

**Ein modellorientierter Ansatz zur Konzeptentwicklung
industrieller Produkt-Service Systeme**

Dissertation

zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur

der
Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Tim Sadek Hassanein
aus Mülheim an der Ruhr

Bochum 2008

Dissertation eingereicht am: 21. November 2008

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Februar 2009

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp vertreten durch Prof. Dr.-Ing. M. Abramovici

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Meier

Schriftenreihe Institut für Konstruktionstechnik

Heft 09.1

Tim Sadek Hassanein

**Ein modellorientierter Ansatz zur Konzept-
entwicklung industrieller Produkt-Service Systeme**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8025-3

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

In Erinnerung an Prof. Dr.-Ing. Ewald Georg Welp

VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre (LMK) der Ruhr-Universität Bochum. Finanziell wurde die Arbeit im Rahmen der Förderung des Teilprojekts A3 (Wissenbasierte Konzeptmodellierung – Methoden und Werkzeuge) im Sonderforschungsbereich Transregio 29 (Engineering hybrider Leistungsbündel) durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Ewald Georg Welp, Inhaber des oben genannten Lehrstuhls. Ich danke ihm für die Unterstützung, die weit über die Diskussion fachlicher Inhalte hinausging und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Die Freiräume, die er mir während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl gewährt hat, haben es mir ermöglicht, eigenverantwortlich Forschungsergebnisse im Themengebiet der industriellen Produkt-Service Systeme zu erarbeiten und mir wichtige Kompetenzen anzueignen, von denen ich in Zukunft profitieren kann. Zwei Tage vor meiner mündlichen Promotionsprüfung verstarb mein Doktorvater plötzlich und für alle unerwartet. Die Wahrung der von ihm vermittelten Werte ist mir ein großes Anliegen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Meier, Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme und Dekan der Fakultät Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum, danke ich herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Mein besonderer Dank gilt zudem Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici, Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenbauinformatik, der aufgrund des Todes von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ewald Georg Welp kurzfristig die Vertretung seines Referats übernommen hat. Ebenso danke ich der Fakultät für Maschinenbau für die planmäßige Fortführung meines Promotionsverfahrens.

Bedanken möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ich danke unserer ehemaligen Sekretärin Frau Verstege für die Korrektur meiner Arbeit und für ihre große Hilfsbereitschaft im Allgemeinen. Besonders hervorheben möchte ich die zwar kurze, aber intensive Zusammenarbeit mit meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Sebastian Jansen, der mir in unzähligen Diskussionen mit Kreativität und Sachverstand viele Impulse zu dieser Arbeit gegeben hat.

Mein Dank gilt auch allen Studierenden, die mich während meiner Zeit am Lehrstuhl mit ihren Beiträgen unterstützt haben. Insbesondere die Zusammenarbeit mit meinen studentischen Hilfskräften Matthias Köster und Moncif Yabi habe ich sehr geschätzt.

Mein herzlicher Dank richtet sich an alle Menschen, die mich in meinem privaten Umfeld auf dem Weg zur Promotion begleitet haben, vor allem an meine Freundin Sarah Ksouri. Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für ihren Rückhalt, ihr Vertrauen und ihre Unterstützung.

KURZFASSUNG

Die Kombination aus technologischem Fortschritt und stetigem Marktwandel bietet die Grundlage für das Angebot industrieller Produkt-Service Systeme (IPS²), die durch eine lebenslauforientierte Integration von technischen Produkten der Investitionsgüterindustrie und industriellen Dienstleistungen gekennzeichnet sind. Vor dem Hintergrund eines neuen, leistungsbezogenen Denkansatzes, in dem der Kauf eines technischen Gegenstands einer zur Verfügung gestellten Leistung untergeordnet wird, können IPS² folglich aus einer beliebigen, anforderungserfüllenden Kombination von Sach- und Dienstleistungsanteilen bestehen. Nach der Planung eines Leistungsangebots ist es nunmehr Aufgabe der IPS²-Konzeptentwicklung, eine prinzipielle Lösung zu generieren, die die vom Kunden formulierten Leistungsanforderungen erfüllt.

In dieser Arbeit wird zur Unterstützung von IPS²-Konzeptentwicklungsprozessen ein modellorientierter Ansatz vorgestellt, der sowohl die heterogene Modellierung von IPS²-Konzepten ermöglicht als auch einem Entwickler ein methodisches Vorgehen zur Problemlösung in der frühen IPS²-Entwicklungsphase vorschlägt. Die theoretische Basis für den Entwurf des modellorientierten IPS²-Konzeptentwicklungsansatzes wird einerseits durch die Betrachtungen der Alleinstellungsmerkmale industrieller Produkt-Service Systeme sowie ihres grundlegenden Aufbaus gebildet. Andererseits tragen auch die Erkenntnisse der Analyse des Stands der Forschung im Wesentlichen dazu bei, Forschungsfragen zu formulieren und Anforderungen an den Entwurf des Ansatzes herauszuarbeiten.

Die heterogene IPS²-Konzeptmodellierung baut auf den Grundlagen der heterogenen Modellierung mechatronischer Systeme und einem neuen Paradigma zur integrierten Beschreibung von technischen Produkten und industriellen Dienstleistungen auf. Durch die Trennung von funktionaler sowie objekt- und prozessbezogener Modellierungssicht wird nicht nur die Möglichkeit geboten, Modellelemente mit unterschiedlicher Detaillierung, Abstraktion und Formalisierung, sondern auch technische, menschliche und organisationsbezogene Leistungsbestandteile mittels geeigneter Beziehungen zu einem heterogenen IPS²-Konzeptmodell zu integrieren. Durch die Einführung von Modellierungsebenen lassen sich zudem die in einem Leistungsvertrag spezifizierte Risikoverteilung zwischen Anbieter und Kunde sowie die Interaktion des Anbieters mit dem externen Faktor während der Leistungserbringung und -nutzung spezifizieren und abbilden.

Die IPS²-Konzeptentwicklungsmethodik umfasst neben der Beschreibung eines speziell auf die heterogene IPS²-Konzeptmodellierung ausgerichteten Problemlösungszyklus und Vorgehensplans allgemeingültig formulierte Entwicklungsregeln und -strategien sowie auf ein besonderes IPS²-Charakteristikum ausgerichtete Handlungshilfen.

Zum Beweis der informationstechnischen Implementierbarkeit des modellorientierten IPS²-Konzeptmodellierungsansatzes ist ein Softwaredemonstrator entworfen worden. Zudem wird die Anwendung des Ansatzes zur Konzeption industrieller Produkt-Service Systeme am Beispiel der leistungsniveaubezogenen Fertigung rotationssymmetrischer μm -Bauteile gezeigt.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	5
1.1	MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	5
1.2	AUFBAU DER ARBEIT	12
2	BEGRIFFSABGRENZUNGEN UND GRUNDLAGEN	13
2.1	BEGRIFFSKLÄRUNG	13
2.1.1	<i>Geschäftsmodell, Vertrag und Erlösmodell</i>	13
2.1.2	<i>Sach-/ Dienstleistung integrierende Termini</i>	15
2.1.3	<i>Phasen im Lebenslauf eines Produkt-Service Systems</i>	20
2.1.4	<i>Konzeptphase im Kontext von Produkt-Service Systemen</i>	22
2.2	AUFBAU UND KOMPONENTEN INDUSTRIELLER PRODUKT-SERVICE SYSTEME	24
2.2.1	<i>Definition: Industrielles Produkt-Service System (IPS²)</i>	24
2.2.2	<i>Technische Produkte</i>	28
2.2.3	<i>Industrielle Dienstleistungen</i>	31
2.2.4	<i>IPS²-Leistungsartefakte</i>	35
2.2.5	<i>IPS²-Grundstruktur</i>	38
2.3	DYNAMIK INDUSTRIELLER PRODUKT-SERVICE SYSTEME	41
2.3.1	<i>Wandlungsfähigkeit i.w.S. – Begriffsdefinition und -detaillierung</i>	43
2.3.2	<i>Wandlungsfähige Produktionssysteme</i>	45
3	STAND DER FORSCHUNG	47
3.1	ENTWICKLUNG DOMÄNENÜBERGREIFENDER SYSTEME	47
3.1.1	<i>Systems-Engineering (SE)</i>	47
3.1.2	<i>Vorgehensmodelle im Produkt-Engineering</i>	49
3.1.3	<i>Vorgehensmodelle im Service-Engineering</i>	56
3.1.4	<i>Integrierte Entwicklungsansätze für das PSS-Engineering</i>	59
3.1.5	<i>Fazit zum Themenkomplex „Entwicklungsmethodik“</i>	67
3.2	MODELLIERUNG VON TECHNISCHEN PRODUKTEN UND DIENSTLEISTUNGEN	68
3.2.1	<i>Modellierung im Allgemeinen</i>	69
3.2.2	<i>Produktorientierte Modellierungsansätze</i>	72
3.2.3	<i>(Dienstleistungs-)Prozessorientierte Modellierung</i>	77
3.2.4	<i>Integrierende Modellbildung</i>	79
3.2.5	<i>Fazit zum Themenkomplex „Modellierung“</i>	82
3.3	BERÜCKSICHTIGUNG VON WANDLUNGSFÄHIGKEIT I.W.S. IN DER PRODUKT- UND PROZESSENTWICKLUNG: METHODEN UND MODELLE	83
3.3.1	<i>Synthesebezogene Ansätze</i>	83
3.3.2	<i>Analysebezogene Ansätze</i>	86
3.3.3	<i>Fazit zum Themenkomplex „Wandlungsfähigkeit i.w.S.“</i>	88
3.4	ABLEITUNG RELEVANTER FORSCHUNGSFRAGEN	88
4	ANFORDERUNGEN AN EINEN MODELLORIENTIERTEN ANSATZ ZUR IPS²-KONZEPTENTWICKLUNG	90
4.1	ÜBERGEORDNETE ANFORDERUNGEN	90
4.2	ANFORDERUNG AN DIE IPS ² -KONZEPTMODELLIERUNG	92
4.3	ANFORDERUNGEN AN EINE METHODIK ZUR IPS ² -KONZEPTENTWICKLUNG	94

5	ENTWURF EINES MODELLORIENTIERTEN ANSATZES ZUR IPS²-KONZEPTENTWICKLUNG	95
5.1	HETEROGENE IPS ² -KONZEPTMODELLIERUNG	95
5.1.1	<i>Heterogener Modellierungsansatz der Mechatronik.....</i>	<i>95</i>
5.1.2	<i>Rahmenwerk der heterogenen IPS²-Konzeptmodellierung.....</i>	<i>98</i>
5.1.3	<i>Detaillierung der Modellierungsebenen</i>	<i>108</i>
5.1.4	<i>Erweiterung des Systemelementansatzes</i>	<i>117</i>
5.1.5	<i>Erweiterung der Kontext- und Störelementbasis.....</i>	<i>130</i>
5.1.6	<i>Relationen zwischen Modellierungselementen auf der IPS²-Funktions-, IPS²-Objekt- und IPS²-Prozessebene</i>	<i>138</i>
5.1.7	<i>Assoziationen zwischen systembildenden Modellierungselementen</i>	<i>145</i>
5.2	IPS ² -KONZEPTENTWICKLUNGSMETHODIK	146
5.2.1	<i>Methodisches Vorgehen.....</i>	<i>146</i>
5.2.2	<i>Regeln und Strategien zur Entwicklung von IPS²-Funktions-, IPS²-Objekt- und IPS²-Prozesszusammenhängen</i>	<i>152</i>
5.2.3	<i>Konzeptentwicklungsschritt: Determinierung des dynamischen Zielsystems....</i>	<i>157</i>
5.2.4	<i>Konzeptentwicklungsschritt: Konzeption einer robusten IPS²-Leistungsbasis und ihrer dynamischen Anpassung</i>	<i>159</i>
5.2.5	<i>Konzeptentwicklungsschritt: Konzeptanalyse, -bewertung und -auswahl</i>	<i>162</i>
5.3	MODELLORIENTIERTER IPS ² -KONZEPTENTWICKLUNGSANSATZ	165
6	INFORMATIONSTECHNISCHE IMPLEMENTIERUNG DES MODELLORIENTIERTEN IPS²-KONZEPTENTWICKLUNGSANSATZES	166
6.1	ARCHITEKTUR DES SOFTWAREDEMONSTRATORS	166
6.2	PROTOTYPISCHE REALISIERUNG	171
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	177
	LITERATURVERZEICHNIS	181
	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS.....	198
	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	200
	VORVERÖFFENTLICHUNGEN.....	202
	ANHÄNGE	
A	ANWENDUNG DES MODELLORIENTIERTEN IPS²-KONZEPTENTWICKLUNGSANSATZES AM BEISPIEL DER LEISTUNGSNIVEAUBEZOGENEN FERTIGUNG ROTATIONSSYMMETRISCHER MIKROBAUTEILE	203
A.1	GEWÄHLTE DARSTELLUNGSFORM	203
A.2	SZENARIOBESCHREIBUNG UND LEISTUNGSANGEBOT	205
A.3	IPS ² -SYSTEMEINGANG /-AUSGANG UND DYNAMISCHES ZIELSYSTEM	208

A.4	KONZEPTION DER „ROBUSTEN IPS ² -LEISTUNGSBASIS“ (MIKRO-REGELKREIS).....	209
A.4.1	<i>Modellierung auf der IPS²-Funktionsebene</i>	209
A.4.2	<i>Modellierung auf der IPS²-Objektebene</i>	216
A.4.3	<i>Modellierung auf der IPS²-Prozessebene</i>	220
A.5	KONZEPTION DER „DYNAMISCHEN ANPASSUNG“ (MAKRO-REGELKREIS).....	225
B	VERGRÖßERTE ABBILDUNGEN	230
C	MODELLIERUNGSELEMENTE DES HETEROGENEN MODELLIERUNGSANSATZES DER MECHATRONIK NACH JANSEN	235