Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

Sebastian Jansen

aus Bochum

Bochum 2006

Dissertation eingereicht am: 23.05.2006
Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2006

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp
Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek

Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik

Heft 07.3

Sebastian Jansen

**Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung
mechatronischer Systeme**

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6252-5

ISSN 1616-5497

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Eltern.

VORWORT DES INSTITUTES

Zentraler Bestandteil für erfolgreiche Entwicklungsprozesse mechatronischer Systeme ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Ingenieurdomänen über alle Phasen der Entwicklung hinweg, von der Anforderungsformulierung bis zur Erstellung des virtuellen oder physischen Prototypen. Um derartige Arbeitsprozesse hinsichtlich Durchlaufzeit, Kosten und Qualität effektiv durchführen zu können, müssen Vorgehensweisen, Methoden und IT-Werkzeuge zur Verfügung stehen, die sowohl die domänenübergreifenden als auch die domänenspezifischen Arbeitsinhalte unterstützen. Im Zusammenhang mit diesem Grundverständnis mechatronischer Entwicklungsprozesse sind eine Reihe von Vorgehensweisen und Methodenansätzen entwickelt worden, die anteilig z.B. in der VDI-Richtlinie 2206 standardisierten Charakter erreicht haben. Nicht nur in dieser Richtlinie wird darauf verwiesen, dass in den Phasen des Konzipierens und Entwerfens die Zuweisung von Technologien und Lösungselementen verschiedener Domänen zu den geforderten Teilfunktionen des mechatronischen Systems von entscheidender Bedeutung für den Entwicklungserfolg ist. Diesem Prozessabschnitt des Entwickelns, der als Systempartitionierung (Technology Allocation oder Domain Allocation) bezeichnet wird, widmet sich diese Dissertation.

Das hier entwickelte methodische Konzept der Partitionierung mechatronischer Systeme basiert auf der Erkenntnis, dass einerseits die funktionale und andererseits die räumliche Zuordnung von Wirkprinzipien und Lösungselementen den Systemaufbau maßgeblich bestimmen. Für diese beiden Sichten der Partitionierung wird eine Methodik entworfen, die zum einen Methodenbausteine, wie Vorgehensstrategien, Handlungsanleitungen und Regelwerke umfasst und zum anderen einen heterogenen Modellierungsansatz enthält, mit dem der Entwickler Konzept- oder Entwurfsmodelle bestehend aus Modellelementen mit beliebigem Abstraktions- und Formalisierungsgrad konfigurieren kann. Der besondere Vorteil dieser heterogenen Modellierung liegt darin, dass in die üblicherweise physikalisch-mathematisch aufgebauten Modelle auch so genannte Kontextelemente, die z.B. Fertigungs-, Bedienungs- oder Kostenaspekte beinhalten, eingebunden werden können. Damit wird eine erweiterte Bewertungs- und Entscheidungsgrundlage für die funktionale und räumliche Partitionierung mechatronischer Systeme geschaffen.

Für die konzipierte Partitionierungsmethodik wird dann ein Softwareprototyp vorgestellt, der auf einem objektorientierten Implementierungsansatz beruht. Die Funktionalität dieses Prototyps enthält alle Elemente zur Eingabe, Präsentation, Verarbeitung und Darstellung von Modellelementen und Gesamtmodellen in Verbindung mit einer Datenbasis, die auch Regelwerke zur Beurteilung von mechatronischen Konzepten und Entwürfen enthält. Im Rahmen der Evaluierung der so umgesetzten Partitionierungsmethodik wurde ein multifunktionales Bewegungssystem nach dem biologischen Vorbild der Schlange entwickelt und realisiert, das inzwischen eine bemerkenswerte Resonanz in der Wissenschaft und Industrie erfahren hat.

Mit den Ergebnissen dieser Dissertation wird die methoden- und modellbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme deutlich erweitert und das Potenzial domänenübergreifender Entwicklungsprozesse aufgezeigt.

VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre (LMK) der Ruhr-Universität Bochum. Gefördert wurde die Arbeit von der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch Finanzierung des Projekts “Entwicklung einer Partitionierungsmethodik für mechatronische Systeme”.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp, Inhaber des oben genannten Lehrstuhls, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung, die weit über die Diskussion fachlicher Inhalte hinausging. Die Freiräume, die er mir während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl gewährt hat, haben es mir ermöglicht, mich in das Themengebiet der Mechatronik auf technischer und methodischer Ebene einzuarbeiten und mir wichtige Kompetenzen anzueignen, von denen ich in Zukunft profitieren kann.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek, Leiter der Fachgruppe Mechatronik und Dynamik am Heinz-Nixdorf Institut und Inhaber des entsprechenden Lehrstuhls an der Universität Paderborn, danke ich herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Allen Mitarbeitern des LMK möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Atmosphäre danken. Beides hat dazu beigetragen, dass ich auch in arbeitsintensiven Phasen motiviert bei der Sache war und der Spaß nie zu kurz gekommen ist. Frau Verstege und Frau Wenks danke ich für ihre Arbeit im Sekretariat und die große Hilfsbereitschaft. Hervorheben möchte ich die freundschaftliche Zusammenarbeit mit meinem Kollegen Dipl.-Ing. Joachim Breidert, der mit Kreativität und Sachverstand so manche Diskussion bereichert und wertvolle Impulse für diese Arbeit geliefert hat.

Den Mitarbeitern der Werkstatt, Herrn Wagener, Herrn Kühlback und Herrn Neuhaus, danke ich für ihren unermüdlichen Einsatz beim Bau diverser Prototypen. Es scheint keine Herausforderung zu geben, die dieses Team nicht meistern kann. Herrn Dipl.-Ing. Andreas Schäfer danke ich für die professionelle Zusammenarbeit und die vielen praktischen Tipps bezüglich der Elektrotechnik.

Auch allen Studierenden, die mich während meiner Zeit am Lehrstuhl mit ihren Beiträgen unterstützt haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Insbesondere die Zusammenarbeit mit meinen langjährigen studentischen Hilfskräften Claas Henkel, Manuel Seiwald und Dennis Rebien sowie mit den Bearbeitern des „Schlangenprojekts“ habe ich immer sehr geschätzt.

Mein herzlicher Dank gilt ferner allen Menschen, die mich im privaten Bereich auf meinem Weg begleitet haben, allen voran meiner Freundin Julia. Weder mit Gold noch mit wissenschaftlichen Erkenntnissen aufzuwiegen sind der Rückhalt meiner Familie und die Unterstützung, die ich durch meine Eltern erfahren habe.

Sebastian Jansen

Bochum, im Mai 2006

KURZFASSUNG

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch das synergetische Zusammenwirken von Komponenten der Domänen Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik aus. Je nach Produktfunktion ist es prinzipiell möglich, unterschiedliche Domänen oder Kombinationen von Domänen zu ihrer Realisierung zu nutzen. Daher erfolgt im Rahmen der Entwicklung mechatronischer Systeme eine Partitionierung. Dabei wird festgelegt, ob eine Funktion mechanisch, elektrisch oder informationstechnisch realisiert werden soll und wie die hinsichtlich ihrer Domäne spezifizierten Systemelemente räumlich anzuordnen sind.

Bei der Partitionierung werden die Eigenschaften des mechatronischen Systems grundlegend beeinflusst. Ein bewusstes, explizites Aufstellen von Domänenstrukturen als Zwischenschritt beim Übergang von der Funktions- zur Wirkebene kann dazu beitragen, den verfügbaren Lösungsraum vollständig zu erfassen und die Entwicklung vorteilhafter Konzepte fördern.

Zur Unterstützung der Systempartitionierung wird eine Methodik entworfen, die einen heterogenen Modellierungsansatz zur Beschreibung mechatronischer Systeme sowie verschiedene Methodenbausteine umfasst, die den Entwickler bei der Erzeugung von Domänenstrukturen unterstützen können. Hierzu werden zunächst grundlegende Betrachtungen zum Aufbau mechatronischer Systeme und ihrer Komponenten durchgeführt und eine Charakterisierung der beteiligten Domänen vorgenommen. Auf Grundlage der so gewonnenen Erkenntnisse und einer Analyse zum Stand der Forschung werden Anforderungen an die Partitionierungsmethodik aufgestellt. Diese bilden die Basis für die anschließende Entwicklung des Modellierungsansatzes und der Methodenbausteine.

Der heterogene Modellierungsansatz erlaubt es dem Entwickler, das mechatronische System durch Kopplung von Systemelementen beliebiger Abstraktions- und Formalisierungsgrade zu beschreiben. Funktionen, Wirkprinzipien und konkrete Komponenten lassen sich über gerichtete und ungerichtete Relationen koppeln und bilden ein dreidimensionales Modell des zu realisierenden Produkts unter Berücksichtigung der für die funktionale und räumliche Partitionierung relevanten Aspekte. Neben dem System als solchem lassen sich zusätzliche für die Entwicklungsaufgabe relevante Informationen über Kontextelemente im Modell berücksichtigen.

Die Methodenbausteine umfassen einen Vorgehensleitfaden, der die Arbeitsschritte der Partitionierung beschreibt und eine zweckmäßige Reihenfolge für ihre Durchführung festlegt. Ferner werden Regeln, Handlungshilfen und Strategien entwickelt, die die Erzeugung und Variation von Domänenstrukturen unterstützen. Da die Konzipierung der Aktorik und Sensorik ein wichtiger Bestandteil der Partitionierung ist, werden Ansätze zur teilautomatisierten Auswahl und Dimensionierung der zugehörigen Systemkomponenten vorgestellt.

Der Modellierungsansatz und die Methodenbausteine werden zu einem methodischen Gesamtkonzept zusammengeführt und als Softwarewerkzeug realisiert. Die Anwendung der Partitionierungsmethodik wird am Beispiel eines multifunktionalen Bewegungssystems dargestellt, das sich am natürlichen Vorbild der Schlange orientiert.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2	Aufbau der Arbeit	5
2	Systempartitionierung in der Mechatronik	7
2.1	Begriffsklärung.....	7
2.1.1	„Mechatronik“ und „mechatronisches System“	7
2.1.2	Mechatronische „Domäne“ und „Domänenstruktur“	8
2.1.3	Funktionale und räumliche Partitionierung im Kontext der Mechatronik	10
2.2	Aufbau und Komponenten mechatronischer Systeme	13
2.2.1	Grundstruktur mechatronischer Systeme	13
2.2.2	Aktoren	15
2.2.3	Sensoren	17
2.2.4	Informationsverarbeitung	20
2.3	Mechatronische Domänen im Kontext der Partitionierung.....	23
2.3.1	Charakterisierung verschiedener Domänen der Mechatronik	23
2.3.2	Zusammenwirken der Domänen im mechatronischen System	26
2.4	Einordnung der Systempartitionierung in den mechatronischen Produktentwicklungsprozess.....	29
2.5	Implizite vs. explizite Partitionierung	32
3	Stand der Forschung	35
3.1	Vorgehensmodelle und Methoden zur Unterstützung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse.....	35
3.1.1	VDI-Richtlinie 2221	35
3.1.2	VDI/VDE-Richtlinie 2422.....	36
3.1.3	VDI-Richtlinie 2206	37
3.1.4	Entwurfsschritte für mechatronische Systeme nach ISERMANN	39
3.1.5	Systematisches Vorgehen in der Mechatronik nach SALMINEN und VERHO	41
3.1.6	Ansatz zur Entwicklung mechatronischer Produkte nach BUUR	42
3.1.7	Mehrstufiges Partitionierungsschema nach LIPPOLD	45
3.1.8	Partitionierung von Funktionen in der Mechatronik nach FRENCH	46
3.1.9	Simultaner Entwicklungsansatz nach VAN BRUSSEL	47
3.1.10	Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme nach WALLASCHEK und KÜMMEL	48
3.1.11	Weitere Ansätze zur methodischen Unterstützung mechatronischer Produktentwicklungsprozesse	49
3.1.12	Fazit zum Themenkomplex „Methoden und Vorgehensweisen“	52
3.2	Modellierung und Strukturierung mechatronischer Systeme	54
3.2.1	Semiformale Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme ...	54

3.2.2	Objektmodell für den Mechatronikentwurf nach HAHN	56
3.2.3	Schemebuilder Mechatronics	57
3.2.4	Simulationsorientierte Modellierungswerkzeuge für mechatronische Systeme ..	58
3.2.5	Weitere Ansätze zur Modellierung mechatronischer Produktkonzepte	59
3.2.6	Fazit zum Themenkomplex „Modellierung und Strukturierung“	62
3.3	Auswahl mechatronischer Systemkomponenten	64
3.3.1	Methoden und Werkzeuge zur Auswahl von Aktoren	64
3.3.2	Methoden und Werkzeuge zur Auswahl von Sensoren	68
3.3.3	Fazit zum Themenkomplex „Komponentenauswahl“	71
3.4	Identifikation relevanter Forschungsfragen	72
4	Anforderungen an eine Methodik zur Unterstützung der Systempartitionierung	74
4.1	Übergeordnete Anforderungen	74
4.2	Anforderungen an den Modellierungsansatz	75
4.2.1	Allgemeine Anforderungen an den Modellierungsansatz	76
4.2.2	Anforderungen hinsichtlich der Modellelemente	76
4.2.3	Anforderungen hinsichtlich der Darstellungs- und Beschreibungsformen	78
4.3	Anforderungen bezüglich der Methodenbausteine	79
4.4	Zusammenstellung der identifizierten Anforderungen	80
5	Konzept einer Methodik für die Partitionierung mechatronischer Systeme	82
5.1	Heterogener Modellierungsansatz	82
5.1.1	Systemelemente	82
5.1.2	Störelemente	88
5.1.3	Kontextelemente	90
5.1.4	Relationen zwischen Modellelementen	99
5.1.5	Modellrepräsentation	108
5.2	Integrierte Methodenbausteine	111
5.2.1	Vorgehensleitfaden für die Systempartitionierung	111
5.2.2	Regeln, Handlungshilfen und Strategien für die Systempartitionierung	114
5.2.3	Auswahl und Konfiguration mechatronischer Systemkomponenten	121
5.2.4	Analyse der Systemstruktur	130
5.2.5	Bewertung und Auswahl mechatronischer Systemstrukturen	133
5.3	Integration von Modellierungsansatz und Methodenbausteinen	136
6	Softwaretechnische Umsetzung der Partitionierungsmethodik	140
6.1	Klassenstrukturen des Partitionierungswerkzeugs	140
6.2	Realisierter Prototyp	146

7	Anwendung der Partitionierungsmethodik am Beispiel eines multifunktionalen Bewegungssystems.....	150
7.1	Modellierung der Anforderungen.....	151
7.2	Konzipierung des Bewegungssystems.....	152
7.3	Entwurfsphase	162
7.4	Realisierter Prototyp des Bewegungssystems	169
8	Zusammenfassung und Ausblick	171
	Literaturverzeichnis.....	175
	Abbildungsverzeichnis.....	183
	Tabellenverzeichnis.....	185
	Verzeichnung der Abkürzungen und Formelzeichen.....	186
	Vorveröffentlichte Inhalte	188