer Ausgabe von Ersatzteil- bzw. Stücklisten äußerst wichtig.

Aus diesen Anwendungsfällen ergaben sich die wesentlichen Anforderungen an Prozess und Struktur.

5.1.6 Anlagenstruktur und Strukturvorlage

In einem Workshop wurden verschiedene Strukturierungsvarianten für die allgemeinen Anforderungen sowie für die fachbereichsspezifischen Anforderungen vorgestellt und gemeinsam bewertet. Auf Grund dieser von allen Teilnehmern durchgeführten Bewertung wurde für die Ablage von allgemeinen Anforderungen an mechatronische Produktionsanlagen die Variante „*Eindeutige Cluster*“ und für die Ablage von fachbereichsspezifischen Anforderungen die Variante „*Poolansatz*“ ausgewählt. Da nur diese beiden Strukturierungsvarianten weiter verwendet wurden, werden sie im Folgenden näher beschrieben.

5.1.6.1 Struktur für allgemeine Anforderungen

Die in Abbildung 42 dargestellte Struktur für allgemeine Anforderungen an neue Anlagen wurde als „*Eindeutige Cluster*“ bezeichnet. Sie hat als wesentliches Merkmal, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, die getrennte und hierarchische Platzierung der allgemeinen Anforderungen im Lastenheft.

Das bedeutet, dass allgemeine Anforderungen, die alle Anlagen oder Einrichtungen betreffen, sich nur in der obersten Ebene wiederfinden und damit getrennt von den mechatronischen Anforderungen einzelner Bereiche sind. Die hier abgelegten Informationen sind damit in jedem Fall Teil eines Lastenheftes. Allgemeine Anforderungen für die verschiedenen identifizierten Aufgabenbereiche im Unternehmen (Abfülltechnik, Verfahrenstechnik, etc.) sind nur in den „Ästen“ dieser Bereiche abgelegt. Diese „Äste“ können je nach Bedarf ausgewählt werden oder nicht. Allgemeine Anforderungen – meist technischer Art – zu Teilsystemen oder einzelnen Komponenten sind genau nur diesen Teilsystemen oder Komponenten zugeordnet.

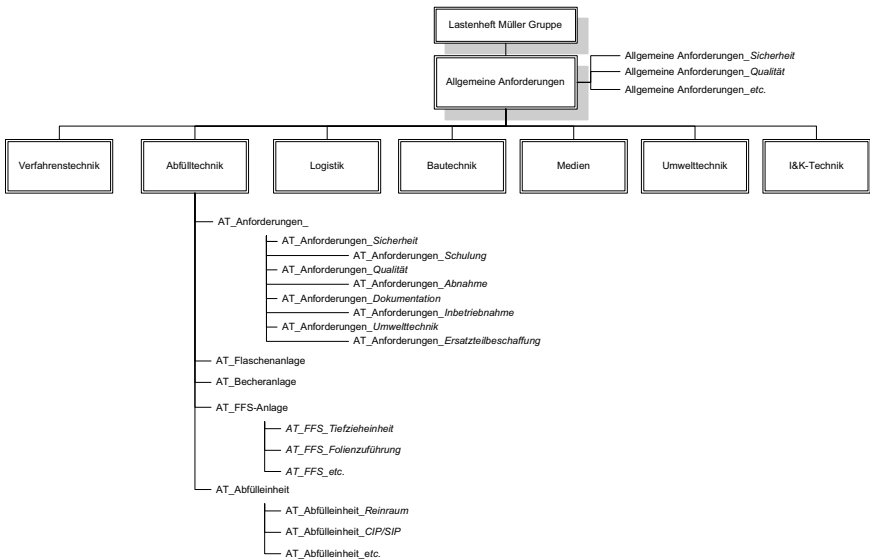


Abbildung 42: Strukturierungsvorgehen „Eindeutige Cluster“

5.1.6.2 Struktur für fachbereichsspezifische Anforderungen

Die in Abbildung 43 dargestellte Variante „Poolansatz“ wurde für die Ablage von Anforderungen, die einen speziellen Fachbereich betreffen, ausgewählt. Sie verfeinert die Strukturierung der allgemeinen Anforderungen in den einzelnen Ästen.

Ein wesentliches Merkmal bei dieser Ablage- und Darstellungsart der Informationen für ein Lastenheft ist, dass für den Benutzer bzw. Ersteller des Lastenheftes lediglich eine Sichtweise auf alle für ihn relevanten Informationen besteht. Dies wird dadurch erreicht, dass Spezifikationen, die für mehrere Systeme (Anlagenkomplexe) relevant und gültig sind, in einem so genannten *Pool* abgelegt werden. Dieser *Pool* ist für den Ersteller des Lastenheftes nicht sichtbar (vgl. rechten „Ast“ in Abbildung 43).

Der Pool dient dazu, redundante Datenhaltung zu vermeiden und eine größtmögliche Datenkonzentration zu erhalten. Ebenso wie für die Strukturierung der allgemeinen Anforderungen gilt auch hier, dass Spezifikationen, die nur für das jeweilige System (Anlagenkomplex) gelten, direkt dem System zugeordnet werden. Dabei ist die hierarchische Zuordnung der Informationen im Pool unabhängig von der in den einzelnen Anlagenkomplexen verwendeten Hierarchieebene. Das heißt, dass Anforderungen aus dem Pool in verschiedenen Lastenheften abhängig von dem jeweiligen Zusammenhang an unterschiedlichen Stellen eingebunden werden können.

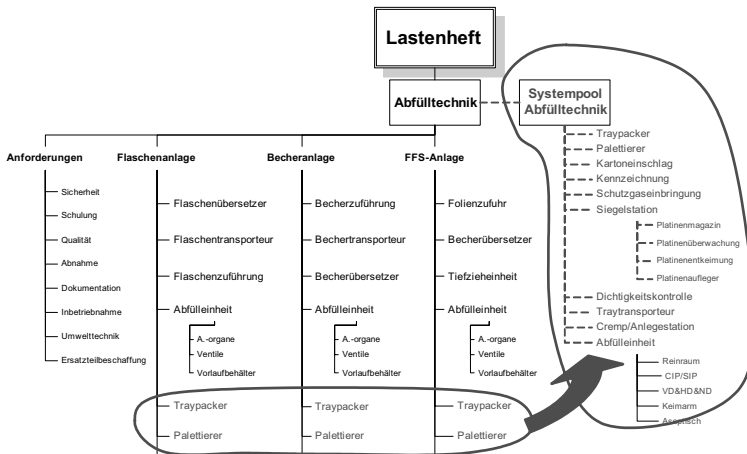


Abbildung 43: Darstellung der Informationen im „Poolansatz“

5.1.6.3 Umsetzung der Struktur

Für eine schnelle und einfache Umsetzung der ausgewählten Strukturvarianten wurden Haupt- und Filialdokumente im unternehmensweit eingesetzten Doku-

ment-Bearbeitungssystem (Microsoft Word) in einer Ordnerstruktur angelegt. Hauptdokumente enthalten dabei die gemäß Abschnitt 3.2.2.1 entwickelte Struktur sowie entsprechende Verknüpfungen zu den einzelnen Filialdokumenten. Die Filialdokumente beinhalten die konkreten technischen Informationen bzw. Anforderungen, die jedem einzelnen Bereich direkt zugeordnet worden sind.

Diese Vorgehensweise ermöglichte auch die redundanzfreie Aufnahme und Integration der Inhalte der bereits bestehenden Standards aus einem Teilbereich der Unternehmensgruppe.

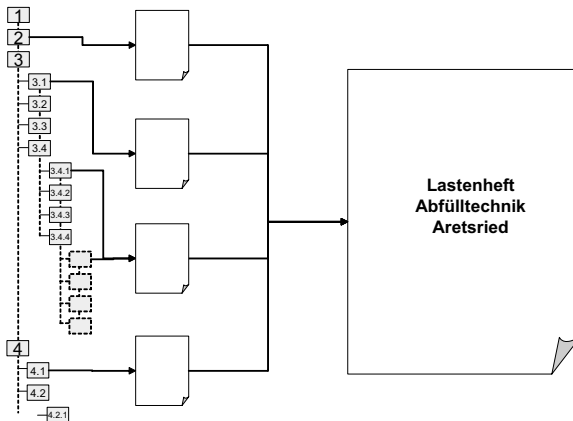


Abbildung 44: Darstellung der variablen Einbindung von Inhalten aus der Ordnerstruktur in das erstellte Lastenheft

Abbildung 44 zeigt die prinzipielle Funktionsweise der Haupt- und Filialdokument-Struktur zur Erstellung eines speziellen Lastenheftes. In der Struktur des Hauptdokumentes (links) werden die Bereiche ausgewählt, die für ein spezielles Lastenheft notwendig sind. Durch entsprechende Verknüpfungen mit dem Hauptdokument werden aus den Filialdokumenten (Mitte) lediglich die für den jeweiligen Fachbereich oder das jeweilige Werk zutreffenden Inhalte in dem Lastenheft (rechts) zusammengefasst.

In diese Strukturierung wurden die Ergebnisse der Interviews zur Anlagenstruktur aufgenommen, so dass alle relevanten Anlagenbereiche abgebildet sind und damit eine Struktur für die Einordnung aller mechatronischer Anforderungen an die Produktionsanlagen ermöglicht wird.

5.1.7 Prozesse im Lastenheftmanagement

Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, ist es zusätzlich zu der Strukturierung der Anlagen und der Erstellung einer Vorlage notwendig, die Anforderungshandhabung in die Unternehmensprozesse zu integrieren.

Die in diesem Anwendungsbeispiel entwickelten Prozesse werden durch die Attribute

- Input,
- Owner,
- Aktivitäten und
- Endprodukte

gekennzeichnet.

Der Input beschreibt Dokumente, Vorlagen oder Zustände, die für den Ablauf des Prozessschrittes notwendig sind. Der Owner ist der Bearbeiter bzw. Verantwortliche für den jeweiligen Prozessschritt. In den Aktivitäten werden die durchzuführenden Aufgaben beschrieben. Endprodukte sind wiederum Dokumente oder Zustände, die nach vollständiger erfolgreicher Durchführung des Prozessschrittes vorliegen.

5.1.7.1 Integration in den Prozess „Technisches Investitionsprojekt“

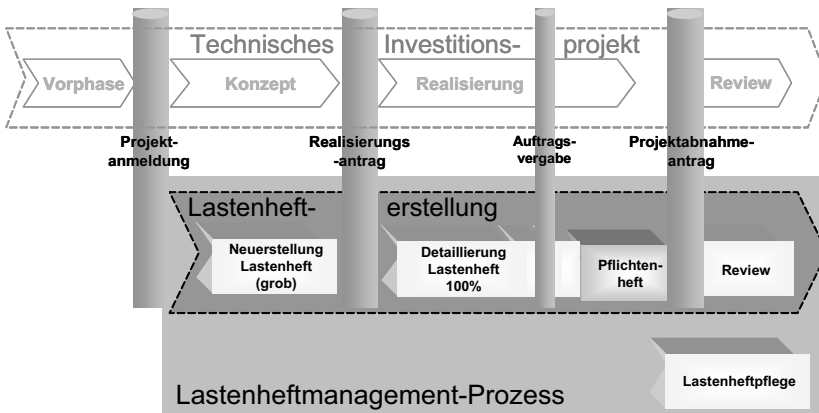


Abbildung 45 Der Lastenheftmanagement-Prozess mit Verknüpfung zum Prozess „Technisches Investitionsprojekt“

Für die Integration des Lastenheftmanagements für mechatronische Anlagen in den im Unternehmen bereits definierten Prozess "Technisches Investitionsprojekt" werden die für diesen Prozess definierten Meilensteine genutzt. Wie in Abbildung 45 dargestellt, beginnt der Lastenheftmanagement-Prozess in der Konzeptphase. Bis zu dem Meilenstein des Realisierungsantrags muss nicht nur die zu dem Lastenheft gehörende Checkliste in dem entsprechenden Teil abgearbeitet sein, sondern auch die erste grobe Version des Lastenheftes erstellt sein.

Bis zur Auftragsvergabe muss das Lastenheft dann in seiner endgültigen Version vorliegen, da auch erst auf Grund des vollständigen Lastenheftes (LH) vom Lieferanten ein vollständiges Pflichtenheft angefertigt werden kann.

Der Lastenheftmanagement-Prozess endet aber nicht mit der Fertigstellung eines Lastenheftes, sondern beinhaltet auch eine Prüfung nach dem Projektabschluss. Diese Phase des Lastenheftmanagement-Prozesses ist von besonderer Wichtigkeit für die Lastenheftpflege, da in dieser von den einzelnen Projektbearbeitern aktuelle Informationen, Änderungswünsche und neue Standards abgefragt werden können.

5.1.7.2 Prozess zur Lastenhefterstellung

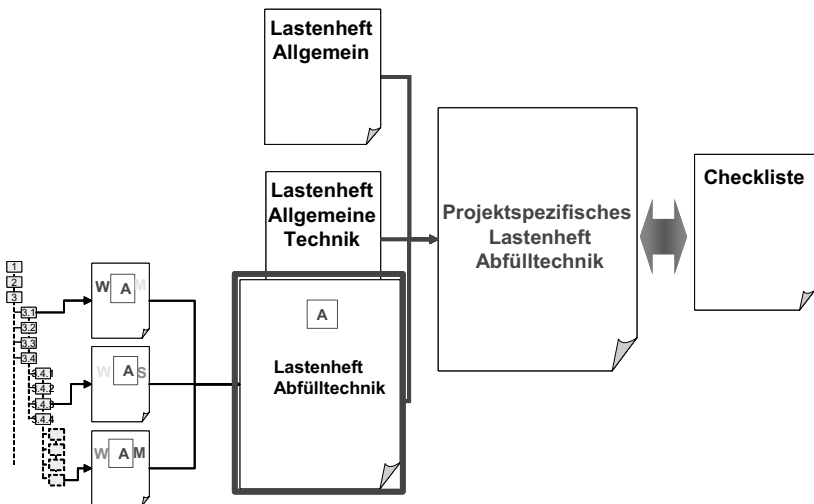


Abbildung 46: Darstellung der Teile eines Lastenheftes und der Verknüpfung mit einer mit dem Prozess korrespondierenden Checkliste

Der Prozess zur Lastenhefterstellung wird durch eine Checkliste unterstützt. Diese Checkliste beinhaltet Fragen und Aufgaben, die nach den verschiedenen Phasen des LH-Management-Prozesses gegliedert sind. Die Zusammenführung der einzelnen Teile des Lastenheftes und die Korrespondenz mit der Checkliste sind in *Abbildung 46* grafisch dargestellt.

Der Prozess zur Erstellung eines Lastenheftes gliedert sich in die drei Phasen

- Neuerstellung eines Groblastenheftes,
- Detaillierung des Lastenheftes und
- Projektreview.

Das Pflichtenheft wird vom Auftragnehmer erstellt und beinhaltet eine Beschreibung der geplanten Umsetzung der im detaillierten Lastenheft definierten Anforderungen.

Die Bearbeiter, Aufgaben und Dokumente, die zu jedem dieser Prozessschritte gehören, sind in *Abbildung 47* dargestellt.

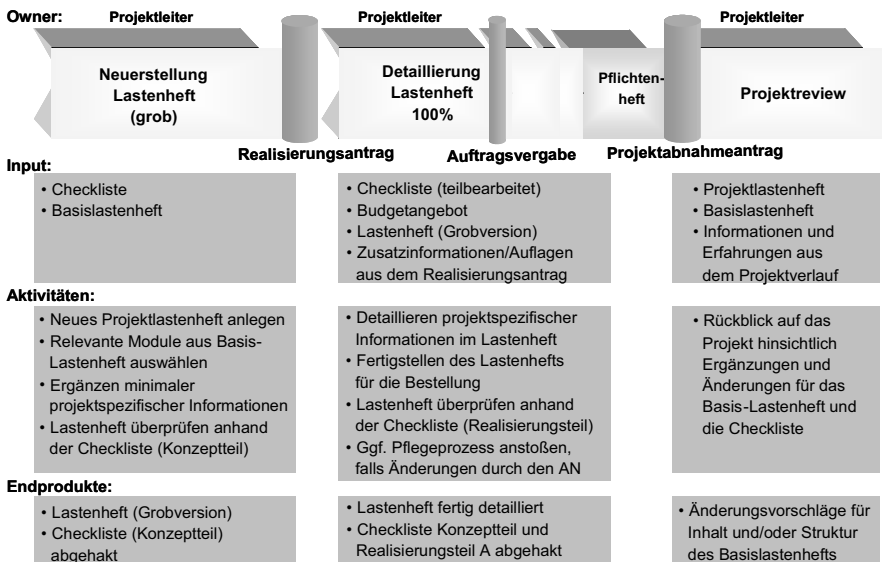


Abbildung 47: Prozess der Erstellung eines Lastenheftes

5.1.7.3 Prozess zur Lastenheftpflege

Damit die entwickelte Lastenheftvorlage stets aktuell und optimal nutzbar ist, wurde zusätzlich zu dem Prozess der Lastenhefterstellung ein Prozess zur Lastenheftpflege definiert.

Für die Durchführung dieses Prozesses ist die Definition von Bereichsverantwortlichen für die einzelnen Fachbereiche notwendig. So können Änderungsvorschläge aus den einzelnen Projekten inhaltlich geprüft und in die Lastenheftvorlage aufgenommen werden.

Für eine Anpassung der Lastenheftstruktur oder der Checkliste ist das zentrale Lastenheftmanagement zuständig. Dieses beruft auch in regelmäßigen Abständen Treffen der Bereichsverantwortlichen ein, um so dem Prozess der Lastenheftpflege einen kontinuierlichen Rahmen zu geben.

Die einzelnen Prozessschritte und deren Inhalte sind in Abbildung 48 dargestellt.

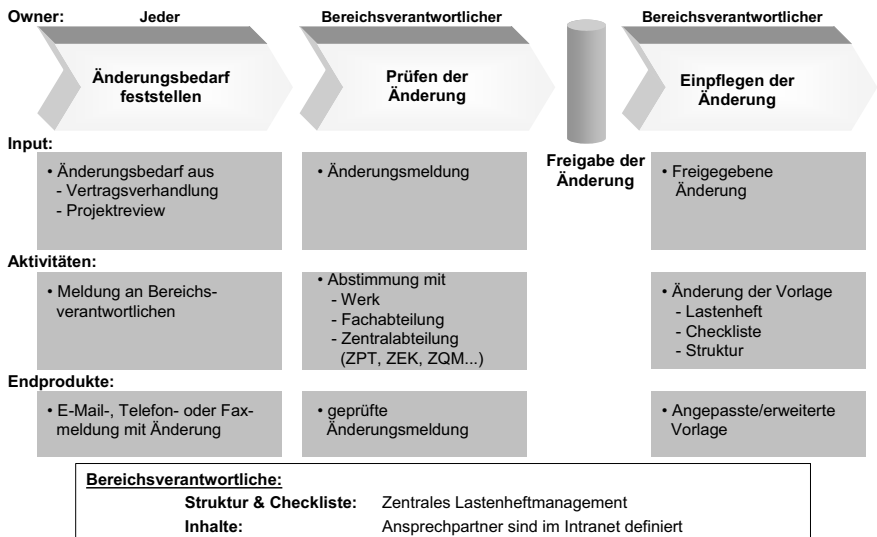


Abbildung 48: Prozess der Lastenheftpflege

5.1.8 Zusammenfassung

Entsprechend der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise wurden die in der Unternehmensgruppe des Partners aus der Molkerei-Industrie vorhandenen mechatronischen Anlagen analysiert und daraus eine Struktur für die Ablage aller Anforderungen in „Technischen Investitionsprojekten“ entwickelt. Bereits verfügbare Inhalte wurden für allgemeine Definitionen und Richtlinien in der Struktur abgelegt und zur Ergänzung von Details im Bereich der Verfahrenstechnik verwendet.

Wie in Abschnitt 3.5 erläutert, wurde vor einer rechnerischen Umsetzung die Software-Landschaft analysiert. Auf der Basis von Microsoft-Word wurde danach eine Dokumentenstruktur mit der Funktionalität der internen Verknüpfung von Anforderungen aus einem Pool in den jeweiligen fachspezifischen Bereich der Struktur umgesetzt. Um eine einfache Handhabung der Struktur und der Inhalte zu gewährleisten, wurden alle zu einem Fachbereich gehörenden Informationen in einem Dokument zusammengefasst, so dass für die Erstellung eines Lastenheftes lediglich die Dokumentvorlage, der allgemeine Teil sowie das jeweilige fachbereichsspezifische Lastenheft zusammengeführt werden müssen.

Durch diese Strukturierung und Vorgehensweise wird das Risiko der Einbindung redundanter oder gar widersprüchlicher Anforderungen, wie in Abschnitt 5.1.2 geschildert, minimiert. Vollständige und widerspruchsfreie Lastenhefte können auf Basis der erstellten Vorlagen von den Projektbearbeitern innerhalb kürzester Zeit erstellt werden. Außerdem erhalten die Anlagenhersteller in den Lastenheften nunmehr übersichtlich strukturiert lediglich die für das betreffende Projekt notwendigen Anforderungen, wodurch das Risiko einer Fehlentwicklung reduziert und eine qualitätsorientierte Entwicklung unterstützt wird.

Der Prozess des Lastenheftmanagements wurde in den im Partnerunternehmen bestehenden Prozess „Technisches Investitionsprojekt“ integriert. Es wurden Prozesse zur Lastenhefterstellung und zur Lastenheftpflege ausgearbeitet. Dadurch ist ein unternehmensweit einheitliches Vorgehen bei der Erstellung eines Lastenheftes definiert und die Qualität der neu erstellten Lastenhefte wird nachhaltig verbessert. Dieses Vorgehen entspricht der in dieser Arbeit in Abschnitt 3.2 beschriebenen Planung und Strukturierung von Anlagen zur Anforderungsaufnahme sowie der in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Datenbasis. Die in MS-Word erstellte Vorlage wurde soweit vorbereitet, dass sie wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, künftig auch in DOORS übertragen werden kann.

6 Bewertung der Vorgehensweise

In diesem Kapitel sollen dem Aufwand für die Einführung und Umsetzung des vorgestellten Vorgehens die gewonnenen Vorteile bei der Projektdurchführung und ganzheitlichen Entwicklung gegenüber gestellt werden.

6.1 Aufwand bei der Einführung und Umsetzung

Zunächst werden die wesentlichen Aktivitäten und Prozessänderungen beschrieben, die für die Umsetzung der vorgestellten Methode notwendig sind. Dabei wird sowohl auf die Erweiterung und Anpassung der Software-Komponenten als auch auf die Integration und Definition des Anforderungsmanagements für den Entwicklungsprozess eingegangen.

Die drei wesentlichen Aktivitäten, die in einem Unternehmen realisiert werden müssen, um die vorgestellte Methodik einzuführen, sind:

- Analyse und Anpassung der Software-Werkzeug-Infrastruktur
- Erstellen der Strukturierungsvorlage und
- Darstellung der Prozesse im Unternehmen.

Die Analyse der Software-Infrastruktur beinhaltet sowohl die Aufstellung aller verwendeten Software-Systeme als auch die Darstellung der notwendigen Verknüpfungen zwischen diesen Systemen untereinander und auch zu dem Anforderungsmanagement-Werkzeug. Je nach Größe und Gliederung des Unternehmens kann diese Analyse innerhalb weniger Tage abgeschlossen sein oder aber mehrere Wochen in Anspruch nehmen. Die Ergebnisse dieser Analyse lassen sich dann aber nicht nur für die Einführung der beschriebenen Methode nutzen, sondern stellen auch eine Basis für andere Software-Integrationen dar.

Inhalt der Anpassung der Software-Infrastruktur ist zunächst die Anschaffung oder Ausweitung eines geeigneten Anforderungsmanagement-Werkzeuges. Wie in dem Anwendungsbeispiel eines Anlagenbetreibers (vgl. Kapitel 5) gezeigt, kann für bestimmte Funktionalitäten auch auf bereits vorhandene Software zurückgegriffen werden, so dass keine zusätzlichen Anschaffungskosten für die Integration eines Anforderungsmanagement-Werkzeuges anfallen. In jedem Fall aber müssen die Schnittstellen zwischen diesem Werkzeug und den anderen Software-Systemen zusätzlich installiert werden. Der hierfür anfallende Aufwand

ist wiederum abhängig von der bestehenden Software-Landschaft und den bereits realisierten Verknüpfungen zwischen den einzelnen Entwicklungswerkzeugen.

Um die Strukturierungsvorlage zu erstellen, ist eine Analyse der bisher realisierten Systeme notwendig. Dazu können alle vorhandenen Projektinformationen genutzt werden. Sinnvoll ist bei der Umsetzung dieser Vorlage die Einbindung sowohl des Vertriebs – der die Vorlage für die Anforderungsaufnahme anwenden soll – als auch der Entwicklung, die durch die Strukturierung der Informationen unterstützt werden soll. Der Aufwand für diese Analyse ist abhängig von der Anzahl der zu berücksichtigenden Systeme und der Organisation der Projektunterlagen. Sind die Informationen beispielsweise verteilt auf verschiedene Medien, ist die Analyse deutlich aufwändiger als für den Fall, dass alle Informationen bereits rechnerisch erfasst und strukturiert abgelegt sind.

Aus dieser Analyse wird eine Systemstruktur abgeleitet (vgl. Abschnitt 3.2.2). Damit kann nun eine Vorlage für die Struktur zur Erfassung der Anforderungen sowie eine Vorlage für die modulare Beschreibung der Anforderungen definiert werden. Die so erstellten Vorlagen müssen in dem Anforderungsmanagement-Werkzeug hinterlegt werden.

Damit das Vorgehen zur strukturierten Anforderungsaufnahme und kontinuierlichen Anforderungshandhabung im Unternehmen von allen Beteiligten gelebt werden kann, muss der dahinter liegende Prozess dargestellt werden. Diese Darstellung muss in die im Unternehmen bereits vorhandenen Prozesse integriert werden, so dass die Abläufe, Zusammenhänge und Meilensteine für alle Beteiligten leicht ersichtlich sind. Auch diese Integration in bestehende Unternehmensprozesse ist abhängig von den im Unternehmen vorhandenen Voraussetzungen.

Der Aufwand für die Einführung dieser Methode lässt sich also ohne die eventuell notwendigen Anschaffungskosten für eine neue Software wie in Tabelle 4 beziffern. Dabei steht die niedrigere Zahl für ein kleines bis mittleres Unternehmen, dessen Prozesse und Software-Landschaft bereits vor Einführung der Methode übersichtlich organisiert sind. Die größere Zahl ist eine Abschätzung für ein mittleres bis großes Unternehmen, dessen Software-Landschaft durch viele verschiedene fachbereichsspezifische Lösungen geprägt ist und dessen Prozesse daher nur schwierig zu vereinheitlichen sind.

Maßnahme	Geschätzter Aufwand in Menschtagen
Software-Analyse	2 – 7
Anpassung der Software-Infrastruktur	2 – 10
Analyse der Systemstrukturen	4 – 15
Erstellen von Vorlagen	2 – 3
Integration in den Entwicklungsprozess	5 – 10
SUMME	15 – 45

Tabelle 4: Aufwand für die Umsetzung der vorgestellten Methode

6.2 Nutzen für die Projekte zur mechatronischen Entwicklung

In den meisten Fällen wird bei angestrebten Änderungen in Prozessen, vor allen Dingen in der entwickelnden und produzierenden Industrie, häufig abwehrend auf das drängende Tagesgeschäft, auf die Projektpläne und die ohnehin nicht ausreichenden Kapazitäten verwiesen.

Das erarbeitete Vorgehen zur strukturierten Aufnahme von Anforderungen lässt sich für alle mechatronischen Systeme anwenden, die einen hohen Investitionsaufwand seitens des Käufers erfordern, also auf direkten Kundenwunsch entwickelt und gefertigt werden und zum anderen für das entwickelnde Unternehmen keine absolute Neuentwicklung darstellen.

Die beschriebene Methode zur kontinuierlichen Anforderungshandhabung erfordert zunächst einen Mehraufwand bei der Planung und Strukturierung des Systems, der im vorangehenden Abschnitt auch beziffert wurde. Allerdings ist dies ein einmaliger Aufwand, der anschließend für alle folgenden Projekte genutzt werden kann und soll. Das bedeutet, dass dem investierten Aufwand ein direkter Nutzen gegenüber gestellt werden kann.

Durch die intensive Auseinandersetzung mit der Systemstrukturierung wird bei allen an der Entwicklung Beteiligten ein gemeinsames Verständnis für das zu entwickelnde System geschaffen. Missverständnisse und Fehlinterpretationen sind damit zwar nicht ausgeschlossen, das Risiko hierfür wird jedoch verringert.

Wie groß die Zeitersparnis aus dieser Verbesserung ist, lässt sich nicht messen und daher auch schlecht beziffern. Allerdings kann auch hier wieder davon ausgegangen werden, dass die Fehlermöglichkeit in einem größeren Unternehmen mit mehr beteiligten Personen höher ist und daher die Zeitersparnis durch Fehlervermeidung ebenfalls höher ist.

Die Angebots- bzw. Vertragsverhandlungsphase kann durch das strukturierte Vorgehen und die leichte Identifizierung von fehlenden Informationen deutlich verkürzt bzw. tatsächlich vor den Fertigungsstart verschoben werden. Damit bietet die Methode nicht nur eine Zeitersparnis am Anfang des Projektes, sondern erlaubt auch eine deutlich strukturiertere Entwicklung, da die Anforderungen nicht erst im Verlauf des Projektes nach und nach geklärt werden müssen, sondern von Anfang an feststehen und als Vertragsgrundlage dienen. Außerdem erlaubt die frühzeitige vollständige Aufnahme der Anforderungen und deren Einbindung in einen definierten Entwicklungsprozess eine sehr genaue Abschätzung über die mögliche Lieferzeit.

Schließlich ist durch den direkten Bezug der Entwicklung auf die Anforderungen sicher gestellt, dass die Wünsche des Kunden umgesetzt werden, wodurch eine erhöhte Kundenzufriedenheit und Qualität zu erwarten ist. Diese Verbesserung macht sich vor allen Dingen in einer verbesserten Kundenbindung und einer gewissen Flexibilität in der Preisgestaltung bemerkbar.

Der Nutzen durch die Anwendung der vorgestellten Methode lässt sich also in folgenden Aspekten ausdrücken:

- Zeitersparnis durch die Vermeidung von Fehlentscheidungen während der Entwicklung
- Zeitersparnis durch die frühzeitige Abstimmung der vollständigen Anforderungen
- Erhöhte Kundenzufriedenheit durch bessere Qualität und Fokussierung auf die Kundenwünsche

Setzt man für die beschriebene Zeitersparnis einen Wert von zwei Menschtagen pro Projekt an, so sind in einem kleinen Unternehmen nur ca. acht Projekte notwendig, bis der Nutzen dieser Methode gegenüber dem investierten Aufwand überwiegt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Ausgehend von den bisherigen Ansätzen zur methodischen Herangehensweise an die interdisziplinäre Entwicklung von Produktionssystemen sowie den Grundlagen und Erkenntnissen der Software-Entwicklung zu einem gezielten, konstruktiven Anforderungsmanagement wurde in dieser Arbeit ein Ansatz für die durchgängige Nutzung von Kundenanforderungs-Informationen entwickelt.

Bei dem Lösungsansatz wurde der zunehmenden Modularisierung der mechatronischen Systeme und Anlagen dadurch Rechnung getragen, dass eine hierarchische, modulare und strukturierte Aufnahme der Kundenanforderungen erfolgt. Die notwendige Vollständigkeit der Anforderungen und die Abstimmung bzw. Priorisierung untereinander wird durch eine vorab angefertigte, funktional verknüpfte Produktstruktur als Checkliste angestrebt.

Die Zielsetzung dieser Arbeit, nämlich die Verbesserung der mechatronischen Entwicklung von Produktionssystemen durch ein integriertes Vorgehen zur Erfassung und Strukturierung von Anforderungen im Entwicklungsprozess, wurde durch die Darlegung der Bedeutung des Anforderungsmanagements und der kontinuierlichen Datennutzung in Unternehmen motiviert (vgl. Kapitel 1).

Aufbauend auf bestehende Ansätze und Lösungen zur Anforderungserfassung und -handhabung, zur mechatronischen Entwicklung, zur entwicklungsbegleitenden Kostenschätzung sowie zur kontinuierlichen Datennutzung in Forschung und Technik (vgl. Kapitel 2) wurde im Hauptteil der Arbeit ein Vorgehen zur kontinuierlichen Nutzung von Anforderungen vorgestellt. Dabei wurden die drei Phasen der planend strukturierenden Vorbereitung, der Anforderungsdarstellung und der durchgängigen Verknüpfung und Nutzung des Vorgehens erläutert sowie ein vom Werkzeug unabhängiges Vorgehen zur Umsetzung in einem Rechnerwerkzeug beschrieben (vgl. Kapitel 3).

Zur Förderung der durchgängigen rechnerunterstützten Entwicklung wurden aus dem beschriebenen Vorgehen resultierende Anforderungen an ein Anforderungsmanagement-Werkzeug abgeleitet. Die Umsetzung einzelner notwendiger Funktionalitäten in dem Anforderungsmanagement-Werkzeug DOORS wurde in Kapitel 4 dargestellt.

Ein Beispiel aus der unternehmensinternen Umsetzung eines Teils der beschriebenen Methode (vgl. Kapitel 5) sowie eine kritische Betrachtung von Aufwand zur Einführung in Gegenüberstellung mit dem resultierenden Nutzen für das Unternehmen (vgl. Kapitel 6) sollen die industrielle Relevanz des behandelten Themas verdeutlichen.

7.2 Ausblick

Die bisher erarbeitete Vorgehensweise stellt eine Basis für ein ganzheitliches, fachdisziplinübergreifendes und nicht nur auf die Mechatronik beschränktes Entwicklungsvorgehen dar, das durch die Vermeidung von Fehlinformation und einen schnelleren Projektablauf die Wirtschaftlichkeit und somit die Konkurrenzfähigkeit produzierender Unternehmen erhöht. Durch das Einbeziehen der Anforderungsaufnahme in den Gesamtprozess wird die Absicherung gegenüber einer Fehlentwicklung erhöht.

Zukünftig muss die mechatronische Modulvorlage der erarbeiteten Methode weiter detailliert und die Möglichkeiten für eine automatisierte Verknüpfung der einzelnen Anforderungsinformationen untereinander überprüft und weiter ausgebaut werden. Zudem sollte die softwaretechnische Integration der Anforderungsdatenbasis mit den im Umfeld mechatronischer Entwicklungsprozesse eingesetzten Analyse- und Berechnungswerkzeugen gefördert werden.

Die direkte Kopplung von Anforderungsinformationen an CA-Tools stellt einen wesentlichen Schritt für künftige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben dar. Aufbauend auf der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Erfassung, Beschreibung und Nutzung von Anforderungen im Entwicklungsprozess kann dies in Zukunft realisiert werden.

Um auch die Nutzung der Methodik weiter vorantreiben zu können, ist die Erprobung und Umsetzung in der Industrie von großer Wichtigkeit. Ein erstes Beispiel dafür bietet das dargestellte Projekt zum vollständig modular aufgebauten Lastenheftmanagement für mechatronische Anlagen mit einem Partner aus der Industrie, in dem die erarbeitete Vorgehensweise verifiziert und weiter entwickelt wurde.

Durch die Anwendung der vorgestellten Vorgehensweise ergeben sich vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen in der Produktionstechnik konkrete Ansatzpunkte für das Erkennen von Einsparpotenzialen im Bereich der Projektorganisation und Systemplanung.

8 Literaturverzeichnis

BAUMANN 1994

Baumann, M.: Anwendungsspezifische Erweiterung von Konstruktions-systemen für geometrisch-gestalterische Tätigkeiten unter Berücksichtigung einer systemneutralen Datenhaltung. Aachen: Shaker 1994. Zugleich Dissertation RWTH Aachen.

BENZ 1990

Benz, T.: Funktionsmodelle in CAD-Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

BITZER 2003

Bitzer, F.: XML im Unternehmen. Bonn: Galileo Computing 2003.

BOEHM 1981

Boehm, B.: Software Engineering Economics. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall 1981.

BOEHM ET AL. 1995

Boehm, B.; Clark, B.; Horowitz, E.; Westland, C.; Madachy, R.; Selby, R.: Cost Models for Future Software Life-cycle Processes: COCOMO 2.0. In: Boehm, B.; Clark, B.; Horowitz, E.; Westland, C.; Madachy, R.; Selby, R.: Annals of Software Engineering Special Volume on Software Process and Product Measurement. Vol 1. Amsterdam: Science Publishers 1995, S. 45 - 60.

BOOCH 2000

Booch, G.: Objektorientierte Analyse und Design. München: Addison-Wesley 2000.

CASPERS 1999

Caspers, R.: Globalisierung der Wirtschaft und Anpassungsdruck in Deutschland. In Apolte, T.; Caspers, R.; Welfens, J.J. (Hrsg.): Standortwettbewerb, wirtschaftliche Rationalität und internationale Ordnungspolitik. Neue Folge Band 20.

CHULANI 1998

Chulani, S.: Software Development Cost Estimation Approaches – A Survey. Los Angeles (California): University of Southern California 1998.

COAD & YOURDON 1996

Coad, P.; Yourdon, E.: Objektorientierte Analyse. 2. Auflage München: Prentice Hall (New York) 1996.

COULOURIS ET AL. 2001

Coulouris, G.; Dollimore, J.; Kindberg, T.: Distributed Systems, Concepts and Design. Harlow: Addison-Wesley 2001.

CSE 2005

Center for Software Engineering:
<http://sunset.usc.edu/research/COCOMOII/cocomo_main.html>
(05.03.2005).

DAENZER ET AL. 1976

Daenzer, W. F. (Hrsg.): Systems Engineering - Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 1976.

DEIFEL ET AL. 1999

Deifel, B.; Hinkel, U.; Paech, B.; Scholz, P.; Thurner V.: Die Praxis der Softwareerhebung: Eine Erhebung, In Informatikspektrum 22, München: Springer 1999.

DEIFEL 2001

Deifel, B.: Requirements Engineering komplexer Standardsoftware. München: Dissertation TU München 2001.

DE MARCO 1978

de Marco, T.: Structured Analysis and System Specification. New York: Yourdon Inc. 1978.

DE MARCO 1989

de Marco, T.: Software-Projektmanagement. Attenkirchen: Wolfram's Fachverlag 1989.

DEUSE 1998

Deuse, J.: Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Produktmodelldaten. Aachen: Dissertation RWTH Aachen 1998.

DONGES & FREYTAG 2004

Donges, J. B.; Freytag, A.: Allgemeine Wirtschaftspolitik. 2.Auflage Stuttgart: Lucius & Lucius, 2004.

DUDEN 1989

Wissenschaftlicher Rat der deutschen Rechtschreibung (Hrsg.): Duden, Deutsches Gesamtwörterbuch in 10 Bänden. Band 7. 2. Auflage Mannheim: Dudenverlag, 1989.

EDER 1994

Eder, T.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme. Berlin: Springer 1994. Zugleich: Dissertation TU München.

EHRENSPIEL 1995

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser 1995.

EHRENSPIEL ET AL. 2007

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. 6. Auflage, Berlin: Springer, 2007.

EIA 1994

EIA/IS 632: Interim Standard: Systems Engineering. Arlington: Electronic Industries Alliance 1994.

EVERSHEIM & DEUSE 1997

Eversheim, W.; Deuse, J.: Gestaltung der NC-Verfahrenskette – Integration marktgängiger DV-Systeme auf der Basis eines featurebasierten Produktdatenmodells. In: VDI (Hrsg.): Features verbessern die Produktentwicklung – Integration von Prozessketten. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, VDI-Berichte 1322, S. 195-214.

FENTON 1998

Fenton, N.E.; Pfleeger, S.L.: Software Metrics: A Rigorous and Practical Approach. London: PWS Publisher 1998.

FINKELSTEIN ET AL. 1992

Finkelstein, A.; Kramer, J.; Nuseibeh, B.; Finkelstein, L.; Goedicke, M.: Viewpoints: A Framework for Integrating Multiple Perspectives in System Development. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, Special issue on 'Trends and Future Research Directions in SEE'. World Scientific Publishing Company Ltd. 2(1) März 1992. S. 31-57.

FLATH ET AL. 2000

Flath, M.; Kespohl, H. D.; Möhringer, S.; Oberschelp, O.: Entwicklung mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, J.; Lückel, J. (Hrsg.): Entwicklungsumgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2000, Bd. 80.

FOWLER & SCOTT 1999

Fowler G., Scott K.: UML konzentriert - Die neue Standard Objektmodellierungssprache anwenden. Bonn: Addison Wesley Longman 1999.

FRYER ET AL. 1952

Fryer, D. H.; Feinberg M. R.; Tomlinson, R. M.: A Guide For Determining Training Aid And Device Requirements. Washington D.C: Office of Naval Research, Special Devices Center 1952.

FUELLE ET AL. 2005

Fuelle, G.; Montero Pineda, M.; Ott, T.: Das XML Kompendium. Tübingen: pagina 2005.

GAUSE & WEINBERG 1993

Gause, D.C.; Weinberg, G. M.: Software Requirements - Anforderungen erkennen verstehen und erfüllen. München: Carl Hanser 1993.

GAUSEMEIER 2002

Gausemeier, J.: Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung. In Proceedings of the 20th CAD-FEM Users' Meeting 2002, 9. bis 11. Oktober.

GERHARD ET AL. 1994

Gerhard, E.; Engelter, A.; Busch, W.; Lowka, D.; Möller, M.; Weber, P.: Kostenbewusstes Entwickeln und Konstruieren. Renningen-Malmsheim: expert 1994, S.11.

GERVASI ET AL. 2004

Gervasi, V.; Zowghi, D.; Easterbrook, S.; Sim, S. E.: Report on The First International Workshop on Comparative Evaluation in Requirements Engineering. ACM SIGSOFT, Software Engineering Notes, Volume 29, Number 2, 2004.

GLINZ 2002

Glinz, M.: Requirements Engineering – Grundlagen und Überblick. Zürich: Institut für Informatik der Universität Zürich 2002.

GLINZ 2003

Glinz, M.: Spezifikation und Entwurf von Software. Zürich: Vorlesungsskript, Wintersemester 2003/04, Institut für Informatik, Universität Zürich 2003.

GRAHAM 1999

Graham, I.: Requirements Engineering and Rapid Development. Essex: ACM Press 1999.

GRANTE 2001

Grante, C.; Williander, M.; Krus, P.; Palmberg, J. O.: An approach for Structuring of Design Specification for Complex Systems by Optimization. In: ICED '01 Vol. 2. Glasgow: ICED 2001, S. 513-520.

HAROLD 2002

Harold, E. R.: Die XML Bibel. Bonn: Mitp 2002.

HARZENETTER 2001

Harzenetter, F.: Synthese von Systemarchitekturen aus funktionalen Anforderungen. München: utz-Verlag 2001. Zugleich Dissertation TU München.

HERTER 1991

Herter, J.: Qualifizierung für flexible Fertigungssysteme. München: Carl Hanser 1991. Zugleich Dissertation TU Berlin.

HOOD 2005

Hood, C.: Optimieren von Requirements Management & Engineering mit dem HOOD Capability Model. Berlin: Springer 2005.

HUBKA 1976

Hubka, V.: Theorie der Konstruktionsprozesse – Analyse der Konstruktivonstätigkeit. Berlin: Springer 1976.

HICKS & CULLEY 2004

Hicks, B. J.; Culley, S. J.: An integrated modelling approach for the representation and embodiment of engineering systems with standard compo-

nents. In Engineering with Computers. London: Springer 2004, Vol. 20: S. 96-113.

IEEE 1984

ANSI/IEEE Std 830-1984: IEEE Guide to Software Requirements Specification. ANSI/IEEE Std 830-1984. Piscataway, New York: IEEE Press 1984.

IEEE 1990

IEEE610.12-1990: IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE Press 1990.

IEEE 1994

IEEE Std 1220-1994: IEEE Trial-Use Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process. Piscataway, NJ: IEEE 1995.

IGENBERGS 1997

Igenbergs, E.: Grundlagen der Systemtechnik. Vorlesungsskript, Fachgebiet Raumfahrttechnik, TU München 1997.

INCOSE 1997

Requirements Working Group of the International Council on Systems Engineering (INCOSE) (Publ.): Interfacing Requirements Management Tools in the Requirements Management Process - A First Look. In: Proceedings of the Seventh International Symposium of the INCOSE. Los Angeles: Requirements Working Group of the International Council on Systems Engineering (Publ.) 1997, Volume II.

INCOSE 2004

International Council on Systems Engineering, 20.04.2004:
<http://www.incose.org/tools/tooltax.html>

ISERMANN 2002

Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Berlin: Springer 2002, 1. korr. Nachdruck.

ISO 10303-212

Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 212: Application protocol: Electrotechnical design and installation 1994.

ISO 1995

International Standard ISO/IEC 12207: Software life cycle processes 1995.

ISO 1998

Technischer Report ISO 15504 (SPICE): Software Process Improvement and Capability Determination 1998.

JACOBSON 1992

Jacobson, I.: Object oriented software engineering. Wokingham: ACM Press 1992.

JÄGER 1991

Jäger, A.: Systematische Planung komplexer Produktionssysteme. *iwb* Forschungsberichte Bd. 31. Berlin: Springer 1991. Zugleich Dissertation TU München.

JENSEN 1983

Jensen, R.: An Improved Macro level Software Development Resource Estimation Model. In: Jensen, R.: Proceedings of the 5th ISPA Conference. St Louis MO: ISPA 1983, S. 88-92.

JONES 1991

Jones, C.: Applied Software Measurement. New York: McGraw Hill 1991.

KALLMEYER 1998

Kallmeyer, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation TU Paderborn 1998.

KLEIN ET AL. 2003

Klein, M.; Sayama, H.; Faratin, T.; Bar-Yam, Y.: The Dynamics of Collaborative Design: Insights from Complex Systems and Negotiation Research. *Concurrent Engineering Research and Applications Journal* 12/3 2003.

KNEUPER 2003

Kneuper, R.: CMMI. Verbesserung von Softwareprozessen mit Capability Maturity Model Integration. Heidelberg: dpunkt.verlag 2003.

KOLLER 1994

Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Berlin: Spriger 1994.

KOTONYA & SOMMERVILLE 2000

Kotonya, G.; Sommerville, I.: Requirements engineering: Processes and techniques. Chichester: Wiley 2000.

KRAUSE & WEBER 1999

Krause, F.-L.; Weber, C.: Features mit System – die neue Richtlinie VDI 2218. In VDI (Hrsg.): Beschleunigung der Produktentwicklung durch EDM/PDM- und Feature-Technologie. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, VDI-Berichte 1497, S. 43-76.

KUHNHENN 1997

Kuhnenn, J; et al.: Parametrik im Produktentstehungsprozess – Möglichkeiten und Risiken. In: VDI (Hrsg.): Neue Generationen von CAD/CAM-Systemen: Erfüllte und enttäuschte Erwartungen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, VDI-Berichte 1357.

LANG & DUGGAN 2001

Lang M., Duggan J.: A Tool to Support Collaborative Software Requirements Management. In Requirements Engineering, London: Springer 2001.

LEE 2001

Lee, A.: Why Use Estimating Software? Can computer-aided estimating software help your shop make money?
<<http://www.microest.com/News&Articles/Why%20Use%20Estimating%20Software.htm>> (05.03.2004).

LEFFINGWELL & WIDRIG 1999

Leffingewell, D.; Widrig, D.: Managing Software Requirements: A unified Approach. Boston: Addison-Wesley Professional 1999.

LERCHER 2002

Lercher, B.: Interdisziplinäre Modellierungstechniken im Werkzeugmaschinenbau. Mechatronik News, Ausgabe 4/2002.

LINDEMANN ET AL. 1999

Lindemann, U.; Freyer, B.; Collin, H.: Practical Computer Support für

-
- Methodical Strategies through Product Information Nets. In: Tanik, M.M.; Ertas, A. (Eds.): Integrated Design Process Technology. Proceedings of the Fourth World Conference on Integrated Design and Process Technology. Dallas: Society for Design & Process Science 1999.
- LINDEMANN ET AL. 2002
Lindemann, U.; et al.: CAD-Praktikum. Unterlagen zum Hochschulpraktikum an der TU München 2002.
- LINDEMANN & MÖRTL 2006
Lindemann, U.; Mörtl, M.: Entwicklungsbegleitende Kalkulation. Unterlagen zur Vorlesung an der TU München 2006.
- MAYER 1999
Mayer, S.: Erfolgsfaktoren für Supply Chain Management nach der Jahrtausendwende. In: Pföhl, H.-C. (Hrsg.): Logistik 2000 plus. Visionen – Märkte - Ressourcen. Berlin: Schmidt 1999. S. 1-22.
- MAZZA ET AL. 1994
Mazza, J.; Fairclough, J.F.; Melton, B.; De Pablo, A.; Scheffer, R.S.: Software engineering standards. London: Prentice Hall 1994.
- MERTINS 1984
Mertins, K.: Steuerung rechnergeführter Fertigungssysteme. München: Carl Hanser, 1984. Zugleich Dissertation TU Berlin.
- MILBERG 1997
Milberg, J.: Produktion – eine treibende Kraft für unsere Volkswirtschaft. In : Reinhart, G.; Milberg, J.: Mit Schwung zum Aufschwung. Münchner Kolloquium 1997. Landsberg/Lech: moderne industrie 1997, S. 19-39.
- MILBERG 2000
Milberg, J.: Unternehmenspolitik im Wandel. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium: ... nur der Wandel bleibt; Münchener Kolloquium 2000, München 16./17.3.2000. München: Utz 2000, S. 311-331.
- MINTERT 2002
Mintert, S. (Hrsg.): XML & Co - Die W3C-Spezifikationen für Dokumenten- und Datenarchitektur, München: Addison-Wesley 2002.
- NGUYEN & SWATMAN 2003
Nguyen, L.; Swatman, P. A.: Managing the requirements engineering

process, Requirements Engineering, Vol. 8, London: Springer 2003. S. 55-68,

OGC 2004

Office of Government Commerce:

<http://www.ogc.gov.uk/sdtoolkit/reference/deliverylifecycle/reqments_mgmt.htm> (5.3.2004).

ORR 1981

Orr, K. T.: Structured Requirements Definition. Topeka: Ken Orr and Associates Inc. 1981.

OVERMYER 1999

Overmyer, S. P.: A Methodology for Constructing user oriented requirement specification for large scale systems using electronic hypermedia: In Requirements Engineering, London: Springer 1999.

PAHL & BEITZ 1993

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendungen. 3. Auflage Berlin: Springer 1993.

PARK 1988

Park, R.: The Central Equations of the PRICE Software Cost Model. Moorestown (NJ): PRICE Systems 1988.

PARTSCH 1991

Partsch H.: Requirements Engineering. München: R. Oldenbourg 1991.

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin: Springer 1982.

PMC 2004

PMC: Project Management Centre

<http://www.pmc.ca/software/index.php?prod=requirements&rm=doors>
(05.03.2004).

POHL 1996

Pohl, K.: Requirements Engineering: An Overview. Aachen: Aachener Informatik-Berichte 1996.

POHL 2005

Pohl, K.: Software Systems Engineering. Fachbereich 6: Mathematik und Informatik 2005; http://pi.informatik.uni-siegen.de/stt/dstg/dstg_UniGH_Essen_Prof_Pohl.html

PRESSMAN 1001

Pressman, R. S.: Software Engineering A Practitioner's Approach. Boston: McGraw Hill 2001.

PUTNAM & MYERS 1992

Putnam, L.; Myers, W.: Measures for Excellence. Upper Saddle River (NJ): Prentice-Hall 1992.

RAY 2004

Ray, E. T.: Einführung in XML. Köln: O'Reilly 2004.

REFA 1987

REFA: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Carl Hanser 1987.

REINHART ET AL. 1995

Reinhart, G.; Beckering, H.; Wagner, P.; Burger, H.-P.; Schiff, A.; Wamser, H.-J.; Drechler, R.; Nölle, G.: Installationstechnik an Werkzeugmaschinen – Analysen und Konzepte, *iwb*-Seminarberichte 9, München: Utz 27. September 1995.

REINHART ET AL. 2001

Reinhart, G.; Anton, O.; Lercher, B.: Funktionsorientiertes Sichtenmodell für die Entwicklung mechatronischer Systeme, VDI-Z Integrierte Produktion, 11/12-2001.

REINHART ET AL. 2001A

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Egermeier, H.; Thieke, S.: Mechatronik. In Enzyklopädie der Wissenschaften. Landsberg: ecomed 2001.

REINHART ET AL. 2001B

Reinhart, G.; Englberger, G.; Guserle, R.: Gesamtheitliche Optimierung der Antriebsmodule von Werkzeugmaschinen mittels CACE- und FEM-Methoden. Tagungsband zum 2. Dresdner WZM-Fachseminar: Dynamik und Genauigkeit der Vorschubantriebe. 7./8. Juni 2001.

REISCHL 2001

Reischl, Ch.: Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase. Dissertation TU München 2001.

RIEGER 1994

Rieger, E.: Semantikorientierte Features zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktentwicklung. Dissertation Universität Karlsruhe 1994.

RODENACKER 1991

Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstruieren. Berlin: Springer 1991.

ROMANOW 1994

Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen. Berlin: Springer 1994. Zugleich Dissertation TU München.

ROTH 1982

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Berlin: Springer 1982.

ROYCE 1970

Royce, W.W.: Managing the Development of Large Software Systems. In: Proceedings of IEEE Wescon. IEEE Computer Society Press 1970, S. 1-9.

RUMBAUGH 1993

Rumbaugh, J.: Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen. München: Carl Hanser 1993.

RUPP 2001

Rupp, C.: Requirements-Engineering und -Management. München: Carl Hanser 2001.

RUPP 2002

Rupp, C.: Requirements-Engineering und -Management. Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis. 2., überarbeitete Auflage. München: Hanser 2002, S. 158-160.

SAP 2004

SAP: Product Design Cost Estimate
<<http://www.sap.com/germany/businessmaps/AE7271124C214A258A0D657A18953DED.htm>> (05.03.2004).

SCHIENMANN 2002

Schienmann, B.: Kontinuierliches Anforderungsmanagement. München: Addison-Wesley 2002.

SCHUH ET AL. 1998

Schuh, G.; Millarg, K.; Göransson, A.: Virtuelle Fabrik: Neue Marktchancen durch dynamische Netzwerke. München: Hanser 1998.

SCHULZ-WOLFGGRAMM 2000

Schulz-Wolfgramm, C.: Neues Denken und Handeln für Innovation und Restrukturierung. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H. (Hrsg.): Nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. Münchner Kolloquium 2000. München: Utz, 2000. S. 41-58.

SHAH & MÄNTYLÄ 1995

Shah, J.; Mäntylä, M.: Parametric and Feature-Based CAD/CAM. New York: Wiley&Sons 1995.

SHLAER & MELLOR 1988

Shlaer, S.; Mellor, S. J.: Object-oriented systems analysis. Englewood Cliffs (NJ): Yourdon Press 1988.

SOMMERVILLE & SAWYER 1997

Sommerville, I.; Sawyer, P.: Requirements Engineering – A Good Practice Guide. Chichester: Wiley 1997.

SPATH ET AL. 1998

Spath, D.; Reidmiller, S.; Scharer, M.: Aufbruch zu neuen Märkten. ZWF-CIM 93 (1998) 1-2, S. 12-14.

SPATH ET AL. 2001

Spath, D.; Baumeister, M.; Dill, C.: Ist Flexibilität genug? Zum Management von Turbulenzen sind neue Fähigkeiten gefragt. ZWF 96 (2001) 5, S. 235-241.

SPRENZEL 2000

Sprengel, A.: Ist Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung. München: Utz 2000. Zugleich Dissertation TU München

SPUR 1982

Spur, G.: Fertigungstechnik. Sonderdruck aus ZWF-CIM, 79, 1982.

SPUR & KRAUSE 1997

Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik. München: Hanser 1997.

STEVENSON 1998

Stevenson R.: System Engineering-Coping with Complexity, London: Prentice Hall 1998.

TELELOGIC 2002

Telelogic AB (Hrsg.): Telelogic DOORSR/ERS-Getting started with DOORS. Malmö: June 2002.

TELELOGIC 2002A

Telelogic AB (Hrsg.): Telelogic DOORSR/ERS-Using DOORS. Malmö: June 2002.

THIEKE 2003

Thieke, S.: Anforderungsstrukturierung für die Planung mechatronischer Produktionssysteme. Mechatronik News, Ausgabe 1/2003.

VAJNA ET AL. 1994

Vajna, S. et al.: CAD/CAM für Ingenieure. Hardware – Software – Strategien. Braunschweig: Vieweg 1994.

VDI 2206

Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Handbuch Konstruktion. März 2003.

VDI 2221

Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Handbuch Konstruktion. November 1986.

VDI/VDE 2422

Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. VDI/VDE-Handbuch Mikro- und Feinwerktechnik. Februar 1994.

VERSTEEGEN ET AL. 2004

Versteegen, G. (Hrsg.); Heßeler, A.; Hood, C.; Missling, C.; Stücker, R.: Anforderungsmanagement. Berlin: Springer 2004.

VONHOEGEN 2005

Vonhoegen, H.: Einstieg in XML. Bonn: Galileo Computing 2005.

WALZ 1999

Walz, M.: Eine Methodik zum semantischen Skizzieren mechanischer Produktvarianten. Aachen: Shaker 1999.

WEBER & WEISBROD 2003

Weber, M.; Weisbrod, J.: Requirements Engineering in Automotive Development: Experiences and Challenges. IEEE Software, IEEE Computer Society 2003.

WENZEL 2005

Wenzel, J.: Die Entwicklung der Systemtheorie. Mainz: Netzwerk Systemische Beratung 2005,
<http://www.systemische-beratung.de/systemtheorie.htm>

WIEGERS 1999

Wiegiers, K. E.: Software Requirements. Redmont (Washington): Microsoft Press 1999.

WIERINGA 1996

Wieringa, R.: Requirements Engineering: Frameworks for understanding, Chichester: John Wiley & Sons Ltd 1996.

WIKIPEDIA 2006

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie: Systemtheorie 2006
<http://de.wikipedia.org/wiki/Systemtheorie>

YPHISE 2002

Yphise: Requirements Management Tools. Software Assessment Report, USA 2002.

ZÄH & THIEKE 2003.

Zäh, M. F.; Thieke, S.: New Methods for Cooperation in Mechatronics – A Requirements Management Approach. CIRP Design Seminar, Grenoble 2003.

ZÄH ET AL. 2002

Zäh, M. F.; Lercher, B.; Thieke, S.: Adaption von Techniken des Software-Engineering für die Mechatronik. In : Konstruktion, 11/12-2002, S. 56-58.

ZÄH ET AL. 2003

Zäh, M. F.; Grätz, F.; Rashidy, H.: An Approach To Simultaneous Development in Machine Tools Industry; International Workshop on Modelling and Applied Simulation 2003, Bergeggi, Italien, S. 128-133, 3. Oktober 2003.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Eichhorn, T.; Grätz, F.; Thieke, S.: Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme. In: VDI-Z, 03/2005, S. 59-61.

Anhang

Software-Verzeichnis

Software	Hersteller	Funktion
CATIA	Dassault Systèmes	Mechanik-CAD
COMOS	Innotec GmbH	Installationsplanung
DOORS	Telelogic	Anforderungsmanagement
PRICE-H	Price Systems L.L.C.	Kostenkalkulation
ProEngineer	PTC	Mechanik-CAD
SEER	Galorath	Kostenkalkulation
Word	Microsoft	Textverarbeitung
XKIS	TU München	Kostengünstig Konstruieren

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klippsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Saverer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrtbe, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuzcek, H.*
Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54078-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung · ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bamm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56689-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationwerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Harthbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionssystemen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rackland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung
in mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systemik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozess mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Präzeorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgleitetete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ins Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen**
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 **Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 76 **Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfur zu aseptischen Ampulle**
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 **ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen**
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 **Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen**
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 **Produktionsmanagement**
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 **Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche**
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 **Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder**
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 **Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement**
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 **Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen**
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 **Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?**
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 **3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau**
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 **Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung**
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 **Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand**
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 **Mechatronik · Vorsprung durch Simulation**
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 **RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten**
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer
Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzorientierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßeer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
 2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
 2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
 2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
 2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfabrbewegungen
 2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
 2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wünsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
 2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
 2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
 2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
 2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
 2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
 2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
 2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
 2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2

