

# **Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme**

**Dissertation**

zur Erlangung des Grades  
Doktor–Ingenieur

der Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr–Universität Bochum

von

**Christian Lippold**

aus Nürnberg

Bochum 2000

Dissertation eingereicht am: 30. Juni 2000  
Tag der mündlichen Prüfung: 20. November 2000

Erster Referent: Prof. Dr.–Ing. E. G. Welp  
Zweiter Referent: Prof. Dr.–Ing. H. Meerkamm

Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik

Heft 00.9

**Christian Lippold**

**Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung  
für die Entwicklung mechatronischer Systeme**

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Lippold, Christian:*

Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme / Christian Lippold.

Aachen : Shaker, 2001

(Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik ; Bd. 2000,9)

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8707-3

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8707-3

ISSN 1616-5497

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# VORWORT DES INSTITUTES

---

Im Unterschied zu Entwicklungsprozessen konventioneller Produkte, die sich häufig partitionieren lassen, erfordert die Entwicklung mechatronischer Systeme ganzheitliche systemübergreifende Sichtweisen, die Beherrschung deutlich erhöhter Komplexität und interdisziplinäre Informationsflüsse, um die Potenziale der beteiligten Ingenieurdisziplinen (Domänen) in der angestrebten Wechselwirkung ausschöpfen zu können. Es bedarf also neuer Denk- und Arbeitsweisen sowie einer deutlich erweiterten Methoden- und Rechnerunterstützung im Produktentwicklungsprozess. Dies gilt insbesondere für die Entwicklungsphase des Konzipierens, in der die Produkteigenschaften und damit der spätere technische und wirtschaftliche Produktwert festgelegt werden. In der Konstruktionspraxis zeigt sich allerdings, dass es gerade für diese Phase an interdisziplinär einsetzbaren Methoden und Systemen mangelt.

Diese Ausgangssituation führte zur Erarbeitung einer domänenübergreifenden Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme, die in dieser Dissertation vorgestellt wird. Mit der Konzeptionsumgebung wird das Ziel verfolgt, interdisziplinären Entwicklungsteams eine gemeinsam nutzbare Methodenbasis an die Hand zu geben und gleichzeitig einen rechnerunterstützten Konzeptionsprozess von der Kreation bis zur Simulation zu ermöglichen.

Basierend auf der Erkenntnis, dass bisherige Entwicklungsprozesse vor allen Dingen durch fachspezifische Handlungs- und Arbeitsweisen geprägt sind, wird hier ein Lösungsansatz aufgezeigt, der es allen am Entwicklungsprozess Beteiligten erlaubt, mit einer einheitlichen Beschreibungssprache mechatronische Konzepte auf den Abstraktionsebenen des Funktions- und Wirkzusammenhangs zu kreieren und diese als gemeinsame Plattform für nachfolgende fachspezifische Modellierungs- und Simulationsziele zu verwenden. Darauf aufbauend wird zur Bewertung von mechatronischen Konzepten ein multipler Ansatz für die Verhaltenssimulation unter Verwendung von Bondgraphen-, Blockschaltbild- und Statechartmodellen konzipiert.

Für die prozessbezogene Umsetzung dieser Methodenbasis wird ein Partitionierungsschema als Bestandteil der Konzeptionsumgebung entworfen, das nicht nur den Entwicklungsprozess gliedert, sondern als Handlungsanleitung von der Konzeptkreation bis zur Konzeptsimulation dienen soll.

Verbunden mit dem Anspruch, dass methodische Lösungskonzepte zukünftig nur noch tragfähig sind, wenn sie auch in Rechneranwendungen überführt werden können, wird in dieser Arbeit ein zukunftsorientiertes Strukturierungs- und Modellierungskonzept auf der Grundlage des objektorientierten Paradigmas vorgestellt. Das Konzept enthält u. a. generalisierte Klassenstrukturen auf deren Basis eine effektive Datenhaltung und Wiederverwendung von mechatronischen Konzepten zu gewährleisten ist.

Die Ergebnisse dieser Dissertation liefern einerseits einen grundlegenden Beitrag zur Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme und andererseits konkrete Anleitungen zur Gestaltung interdisziplinärer Entwicklungsprozesse sowie Konzepte zur Umsetzung der Methoden in rechnerbasierte Entwicklungswerkzeuge für das Konzipieren mechatronischer Produkte und Systeme.

Ewald G. Welp

# VORWORT DES AUTORS

---

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre der Ruhr-Universität Bochum.

Dem Lehrstuhlinhaber, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp, danke ich herzlich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir zugestandene Freiheit bei der Ausrichtung des eigenen Forschungsgebietes.

Außerdem danke ich für die Möglichkeit, mich nicht nur in der eigenen Mechatronik-Forschung, sondern auch im Zuge der Kooperation mit anderen Forschungsgebieten und mit Industrieunternehmen fachlich und persönlich weiterzuentwickeln.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg, bedanke ich mich für sein Interesse an meiner Forschungsarbeit sowie die freundliche Übernahme des Koreferats.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, die nicht nur durch fachliche Diskussion, sondern ebenso durch die gute zwischenmenschliche Atmosphäre in dienstlichen und auch privaten Unternehmungen die Mitarbeiterzeit am Lehrstuhl wesentlich mitgestaltet haben. Besonders hervorheben möchte ich die gute Zusammenarbeit mit Frau Gabriele Verstege, Herrn Klaus Endebrock und Herrn Bernd Güldenbergl.

Unter den Studenten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich Herrn Helge Westerfeld für sein sehr konstruktives und freundschaftliches Engagement besonders danken.

Nicht zuletzt möchte ich ganz herzlich meinen Eltern und Geschwistern Dank sagen. Der größte Dank gilt jedoch meiner Frau Carolin, ohne deren Zugeständnisse und vielfältige Mitwirkung das Gelingen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Christian Lippold

Bochum, im Dezember 2000



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
<b>2</b>	<b>Charakteristika der Konzeption mechatronischer Systeme</b> .....	<b>7</b>
2.1	Klärung des Mechatronik-Begriffs .....	7
2.2	<b>Produktcharakteristika mechatronischer Systeme</b> .....	<b>9</b>
2.2.1	Basismodell mechatronischer Systeme .....	9
2.2.2	Mechatronische Domänen in Komponenten- und Systemsicht und ihre Relationen zum Basismodell .....	10
2.2.3	Differenzierung mechatronischer, heterogener und hybrider Systeme .....	13
2.2.4	Anwendungsbezogene Charakteristika mechatronischer Systeme ..	14
2.3	<b>Prozeßcharakteristika der Konzeptionsphase mechatronischer Systeme</b>	<b>15</b>
2.3.1	Phasenbezogene Einordnung und Bedeutung des Konzipierens im mechatronischen Produktentwicklungsprozeß .....	15
2.3.2	Domänenübergreifende Charakteristika des Problemlösens in der Konzeptionsphase .....	17
2.3.3	Mechatronikspezifische charakteristische Konzeptionstätigkeiten ..	18
2.3.3.1	Partitionierung .....	18
2.3.3.2	Funktionale Integration .....	18
2.3.3.3	Qualitative Beurteilung und Simulation .....	19
2.3.4	Charakteristische Strukturen des mechatronischen Konzeptionsprozesses .....	21
<b>3</b>	<b>Anforderungen an Ansätze zur methodischen rechnerunterstützten Konzeption mechatronischer Systeme</b> .....	<b>23</b>
3.1	<b>Abgrenzung wesentlicher Anforderungskomplexe</b> .....	<b>23</b>
3.2	<b>Abgeleitete Anforderungen in den Anforderungskomplexen</b> .....	<b>23</b>
3.2.1	Anforderungskomplex 1: Ausrichtung auf mechatronische Systeme	23
3.2.2	Anforderungskomplex 2: Ausrichtung auf die Konzeptionsphase ..	25
3.2.3	Anforderungskomplex 3: Ausrichtung auf methodisches Vorgehen ..	25
3.2.4	Anforderungskomplex 4: Ausrichtung auf rechnerunterstütztes Vorgehen .....	27

---

<b>4</b>	<b>Stand der Forschung der methodischen rechnerunterstützten Konzeption mechatronischer Systeme</b> .....	29
4.1	Einleitung und Clusterbildung .....	29
4.2	Allgemeine Problemlösungsmethoden .....	30
4.3	Fokus: Konzeptkreation .....	31
4.4	Fokus: Konzeptdarstellung und -kommunikation .....	37
4.5	Fokus: Konzeptsimulation .....	39
4.6	Zusammenfassendes Fazit zum Stand der Forschung .....	42
<b>5</b>	<b>Die Strategie multipler Konzeption auf der Basis von Funktion, Wirkung und Verhalten mechatronischer Systeme</b> .....	47
5.1	Arbeits- und Geltungsbereich der Konzeptionsumgebung .....	47
5.1.1	Arbeits- und Geltungsbereich .....	47
5.1.2	Vorgehensweise .....	50
5.2	Strategie multipler Konzeption mechatronischer Systeme .....	51
5.2.1	Grundidee .....	51
5.2.2	Tätigkeitskomplemente der multiplen Konzeption mechatronischer Systeme .....	52
5.2.2.1	Allgemeine Tätigkeitskomplemente der multiplen Konzeption mechatronischer Systeme .....	52
5.2.2.2	Spezielle Tätigkeitskomplemente der multiplen Konzeption mechatronischer Systeme .....	55
5.3	Wesentliche Modellbildungs- und Handlungsebenen der multiplen Konzeption mechatronischer Systeme .....	58
5.3.1	Einleitung, Modellbegriff .....	58
5.3.2	Betrachtung von Modellbildungs- und Handlungsebenen im Prozeßbezug .....	58
5.3.3	Die Funktionsebene als domänenübergreifend nutzbare Modellbildungs- und Handlungsebene .....	60
5.3.4	Die Wirkebene als domänenübergreifend nutzbare Modellbildungs- und Handlungsebene .....	61
5.3.5	Die Verhaltensebene als domänenübergreifend nutzbare Modellbildungs- und Handlungsebene .....	63
5.4	Objektorientiertes Paradigma als Strukturierungs- und Modularisierungsansatz .....	64
5.5	Kapitelzusammenfassung .....	66

<b>6</b>	<b>Kreationsorientierte Konzeption mechatronischer Systeme auf der Basis von Funktion und Wirkung</b> .....	69
6.1	<b>Modellbildung und Nutzbarkeit von Konzeptionselementen für die kreationsorientierte Konzeption</b> .....	69
6.1.1	Einführung von Konzeptionselementen für die objektorientierte Modellbildung mechatronischer Konzepte .....	69
6.1.2	Grundlagen der Anwendung von Konzeptionselementen .....	72
6.2	<b>Mehrstufiges mechatronisches Partitionierungsschema</b> .....	76
6.3	<b>Merkmale, Eigenschaften und Klassifizierung von Funktions- und Wirkelementen</b> .....	82
6.3.1	Klassendiagramm für die objektorientierte Modellierung der Konzeptionselemente und ihrer Beziehungen .....	82
6.3.2	Übersicht über die Inhaltsblöcke der Konzeptionselemente .....	85
6.3.3	Merkmale, Eigenschaften und Klassifizierung der Funktionselemente .....	86
6.3.4	Flüsse zwischen Konzeptionselementen .....	89
6.3.5	Merkmale, Eigenschaften und Klassifizierung der Wirkelemente ...	92
6.4	<b>Nutzung der Konzeptionsumgebung für die kreationsorientierte Konzeption</b> .....	96
6.4.1	Nutzung der Konzeptionsumgebung auf der mechatronischen Funktionsebene .....	96
6.4.2	Nutzung der Konzeptionsumgebung im Wechselspiel zwischen mechatronischer Funktions- und Wirkebene .....	100
6.4.3	Nutzung der Konzeptionsumgebung für die domänenübergreifende Konkretisierung von Konzepten auf der mechatronischen Wirkebene .....	106
6.5	<b>Kapitelzusammenfassung</b> .....	111
<b>7</b>	<b>Integrierte kreations- und simulationsorientierte Konzeption auf der Basis von Funktion, Wirkung und Verhalten</b> .....	113
7.1	<b>Erweiterte Modellbildung und Nutzbarkeit der Konzeptionselemente für die integrierte kreations- und simulationsorientierte Konzeption</b> ..	113
7.1.1	Kopplung der Prozeßketten der kreationsorientierten und der simulationsorientierten Konzeption auf der Wirkebene .....	113
7.1.2	Einbindung von Verhaltenselementen in die Modellbildung für die integrierte kreations- und simulationsorientierte Konzeption .....	115
7.1.3	Einbindung von Verhaltenselementen in das Klassendiagramm des Konzeptmodells .....	116
7.1.4	Merkmale und Eigenschaften der Verhaltenselemente .....	116

---

<b>7.2</b>	<b>Ansätze für die simulationsorientierte Modellbildung des Verhaltens mechatronischer Systeme</b>	119
7.2.1	Mechatronikspezifische Problemstellung und Eingrenzung der Simulationsproblematik	119
7.2.2	Bondgraphen als zentraler Ansatz für die simulationsorientierte Modellbildung mechatronischer Systeme	122
7.2.3	Blockschaltbilder als ergänzender Ansatz für die simulationsorientierte Modellbildung mechatronischer Systeme	128
7.2.4	Statecharts als ergänzender Ansatz für die simulationsorientierte Modellbildung mechatronischer Systeme	131
7.2.5	Kombination der simulationsorientierten Modellbildungsansätze	135
<b>7.3</b>	<b>Nutzung der Konzeptionsumgebung für die integrierte kreations- und simulationsorientierte Konzeption</b>	138
7.3.1	Nutzung der Konzeptionsumgebung für den Einstieg in die Verhaltensmodellierung im Konzeptkontext	138
7.3.2	Generieren simulationsfähiger Verhaltensmodelle durch Konkretisierung und Verknüpfung von Verhaltenselementen	142
<b>7.4</b>	<b>Kapitelzusammenfassung</b>	149
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	151
	<b>Literaturverzeichnis</b>	153
	<b>Anhang</b>	161

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1:	Beispiele für mechatronische Systeme der Mikro- und Makrotechnik . . . . .	3
Abb. 1-2:	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
Abb. 2-1:	Ausgewählte Definitionsansätze zum Begriff „mechatronics“ . . . . .	8
Abb. 2-2:	Typischer, prinzipieller Aufbau eines mechatronischen Systems in Form des Basismodells . . . . .	9
Abb. 2-3:	Ausprägungen mechatronischer Domänen; Komponenten- und Systemsicht . . . . .	11
Abb. 2-4:	Ausprägung hierarchischer mechatronischer Basisstrukturen am Beispiel einer Fadenverlegeeinheit . . . . .	12
Abb. 2-5:	Einordnung der Konzeptionsphase nach Hauptarbeitsschritten und -ergebnissen mechatronischer Domänen (in Anlehnung an [Kall98]) . . . . .	16
Abb. 2-6:	Beispiel zur Partitionierungsproblematik . . . . .	19
Abb. 2-7:	Hierarchie paralleler und sequentieller Prozesse im Konzeptionsprozeß mechatronischer Systeme . . . . .	21
Abb. 4-1:	Strategische Produktplanung und Konzipierung mechatronischer Produkte nach Gausemeier . . . . .	33
Abb. 4-2:	Integration von Funktion und Gestalt nach Wallaschek . . . . .	33
Abb. 4-3:	Komponenten des mfk-Assistenzsystems für mechatronische Systeme . . . . .	35
Abb. 4-4:	Schemebuilder Mechatronics . . . . .	36
Abb. 4-5:	MechaSTEP Datenmodell . . . . .	37
Abb. 4-6:	Modellbildung eines einfachen Schwingers als Blockschaltbild . . . . .	40
Abb. 4-7:	CAMel-Beschreibungssprachen und Entwicklungswerkzeuge [Meie97] . . . . .	40
Abb. 4-8:	Modellbildung eines einfachen Schwingers mit Bondgraphen . . . . .	41
Abb. 5-1:	Satz sich ergänzender Tätigkeitskomplemente für die multiple Konzeption mechatronischer Systeme . . . . .	53
Abb. 5-2:	Zusammenführung von Konzeptkreation und -simulation auf Basis multipler Modelle und Methoden . . . . .	55
Abb. 5-3:	Symbolische Veranschaulichung zur Strategie multipler Konzeption mechatronischer Systeme . . . . .	67
Abb. 6-1:	Der Satz von Konzeptionselementen für die objektorientierte Modellbildung mechatronischer Systeme . . . . .	70

Abb. 6-2:	Struktureller Aufbau des Kern-Konzeptmodells aus hierarchisch und nicht-hierarchisch vernetzten Funktions-, Wirk- und Assoziationselementen . . .	71
Abb. 6-3:	Abgrenzung von Inhalt, Interface und Ports der Konzeptionselemente . . .	72
Abb. 6-4:	Modellieren mit Konzeptionselementen am Beispiel eines einfachen Konzeptionspfades . . . . .	74
Abb. 6-5:	Der Konzept-, Scope- und Element-Fokus für die gezielte kontextgemäße Konzeptbearbeitung. . . . .	75
Abb. 6-6:	Partitionierungsschema zur methodischen mehrstufigen Partitionierung mechatronischer Systeme . . . . .	78
Abb. 6-7:	Hierarchische Rekursivität des Partitionierungsprozesses . . . . .	80
Abb. 6-8:	Mechatronikspezifisch durchgängig vorstrukturierte Modellbildungs- und Handlungsebenen . . . . .	82
Abb. 6-9:	Darstellung der obersten Ebenen des Klassendiagramms für hierarchisch und nicht-hierarchisch vernetzbare Konzeptionselemente des Kern-Konzeptmodells . . . . .	84
Abb. 6-10:	Überblick über die Strukturierung der Inhalte der Konzeptionselemente in allgemeine, adaptierte und spezifische Inhaltsblöcke . . . . .	85
Abb. 6-11:	Inhaltsblöcke eines Funktionselementes . . . . .	87
Abb. 6-12:	Klassendiagramm für den Funktionszusammenhang zur Darstellung der Objektklassen, ihrer Vererbungsbeziehungen und Assoziationen (Ausschnitt in OMT-Notation) . . . . .	90
Abb. 6-13:	Klassendiagramm für Flüsse in mechatronischen Systemen . . . . .	91
Abb. 6-14:	Schrittweise Konkretisierung und Abstraktion von Flüssen am Beispiel eines Funktionselementes . . . . .	92
Abb. 6-15:	Inhaltsblöcke eines Wirkelementes . . . . .	92
Abb. 6-16:	Klassendiagramm für den Wirkzusammenhang zur Darstellung der Objektklassen, ihrer Vererbungsbeziehungen und Assoziationen (Ausschnitt in OMT-Notation) . . . . .	95
Abb. 6-17:	Erste methodische Arbeitsschritte im mechatronischen Konzeptionsprozeß auf der Funktionsebene . . . . .	97
Abb. 6-18:	Detailliertes Modellieren von Funktionselementen unter kontextbezogener Verwendung von individuellen und allgemein anwendbaren Funktionselementklassen . . . . .	99
Abb. 6-19:	Modellierung von Konzepten durch Verknüpfung von Funktions- und Wirkzusammenhängen unter Aufbau und Nutzung rechnerbasierter Morphologien . . . . .	100
Abb. 6-20:	Detailliertes Modellieren von Wirkungen durch Wirkelemente auf kontextbezogener Abstraktions- und Aggregationsebene . . . . .	102

---

Abb. 6–21: Gezielte strategische Abstraktion generierter Wirkzusammenhänge zu zugeordneten Funktionszusammenhängen, Aufbau und Nutzung von hierarchischen Lösungsfamilien und Anwendertaxonomien	105
Abb. 6–22: Prototypischer Einsatz eines Datenbanksystems für die Verarbeitung mechatronischer Konzepte auf Funktions- und Wirkebene	107
Abb. 6–23: Beispiele für die Verwendung von Wirkelementen aus Subklassen der Klasse WE.primitiv	109
Abb. 7–1: Kopplung der Prozeßketten der kreationsorientierten und der simulationsorientierten Konzeption auf der Wirkebene	114
Abb. 7–2: Struktureller Aufbau des erweiterten Konzeptmodells aus hierarchisch und nicht–hierarchisch vernetzten Funktions-, Assoziations-, Wirk- und Verhaltenselementen	115
Abb. 7–3: Klassendiagramm zur Anbindung der Klassen der Verhaltenselemente an die Klassen des Kern–Konzeptmodells	117
Abb. 7–4: Inhaltsblöcke eines Verhaltenselementes	118
Abb. 7–5: Bondgraph für einen mechanischen Schwinger mit einem Freiheitsgrad und das analoge elektrische System	125
Abb. 7–6: Klassendiagramm für Bondgraphenelemente	128
Abb. 7–7: Standardelemente für die Modellierung mit Blockschaltbildern	129
Abb. 7–8: Gegenüberstellung der Auswirkung von Kausalitätsänderungen bei der Modellierung mit Blockschaltbildern und Bondgraphen	130
Abb. 7–9: Klassendiagramm für Blockschaltbildelemente	131
Abb. 7–10: Standardelemente für die Modellierung mit Statecharts	133
Abb. 7–11: Modellierung wichtiger Zustände und Zustandsübergänge einer Fadenverlegeeinheit mit Hilfe von Statecharts	134
Abb. 7–12: Klassendiagramm für Statechartelemente	135
Abb. 7–13: Zusammenfassung wesentlicher Merkmale physikalischer, blockorientierter und ereignisorientierter Modelle	136
Abb. 7–14: Unterschiedliche Relevanz von Zuständen und Transitionen bei der Modellbildung auf der Verhaltensebene mechatronischer Systeme	137
Abb. 7–15: Nutzung der Konzeptionsumgebung für das Generieren eines implementierungsfreien Verhaltensmodells in Systemsicht	140
Abb. 7–16: Schrittweise Verfeinerung des Bondgraphenmodells des Antriebsverhaltens	143
Abb. 7–17: Generieren eines simulationsfähigen Verhaltensmodells durch domänenübergreifende Verknüpfung simulationsfähiger Verhaltenselemente	146

Abb. 7-18: Beispiele für Verhaltensmodelle unterschiedlicher Modellbildungsansätze in der Konzeptionsumgebung .....	148
Abb. A-1: Wesentliche Elemente der grafischen OMT-Notation nach [RuBl+93] ...	161
Abb. A-2: Konzeptionsproblem „Fadenverlegung“ eines Spulkopfes: Kurzdarstellung der Aufgabe und Anforderungen .....	163

---

## TABELLENVERZEICHNIS

---

Tab. 2-1:	Differenzierung heterogener, hybrider und mechatronischer Systeme . . . .	14
Tab. 2-2:	Innere und äußere, anwendungsbezogene Charakteristika mechatronischer Systeme . . . . .	14
Tab. 4-1:	Beurteilung der Ansätze nach dem Erfüllungsgrad bezüglich der grundlegenden Anforderungskomplexe . . . . .	43
Tab. 7-1:	Energiebezogene Analogien physikalischer Größen verschiedener Domänen anhand der Leistungsvariablen (e, f) und Energievariablen (p, q) nach [Cell91] . . . . .	123
Tab. 7-2:	Standardelemente für die Modellierung mit Bondgraphen . . . . .	124