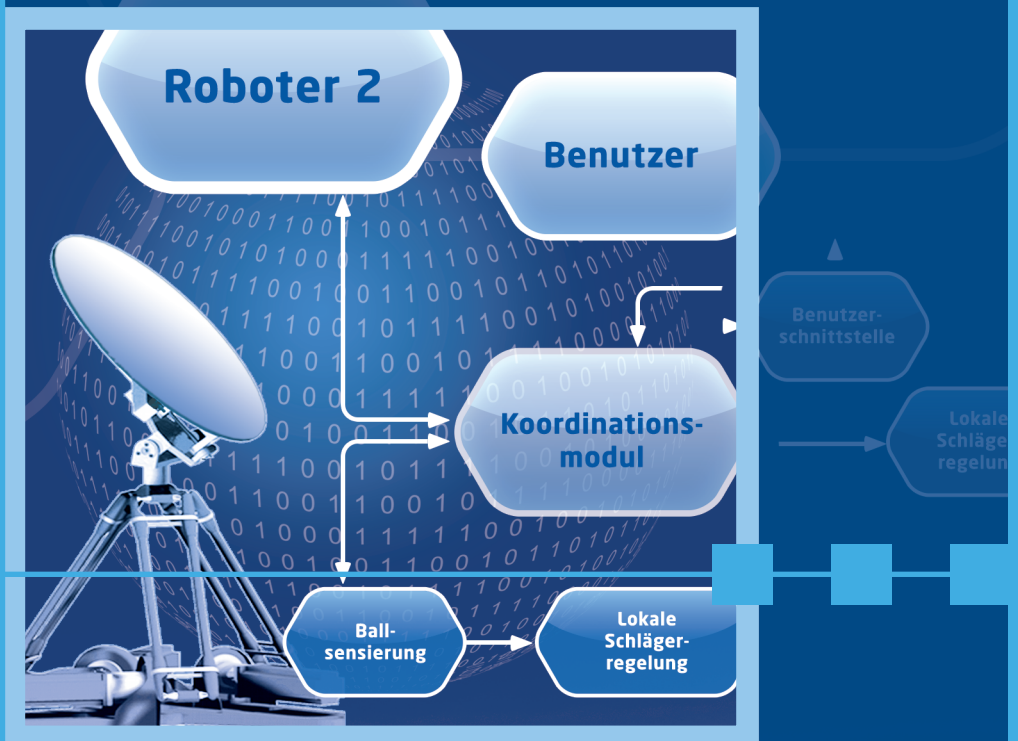


Jürgen Gausemeier
Ansgar Trächtler
Wilhelm Schäfer

Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme

Effektiver Austausch von Lösungswissen
in Branchenwertschöpfungsketten



HANSER

Gausemeier, Trächtler, Schäfer
**Semantische Technologien im
Entwurf mechatronischer Systeme**

Jürgen Gausemeier
Ansgar Trächtler
Wilhelm Schäfer

Semantische Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme

Effektiver Austausch von Lösungswissen
in Branchenwertschöpfungsketten

unter Mitarbeit von

Harald Anacker, Frank Bauer, Holger Borchering, Stefan Dziwok, Ursula Frank,
Rudolf Herden, Gerd Hoppe, Viktor Just, Markus Kiele-Dunsche, Daniel Kruse,
Felix Oestersötebier, Josef Papenfort, Uwe Pohlmann, Hendrik Reddehase, Jan Rieke,
Thomas Schierbaum, Lars Seifert, Heiko Stichweh, Heinrich Teichrieb, Robert Wagner,
Sebastian Wessels

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier,
Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Fürstenalle 11, 33102 Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler,
Ritterholz 22, 33178 Borchen

Prof. Dr. Wilhelm Schäfer
Stadtweg 42, 33178 Borchen

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

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

ISBN: 978-3-446-43630-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-43845-3

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2014 Carl Hanser Verlag München

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Steffen Jörg

Coverconcept: Marc-Müller-Bremer, Rebranding, München, Germany

Titelillustration: Frank Wohlgemuth, Hamburg

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

Inhalt

1	Einführung	9
1.1	Herausforderung Entwurf mechatronischer Systeme	10
1.2	Verbundprojekt ENTIME	15
1.3	Hinweis für den Leser	21
	Literatur zu Kapitel 1	22
2	Grundlagen	25
2.1	Begriffsdefinitionen	25
2.1.1	Intelligente Mechatronik	25
2.1.2	Modell	29
2.1.3	Domänenspezifische Sprache (DSL)	32
2.2	Modellbasierter Entwurf mechatronischer Systeme	36
2.2.1	Frühzeitiger modellbasierter Entwurf mechatronischer Systeme	36
2.2.2	Modellbasierter Entwurf der Systemdynamik	39
2.2.3	Entwurf von Softwarestruktur und ereignisdiskretem Zeitverhalten (Ab- laufsteuerung)	47
2.2.4	Modell-Transformationen und Quellcode-Generierung	51
2.2.5	Die Modellierungssprache Modelica	52
2.3	Wissensrepräsentation mit Hilfe semantischer Technologien	54
2.3.1	Externalisierung des Lösungswissens	54
2.3.2	Das Semantic Web als Weiterentwicklung des World Wide Web	55
2.3.3	Wissensbasierte Systeme	58
2.3.4	Ontologien	59
2.3.5	Inferenzmechanismen	61
2.3.6	Werkzeuge für das Semantic Web	62
	Literatur zu Kapitel 2	64
3	Instrumentarium und dessen praktische Anwendung an einem Demonstrator	69
3.1	Anwendungsbeispiel: Kooperierende Delta-Roboter	71
3.2	Vorgehensmodell	73

3.2.1	Prozessmodellierung OMEGA	73
3.2.2	Referenzprozess ENTIME	75
3.3	Spezifikationstechniken	83
3.3.1	CONSENS	83
3.3.2	MechatronicUML	90
3.4	Aufbereitung von Lösungswissen für das Semantic Web	99
3.4.1	Physikalische Lösungselemente	100
3.4.2	Lösungselemente der Softwaretechnik	111
3.4.3	Lösungsmuster für den Systementwurf	123
3.4.4	Infrastruktur für das Semantic Web	132
3.5	Systementwurf mit Hilfe von Lösungsmustern aus dem Semantic Web	142
3.5.1	Funktionsorientierte Suche nach Lösungsmustern	142
3.5.2	Methode zur Formalisierung von Anforderungen	149
3.5.3	Systementwurf mit Hilfe von Lösungsmustern aus dem Semantic Web ...	154
3.6	Frühzeitige integrierte Analyse des Systemverhaltens	165
3.6.1	Modelica-Bibliotheken für die Modellierung	165
3.6.2	Abbildung der Partialmodelle nach Modelica	172
3.6.3	Idealisierter Entwurf der Systemdynamik	177
3.7	Entwurf und Ausarbeitung mit Hilfe von Lösungselementen aus dem Semantic Web	194
3.7.1	Auswahl disziplinübergreifend relevanter Lösungselemente	195
3.7.2	Ausarbeitung und Analyse der Regelung	203
3.7.3	Ausarbeitung und Analyse der ereignisdiskreten Softwareanteile (Ablaufsteuerung)	210
3.8	Detaillierte integrierte Analyse des Systemverhaltens	222
3.8.1	Integration der Regelungs- und Softwaremodelle	223
3.8.2	Validierung der Systemdynamik mittels detailliertem Modell	226
3.9	Durchgängige Werkzeugunterstützung	229
3.9.1	IT-Architektur	229
3.9.2	Mechatronic Modeller	231
3.9.3	Embedded Modeller	232
3.9.4	Technische Realisierung	237
3.9.5	Prototypische Werkzeugunterstützung zur Anbindung von Dymola	237
	Literatur zu Kapitel 3	239

4 Praxisberichte245

4.1	WP Kemper – Konzipierung eines neuen Transportsystems für eine Knetanlage	246
4.1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	246

4.1.2	Zielsetzung und Konzeption	247
4.1.3	Realisierung	248
4.1.4	Erfahrungen	254
4.2	Miele – Modellbasierter Entwurf eines neuartigen Waschverfahrens	257
4.2.1	Ausgangssituation und Problemstellung	257
4.2.2	Zielsetzung und Konzeption	258
4.2.3	Realisierung	259
4.2.4	Erfahrungen	264
4.3	Lenze – Modellbasierte Auslegung und Auswahl semantisch aufbereiteter Antriebe	267
4.3.1	Ausgangssituation und Problemstellung	267
4.3.2	Zielsetzung und Konzeption	269
4.3.3	Realisierung	272
4.3.4	Erfahrungen	280
4.4	Beckhoff Automation – Lösungselementaufbereitung und Erprobung	284
4.4.1	Ausgangssituation und Problemstellung	284
4.4.2	Zielsetzung	285
4.4.3	Realisierung	285
4.4.4	Anwendung der ENTIME-Entwicklungsmethoden am Beispiel einer Sortieranlage	290
4.4.5	Erfahrungen	294
	Literatur zu Kapitel 4	297

5 Resümee und Ausblick299

Index303

■ Autorenverzeichnis

Harald Anacker

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Produktentstehung

Frank Bauer

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Produktentstehung

Prof. Dr. Holger Borcharding

Lenze SE

Stefan Dziwok

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Softwaretechnik

Dr.-Ing. Ursula Frank

Beckhoff Automation GmbH

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Produktentstehung

Rudolf Herden

Miele & Cie. KG

Gerd Hoppe

Beckhoff Automation GmbH

Viktor Just

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik

Markus Kiele-Dunsche

Lenze Automation GmbH

Daniel Kruse

Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie

Felix Oestersötebier

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik

Dr. Josef Papenfort

Beckhoff Automation GmbH

Uwe Pohlmann

Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie

Hendrik Reddehase

Solunar GmbH

Jan Rieke

Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Softwaretechnik

Prof. Dr. Wilhelm Schäfer
Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Softwaretechnik

Thomas Schierbaum
Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Produktentstehung

Dr.-Ing. Lars Seifert
myview systems GmbH

Dr. Heiko Stichweh
Lenze SE

Heinrich Teichrieb
Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie

Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler
Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik

Dr. Robert Wagner
Solunar GmbH

Sebastian Wessels
WP Kemper GmbH

■ Grafik & Design

Anne Badorreck
Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Softwaretechnik

Elisabeth Herick
Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Softwaretechnik

Alina Linden
Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Produktentstehung

Vorwort

Die Produkte des modernen Maschinenbaus und verwandter Branchen beruhen auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik, was durch den Begriff Mechatronik zum Ausdruck kommt. Aus der dynamischen Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik resultieren Systeme mit einer inhärenten Intelligenz, d. h. Systeme, die sich selbstständig an sich ändernde Betriebsbedingungen anpassen und teils kognitive Fähigkeiten aufweisen. Vor diesem Hintergrund besteht ein dringender Handlungsbedarf auf dem Gebiet der Entwurfstechnik, weil diese die Voraussetzung dafür ist, solche Systeme unter hohen Qualitätsansprüchen zu entwickeln und entsprechende Aus- und Weiterbildung adäquat zu betreiben.

Mehr denn je kommt es beim Entwurf von solchen komplexen Systemen darauf an, bewährtes Lösungswissen und insbesondere Lösungselemente wie Zulieferkomponenten einzusetzen. Mechatronische Erzeugnisse beruhen auf einer Kaskade von Lösungselementen: In einer Wertschöpfungskette ist beispielsweise ein aktives Magnetlager Lösungselement bei einem Antriebshersteller; dessen Erzeugnis ist wiederum Lösungselement bei einem Werkzeugmaschinenhersteller etc. Mit dem Semantic Web ergeben sich neue Perspektiven für das Identifizieren geeigneter Lösungselemente (Anwender) und für den Vertrieb von Lösungselementen (Hersteller).

Übergeordnetes Ziel des Verbundprojektes ENTIME – Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik – ist die Stärkung der Innovationskraft der Zukunftsbranche Maschinenbau und verwandter Branchen. Unter der Federführung des Heinz Nixdorf Instituts entwickelten neun Hightech-Unternehmen der Region Ostwestfalen-Lippe eine Entwurfstechnik für intelligente mechatronische Systeme, die sich konsequent auf den Austausch und die Verwendung von Lösungswissen in Branchenwertschöpfungsketten via Semantic Web abstützt. Der praktische Einsatz der entwickelten Methoden und Werkzeuge in den beteiligten Unternehmen unterstreicht deren Relevanz auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. Die Entwicklungsprozesse der Unternehmen haben sowohl in Bezug auf Effektivität als auch Effizienz wesentliche Impulse erhalten. Für das Heinz Nixdorf Institut sind die Ergebnisse des Verbundprojekts ein wesentlicher Beitrag zur Einlösung des Anspruchs, auf dem Gebiet der Entwurfstechnik intelligenter technischer Systeme eine führende Stellung einzunehmen.

Das vorliegende Buch beschreibt die Ergebnisse des Projekts in kompakter Form. Es richtet sich an Fachleute in Unternehmen und Forschungsinstitute, die sich mit der Gestaltung von Entwicklungsprozessen im modernen Maschinenbau und verwandter Branchen maßgeblich befassen, und Studierende, die über etablierte Fachgrenzen hinweg blicken möchten.

Wir danken allen beteiligten Partnern für ihren Einsatz in diesem Projekt. Besonders hervorheben möchten wir die Arbeit der verantwortlichen Projektleiter Dr. Matthias Tichy und Jan Rieke sowie der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aller Projektpartner, die das Projekt maßgeblich gestaltet haben. Sie haben in der interdisziplinären Zusammenarbeit von Ingenieuren und Informatikern die notwendige Offenheit und kritische Auseinandersetzung mit dem Vorgehen der jeweils anderen Disziplin nachdrücklich unter Beweis gestellt. Last but not least gilt unser besonderer Dank dem Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen, das mit dem Förderwettbewerb Hightech.NRW dieses ambitionierte Projekt überhaupt erst ermöglicht hat.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Prof. Dr. Wilhelm Schäfer

Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler

Paderborn, im April 2014

1

Einführung

Harald Anacker, Jürgen Gausemeier

Die Entwicklung der Kommunikations- und Informationstechnik ermöglicht dem modernen Maschinenbau und verwandten Branchen, wie der Automobilindustrie und der Medizintechnik, erfolgversprechende Produktinnovationen. Diese beruhen zunehmend auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik/Elektrotechnik, Regelungs- und Softwaretechnik und ggf. neuen Werkstoffen. Der Begriff Mechatronik bringt dies zum Ausdruck. Ein mechatronisches System ist in der Regel das Ergebnis einer Branchenwertschöpfungskette, in der die Unternehmen zur Verwirklichung von Funktionen auf Lösungen von spezialisierten Lieferanten zurückgreifen und ihre Erzeugnisse wiederum Lösungen für weitere Unternehmen in der Kette sind. Dies erhöht sowohl die Komplexität der technischen Erzeugnisse als auch deren Entwicklungsprozesse.

Mit dem Internet haben sich für den Vertrieb von technischen Lösungen Online-Kataloge u.ä. verbreitet. Es zeigt sich jedoch, dass Entwickler¹ in der Regel auf Angebote bekannter Partnerunternehmen zurückgreifen. Dies hat zur Folge, dass zum einen das vorhandene Innovationspotential nicht vollständig ausgeschöpft werden kann und zum anderen die Entwickler bereits sehr früh mit der Detaillierung von Teillösungen beginnen. Gleichwohl ist bekannt, dass die Summe aller Teillösungen selten die beste Lösung auf Gesamtsystemebene ist. Eine systemische Herangehensweise ist insbesondere in den frühen Entwurfsphasen (Konzipierung bzw. Vorentwicklung) essentiell für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Vor diesem Hintergrund kommt es mehr denn je darauf an, möglichst frühzeitig auf der Basis eines breitgefächerten Lösungsangebots innovative Produktkonzepte ganzheitlich zu erarbeiten. Das Internet bzw. technologische Weiterentwicklungen wie das Semantic Web bieten hierzu eine gute Ausgangsbasis, bleiben bisher jedoch weitestgehend ungenutzt.

Hinzu kommt, dass im Entwurf mechatronischer Systeme der Aspekt der Systemdynamik und deren fortlaufende modellbasierte Absicherung durch fundierte Analysen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Neben gängigen 3D-CAD-Modellen kommen vermehrt physikalisch motivierte Verhaltensmodelle zum Einsatz. In diesem Zusammenhang bedarf es jedoch neuer Methoden und IT-Werkzeuge für die Effizienzsteigerung im Entwurfsprozess durch semantische Technologien. Besonderer Fokus liegt dabei auf einer durchgängig modellbasierten Entwicklung sowie frühzeitigen Analysen des dynamischen Systemverhaltens. In Zusammenarbeit von Hochschulinstitutionen, Beratungsunternehmen, Softwarehäusern und Industrieunternehmen wurde daher ein Instrumentarium für den Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme entwickelt. Dies ist Gegenstand des vorliegenden Buches.

¹ Wir schreiben im Folgenden in der maskulinen Form, und zwar ausschließlich wegen der einfachen Lesbarkeit. Wenn beispielsweise von Entwicklern, Entscheidungsträgern und Managern die Rede ist, meinen wir selbstredend auch Entwicklerinnen, Entscheidungsträgerinnen und Managerinnen.

Das Instrumentarium besteht aus einem Vorgehensmodell, Methoden und IT-Werkzeugen, die Entwickler befähigen, das im Internet verfügbare Innovationspotential umfänglich auszuschöpfen. Auf Basis adäquat aufbereiteter Lösungen werden die Entwickler in die Lage versetzt, Produktkonzepte fachdisziplinübergreifend zu erarbeiten und hinsichtlich der Systemdynamik fortlaufend zu analysieren. Die Durchgängigkeit im Entwurf beginnt bei der Definition der Anforderungen und mündet im ausgearbeiteten Produkt, repräsentiert als virtueller Prototyp. Durch den Einsatz des Instrumentariums wird die Effizienz des Entwicklungsgeschehens maßgeblich gesteigert. Unter anderem lassen sich aufwändige Iterationsschleifen in späteren Entwicklungsphasen signifikant reduzieren.

Die Inhalte des vorliegenden Buches gliedern sich wie folgt: In Kapitel 1 wird die Ausgangssituation und Problemstellung, der Handlungsbedarf sowie der Aufbau und das Vorgehen des Projektes beschrieben. Kapitel 2 gibt einen Überblick über folgende notwendigen Grundlagen: Begriffsdefinitionen, modellbasierter Entwurf mechatronischer Systeme und Wissensrepräsentation im Semantic Web. Kapitel 3 bildet den Kern des vorliegenden Buches. Es stellt anhand eines durchgängigen Beispiels die Methoden, IT-Werkzeuge und deren Zusammenspiel im Entwurf mechatronischer Systeme vor. In Kapitel 4 wird dargestellt, wie das erarbeitete Instrumentarium bei den beteiligten Unternehmen Miele und Cie. KG, Neuenkirchener Maschinenfabrik WP Kemper GmbH, Lenze SE sowie Beckhoff Automation GmbH eingesetzt wird und dort Nutzen stiftet. Kapitel 5 gibt abschließend eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

■ 1.1 Herausforderung Entwurf mechatronischer Systeme

Der Entwurf mechatronischer Systeme ist charakterisiert durch das symbiotische Zusammenwirken der beteiligten Fachdisziplinen Maschinenbau, Regelungstechnik, Softwaretechnik und Elektrotechnik/Elektronik. Mechatronische Systeme ermöglichen Funktions- und Verhaltensverbesserungen sowie eine Reduzierung von Baugröße, Gewicht und Kosten. Wesentlicher Innovationstreiber ist die voranschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik.

Ein systematisches Vorgehen beim Entwurf derart komplexer technischer Erzeugnisse stellt viele Unternehmen vor Herausforderungen. Es existieren zahlreiche Entwicklungsleitfäden bzw. Methodiken, die jedoch zumeist auf einzelne Fachdisziplinen ausgerichtet sind. Zu nennen sind an dieser Stelle z. B. die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221], die Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ [PBF+07], das Y-Modell der Schaltungstechnik [BGH+96] und das V-Modell der Softwareentwicklung [BD93]. In einigen neueren Ansätzen wird insbesondere die Charakteristik der hohen Interdisziplinarität adressiert. Beispiele solcher Ansätze sind die Entwurfsmethodik nach ISERMANN [Ise08], das 3-Ebenen-Vorgehensmodell nach BENDER [Ben05], die integrierte Produktentwicklung nach EHRENSPIEL [Ehr09] oder das Axiomatic Design nach SUH [Suh98]. Der größte Konsens in Industrie und Wissenschaft stellt jedoch nach wie vor das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [VDI2206] dar, die unter der Obmannschaft des Heinz Nixdorf Institutes Paderborn entstanden ist. Da der Großteil wissenschaftlicher Arbeiten im Kontext Mechatronik auf dem V-Modell