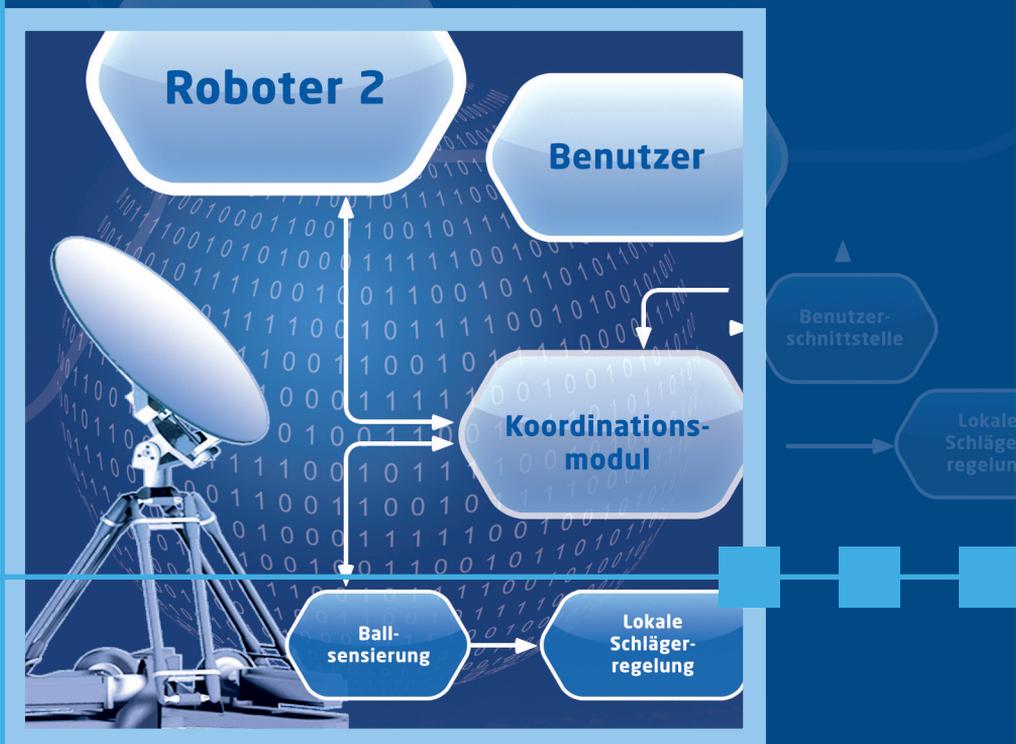


Jürgen Gausemeier
Ansgar Trächtler
Wilhelm Schäfer

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

(vgl. Bild 1.1) fußt, werden wesentliche Aufgaben im Folgenden kurz charakterisiert. Es handelt sich dabei um ein generisches Vorgehensmodell, das anwendungsspezifisch auszuprägen ist.

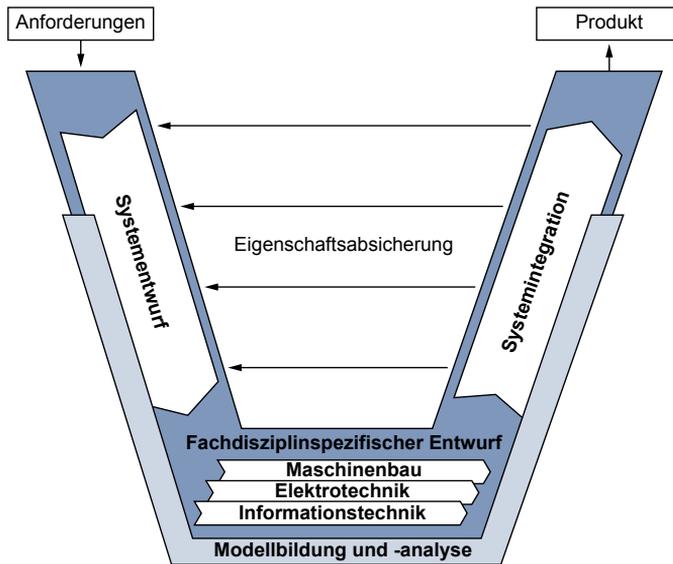


Bild 1.1 V-Modell [VDI2206]

Anforderungen: Ausgangspunkt bildet ein konkreter Entwicklungsauftrag. Die Aufgabenstellung wurde präzisiert und in Form von Anforderungen beschrieben. Diese Anforderungen bilden zugleich den Maßstab, anhand dessen das spätere Produkt zu bewerten ist.

Systementwurf: Ziel ist die Festlegung eines fachdisziplinübergreifenden Lösungskonzepts, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts beschreibt. Hierzu wird die Gesamtfunktion eines Systems in Teilfunktionen zerlegt. Diesen Teilfunktionen werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet und die Funktionserfüllung wird im Systemzusammenhang geprüft.

Fachdisziplinspezifischer Entwurf: Auf der Basis dieses gemeinsam entwickelten Lösungskonzepts erfolgt die weitere Konkretisierung meist getrennt in den beteiligten Fachdisziplinen. Detailliertere Auslegungen und Berechnungen sind nötig, um insbesondere bei kritischen Funktionen die Funktionserfüllung sicherzustellen.

Systemintegration: Die Ergebnisse aus den einzelnen Fachdisziplinen werden zu einem Gesamtsystem integriert, um das Zusammenwirken untersuchen zu können.

Eigenschaftsabsicherung: Der Entwurfsfortschritt muss fortlaufend anhand des spezifizierten Konzepts und der Anforderungen überprüft werden. Es ist sicherzustellen, dass tatsächliche und gewünschte Systemeigenschaften übereinstimmen.

Modellbildung und -analyse: Die beschriebenen Phasen werden flankiert durch die Abbildung und Untersuchung der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Werkzeugen zur Simulation. Nach STACHOWIAK ist ein Modell die Repräsentation eines bestimmten Originals [Sta73]. Modelle sind eine Abstraktion und Vereinfachung der realen

Welt, die spezifische Teilaspekte des Gesamtsystems beschreiben. Wesentlich ist die Definition der notwendigen Detailtiefe der Modelle.

Produkt: Ergebnis eines durchlaufenen Zyklus ist das Produkt. Dabei wird unter dem Produkt nicht ausschließlich das fertige, real existierende Erzeugnis verstanden, sondern die zunehmende Konkretisierung des zukünftigen Produkts. Reifegrade sind z. B. das Labormuster, das Funktionsmuster, das Vorserienprodukt etc. Ein komplexes mechatronisches Erzeugnis entsteht in der Regel nicht innerhalb eines Zyklus. Vielmehr sind mehrere Durchläufe erforderlich.

Lösungswissen im Entwurf mechatronischer Systeme

Der internationale Wettbewerb zwingt Unternehmen, die Zeit bis zum Markteintritt ihrer Produkte immer stärker zu reduzieren, die Kosten zu senken und gleichzeitig die Qualität signifikant zu steigern. Die Praxis zeigt, dass Unternehmen einen Wandel in ihrer industriellen Wertschöpfung vollziehen oder bereits vollzogen haben und sich vermehrt die Entwicklungsarbeit mit spezialisierten Anbietern von Lösungselementen teilen. Lösungselemente sind realisierte und bewährte Lösungen – Baugruppen, Module, Softwarebibliotheken etc. – zur Erfüllung einer Funktion des Gesamtsystems [GSA+11]. Es wird zwischen materiellen und immateriellen Lösungselementen unterschieden, wobei materielle Lösungselemente oftmals Softwareanteile enthalten. Die rechnerinterne Repräsentation von Lösungselementen besteht aus mehreren Aspekten wie Verhalten und Gestalt. Diese weisen unterschiedliche Konkretisierungsstufen auf, die den Phasen des Entwicklungsprozesses entsprechen. Im Prinzip besteht ein mechatronisches System aus einer Kaskade von Lösungselementen (vgl. Bild 1.2): Ein Wälzlager ist Teil eines Getriebemotors; ein Getriebemotor ist Teil eines Roboters; ein Roboter wiederum ist Teil einer Fertigungsstraße.

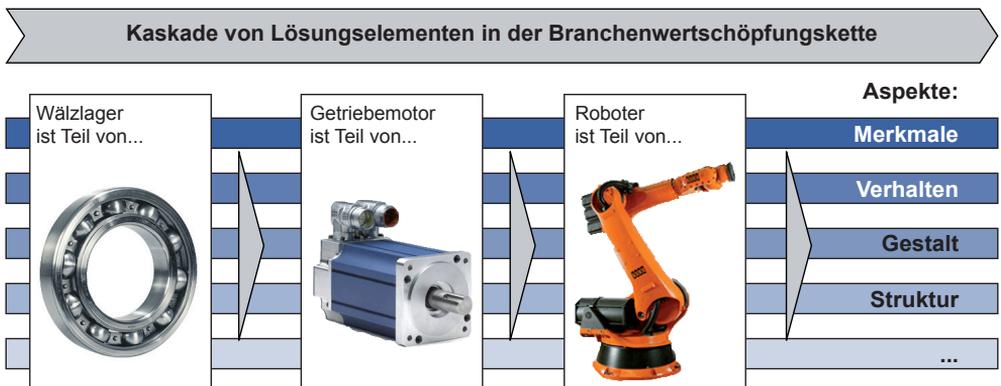


Bild 1.2 Kaskade von Lösungselementen

Eine geschickte Komposition zugekaufter Lösungselemente und Eigenentwicklungen ist daher von entscheidender Bedeutung. Folgende Fragestellungen sind dabei wesentlich: Ist den Entwicklern das vorhandene Angebot von Lösungen zugänglich? Sind die Entwickler in der Lage über den gesamten Entwicklungsprozess die bereitgestellten (Teil-)Lösungen zu einer bestmöglichen Gesamtlösung zu kombinieren?

Aktuell zeigt sich, dass Unternehmen meist feste Kooperationen mit Anbietern von Lösungselementen eingehen. Das führt dazu, dass sie sich auf bereits erfolgreich eingesetzte Lösungen

beschränken und das Innovationspotential nicht umfassend ausschöpfen [GSA+11]. Zudem lässt sich die zweite eingangs formulierte Frage verneinen, denn detaillierte Lösungselemente lassen sich nicht ohne weiteres in die Spezifikation des Produktkonzepts integrieren. Bild 1.3 zeigt, dass die Kernproblematik in dem Aufeinandertreffen zweier unterschiedlicher Vorgehensweisen liegt. Auf der einen Seite sind die Entwickler, die zunächst lösungsneutral und funktionsorientiert vorgehen. Auf der anderen Seite sind die Anbieter von Lösungselementen, die einen lösungsspezifischen sowie bauteil- und komponentenorientierten Denkansatz verfolgen. Die Entwickler, die je nach Fachdisziplin die Produktspezifikation in ihrer Terminologie beschreiben, treffen bei der Suche nach Lösungen auf unterschiedliche Präsentationsformen der Anbieter – unternehmensspezifische Terminologien, Detailtiefen, Aufbau von Online-Katalogen etc. Eine funktionsorientierte, anbieterübergreifende Suche ist somit nicht ohne Weiteres möglich. In Folge werden die Entwickler insbesondere in den frühen Entwurfsphasen dazu verleitet, ihre lösungsneutrale Vorgehensweise aufzugeben und sich an den ihnen bekannten Lösungen zu orientieren.

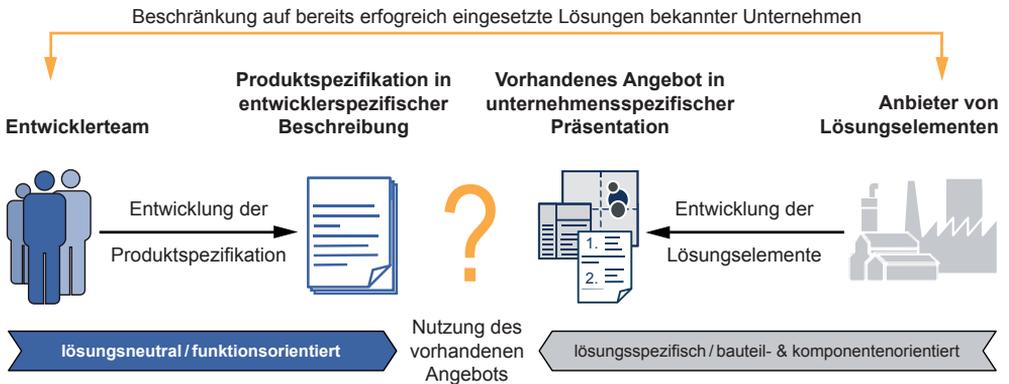


Bild 1.3 Ausgangssituation – konfliktäre Vorgehens- und Denkweisen

Eine Gegenüberstellung dieser Gegebenheiten und etablierten Ansätze wie z. B. die VDI 2206 verdeutlicht sehr schnell, dass diese nicht weit genug greifen. Es besteht insofern Handlungsbedarf nach einem neuartigen Instrumentarium, das den Anforderungen einer verteilten und durchgängigen Wertschöpfung Rechnung trägt. Dieses umfasst folgende Bereiche:

Vorgehensmodell und Spezifikationstechniken für den durchgängigen und integrierten Entwurf mechatronischer Systeme: Die steigende Komplexität in der Entwicklung mechatronischer Systeme erfordert zunehmend eine Zusammenarbeit über die Grenzen der beteiligten Fachdisziplinen hinweg. Es gilt, die Wechselwirkungen zwischen mechanischen, elektronischen und informationsverarbeitenden Systemelementen bereits ab den frühen Phasen des Entwurfs fortwährend zu berücksichtigen. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass sich bereits etablierte Lösungen spezialisierter Anbieter integrieren lassen. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an den Entwurfsprozess.

Vor diesem Hintergrund ist ein Vorgehensmodell erforderlich, welches das Entwicklungsgeschehen der beteiligten Fachleute unter Berücksichtigung hinzugezogenen Lösungswissens Dritter koordiniert. Das Modell dient als Leitfaden, das den Einsatz etablierter, spezifischer Entwicklungsmethoden flankiert. Es ist je nach Entwicklungsgegenstand individuell auszuprägen.

Ferner bedarf es Spezifikationstechniken, die ein gemeinsames Verständnis über das zu entwickelnde Gesamtsystem und eine Durchgängigkeit über den gesamten Produktentwicklungsprozess schaffen. Dies reicht von der Erstellung des Produktkonzepts bis zur Finalisierung der detaillierten Ausarbeitung von Regelungs- und Steuerungsstrategien. Aktuell sind derartige Beschreibungsformen nicht gegeben, so dass die Entwicklung meist getrennt und z.T. sequenziell, redundant oder konfliktär in den involvierten Fachdisziplinen verläuft. Charakterisiert ist dieses Vorgehen durch unterschiedliche Denkweisen, Begriffswelten, Terminologien und Erfahrungen. Negativ verstärkt werden diese Charakteristika bei der Einbindung externen Lösungswissens. Dies erfordert zusätzlich die Handhabung weiterer Begrifflichkeiten etc. Hinzu kommt die Forderung nach fundierten Analysen. Vordergründig betroffen ist die Systemdynamik, die bereits ab den frühen Entwurfsphasen abzusichern ist.

Semantic Web: Das Internet und die darin enthaltene Menge an Informationen hat u. a. die Entwicklungsarbeit von Ingenieuren stark beeinflusst. Vor dem Hintergrund der unvorstellbar hohen Menge an zur Verfügung stehenden Informationen im Internet stellt sich nicht mehr die Frage, ob die gesuchten Informationen vorhanden sind, sondern wie diese gefunden werden können. Den enormen Anstieg der Datenmenge im Internet verdeutlichen folgende Zahlen aus einer Studie der IDC² [GR11-ol]:

- Das weltweite gespeicherte Datenvolumen lag im Jahre 2009 bei ca. 281 Millionen Gigabytes. Im Vergleich hierzu stieg die Zahl bis zum Jahre 2011 auf ca. 1,8 Billionen Gigabytes an. Insgesamt lässt sich von dem Jahre 2007 bis 2011 ein Anstieg des Datenvolumens um den Faktor 9 verzeichnen.
- Zukünftig ist eine ähnliche Steigerung zu erwarten. Aktuell ist davon auszugehen, dass sich das Datenvolumen im Zyklus von zwei Jahren fortlaufend verdoppeln wird.

Für den Menschen allein ist der Umgang mit derartigen Informationsmengen und der sich daraus ergebenden Komplexität schon heute nicht mehr möglich. Die Bereitstellung der Informationen ist jedoch vorwiegend auf den Menschen ausgerichtet. Es bleibt ihm überlassen, einzelne Internetseiten und deren Inhalte zu finden und zu interpretieren³. Um dieser Komplexität zu begegnen, müssen verstärkt Softwarelösungen den Menschen bei der Verarbeitung der Informationsflut unterstützen. Die zur Verfügung stehenden Informationen müssen so angereichert werden, dass diese für den Menschen verständlich und vor allem auch durch den Computer interpretierbar werden. Diese Vision formuliert BERNERS-LEE, der Erfinder des World Wide Web, in seiner Idee vom Semantic Web [BHL01] (dt. „semantisches Netz“).

Vor diesem Hintergrund bietet das Semantic Web erhebliches Nutzenpotential in der Entwicklung mechatronischer Systeme. Die Auswahl und Integration der am besten geeigneten Lösungselemente unterschiedlicher Anbieter lässt sich mit Hilfe semantischer Technologien signifikant verbessern. Lösungselemente werden aktuell in den Online-Produktkatalogen durch charakteristische Größen wie Parameter, Kennwerte o. ä. beschrieben. Um diese Daten interpretieren zu können, bedarf es einer geeigneten Infrastruktur, Beschreibungssprachen, Ontologien⁴ und Inferenzmechanismen⁵. Ferner erfordert die notwendige Integration der Lösungs-

² International Data Corporation, <http://www.idc.com/>

³ Auch klassische Suchmaschinen helfen hier nur begrenzt, da sie lediglich eine Suche auf syntaktischer Ebene ermöglichen, die Semantik der Informationen dabei aber weitgehend unberücksichtigt bleibt.

⁴ Eine Ontologie beschreibt die konzeptionelle Formalisierung von Gegenständen oder Begriffen sowie deren Beziehung zueinander.

⁵ Inferenzmechanismen (Softwareprogramme) ermöglichen Schlussfolgerungen auf Basis bestehender Daten.

elemente in die frühen Phasen des Entwurfs eine adäquate Aufbereitung (Lösungsmuster⁶) und Verknüpfung mit Entwicklerexpertise. Zusätzlich muss eine geeignete Klassifikation für das Lösungswissen erarbeitet werden.

Durchgängige IT-Unterstützung: Der zuvor beschriebene fachdisziplinübergreifende Entwurf mechatronischer Systeme und der Einsatz semantischer Technologien erfordert zwangsläufig eine geeignete Virtualisierung der Produktentstehung. Gemeint ist das Bilden und Analysieren von rechnerinternen Modellen des in der Entwicklung befindlichen Produkts. Ziel ist die Minimierung des zeit- und kostenaufwändigen Baus und Tests von realen Prototypen. Vorhandene Ansätze und Werkzeuge fokussieren spezifische Aspekte wie etwa die Konstruktion, das regelungstechnische Verhalten oder das Kommunikationsverhalten. Die Nutzung dieser Ansätze sowohl bei der Virtualisierung als auch bei der Suche nach wiederverwendbarem Lösungswissen würde eine Beschränkung auf die jeweilige Fachdisziplin bedeuten. Vor diesem Hintergrund bedarf es einer durchgängigen IT-Unterstützung, die dem interdisziplinären Charakter des Entwicklungsgeschehens gerecht wird, die fortlaufende Einbindung von Lösungswissen ermöglicht und die wiederholte Analyse der Systemdynamik gewährleistet.

■ 1.2 Verbundprojekt ENTIME

Vor dem Hintergrund des eingangs skizzierten Handlungsbedarfs wurde im Verbundprojekt ENTIME – Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik – ein Instrumentarium für den Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme entwickelt. Es ermöglicht eine fortlaufende Unterstützung des Entwicklungsprozesses durch die bedarfsgerechte Bereitstellung von Lösungswissen. Ferner werden die Entwickler durch adäquat aufbereitete Simulationsmodelle in die Lage versetzt, schon ab der Konzeptphase das dynamische Systemverhalten abzusichern. Das Instrumentarium gliedert sich in die drei Bereiche Vorgehensmodell, Spezifikation und modellbasierte Absicherung des Produkts und Semantic Web. Synchronisiert werden alle Teilbereiche mit Hilfe einer durchgängigen IT-Unterstützung (vgl. Bild 1.4).

Vorgehensmodell: Es wurde ein Vorgehensmodell erarbeitet, das sich nach Maßgabe einer konkreten Entwicklungsaufgabe spezifisch ausprägen lässt. Dazu sind einzelne allgemeingültige Entwicklungsschritte sowie die Anwendung der im Projekt entwickelten Methoden und Softwarewerkzeuge durch Prozessbausteine beschrieben. Das Vorgehensmodell dient den Entwicklern als eine Art Leitfaden, der sie systematisch durch die Entwicklung mechatronischer Systeme führt und dabei der Einbindung von bestehendem Lösungswissen gerecht wird. Zentrale Elemente sind somit die Formalisierung der in der Entwicklung vorhandenen Dokumente und Modelle (z. B. Anforderungen, Funktionen, Verhaltensmodelle etc.) zur zielgerichteten Suche im Semantic Web.

Spezifikation und modellbasierte Absicherung des Produktes: Die Spezifikation und modellbasierte Absicherung des Produkts unterteilt sich in die beiden Bereiche Systementwurf

⁶ Allgemein beschreibt ein Lösungsmuster (LM) ein wiederkehrendes Problem in einem bestimmten Zusammenhang und den Kern der Lösung für dieses Problem [AIS+77]. Übertragen auf die Aufbereitung von Lösungselementen für mechatronische Systeme ist ein Lösungsmuster die abstrakte Darstellung einer Klasse von Lösungselementen und beschreibt daher deren Struktur und Verhalten in verallgemeinerter Form.

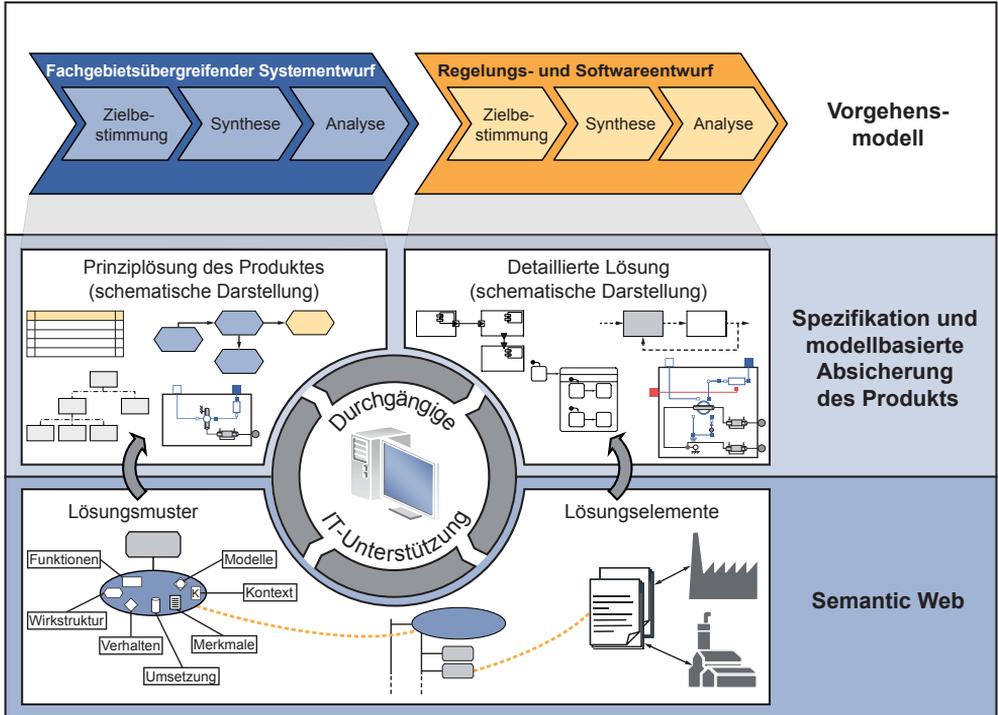


Bild 1.4 Struktur des im Projekt ENTIME entwickelten Instrumentariums

und Regelungs- und Softwareentwurf. Im Rahmen des Systementwurfs liegt der Fokus auf der fachdisziplinübergreifenden Erstellung eines Produktkonzepts, der sog. Prinziplösung. Darauf aufbauend folgt die detaillierte Ausarbeitung mit Fokus auf dem integrierten Regelungs- und Softwareentwurf. Die Detaillierung der Mechanik und Elektronik ist nicht Schwerpunkt des Instrumentariums und wurde daher nur in Ansätzen berücksichtigt.

- **Systementwurf (Ziel: Prinziplösung des Produkts):** Aufbauend auf bestehenden Forschungsergebnissen⁷ wurde die Spezifikationstechnik CONSENS⁸ für den frühzeitigen fachdisziplinübergreifenden Systementwurf (auch als Konzipierung bezeichnet) weiterentwickelt. Die Spezifikationstechnik bildet die Basis für die Kommunikation und Kooperation aller Entwickler und ist Ausgangspunkt für die nachfolgende Ausarbeitung. Für den Systementwurf wurden folgende Methoden und Verfahren entwickelt.
 - Spezifikation des Systemverhaltens: Ein Schwerpunkt des Verbundprojektes lag auf der frühzeitigen Modellierung des dynamischen Systemverhaltens. Die Spezifikationstechnik CONSENS liefert zur Abbildung des Verhaltens die Partialmodelle Verhalten–Aktivitäten, Verhalten–Sequenz und Verhalten–Zustände. Letzteres ist insbesondere hinsichtlich der Durchgängigkeit in den Regelungs- und Softwareentwurf entscheidend.

⁷ Das Fachkonzept der Spezifikationstechnik baut auf Arbeiten auf, die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ und den BMBF-Verbundprojekten INERELA, InZuMech und VireS entstanden ist [GFD+08; GF06; Gau10; GLL12].

⁸ CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

Daher wurde für dieses Partialmodell eine geeignete Syntax und Semantik definiert und prototypisch in einem Softwarewerkzeug implementiert.

- **Formale Funktionssynthese:** Im Rahmen einer Produktentwicklung denken die Entwickler in den frühen Phasen lösungsneutral und beschreiben das zu entwickelnde Produkt zunächst funktional. Auf Basis der Funktionsbeschreibung erfolgt anschließend die Lösungssuche. Um im Semantic Web nach Lösungsmustern suchen zu können, mussten die Funktionen formalisiert werden. Diesbezüglich wurde ein umfangreicher Funktionsverbenkatalog zur Beschreibung mechatronischer Systeme erarbeitet. Etablierte Kataloge des klassischen Maschinenbaus [Kol98; PBF+07; CR98; Lan00; VDI2860] wurden um Verben zur Beschreibung der Informationsverarbeitung erweitert. Es wurden allgemeine Funktionsverben sowie zugehörige Synonymfunktionen festgelegt. Speziell entwickelte Ontologien bilden die Verknüpfung zwischen den Funktionsverben untereinander sowie zu den Lösungsmustern im Semantic Web.
- **Methode zur Formalisierung von Anforderungen:** Die Anforderungsliste, als Analyseergebnis der Produktplanung, ist ein zentrales Element für den Entwicklungsprozess. Sie stellt die rechtliche Grundlage eines Entwicklungsauftrages zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer dar. Das Ergebnis eines Entwicklungsprozesses wird gegenüber der Anforderungsliste verifiziert. Die Liste enthält sämtliche Anforderungen, i. d. R. textuell festgehalten, aller beteiligten Fachdisziplinen. Die Komplexität und Unüberschaubarkeit der Anforderungsliste steigt folglich mit der Komplexität des zu entwickelnden Produkts. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Verbundprojektes eine Methode zur Formalisierung von Anforderungen erarbeitet. Wesentliche Bestandteile sind Taxonomien (z. B. für Wortklassen) sowie ein Parser⁹. Formalisierte Anforderungen lassen sich sowohl für die Auswahl von Lösungswissen als auch zur IT-gestützten Verifikation der Entwicklungsergebnisse fortlaufend nutzen.
- **Regelungs- und Softwareentwurf (Ziel: Detaillierte Lösung):** Die Informationsverarbeitung intelligenter Mechatronik kann nicht innerhalb der beteiligten Fachdisziplinen losgelöst voneinander entwickelt werden. Dies betrifft im hohen Maße den Regelungs- und Softwareentwurf. Wir unterscheiden grundsätzlich zwischen *Regelung* und *Ablaufsteuerung*. Mit *Regelung* bezeichnen wir die zeitkontinuierlichen Anteile, mit *Ablaufsteuerung* die ereignisdiskreten Anteile der Informationsverarbeitung. Aktuelle Beschreibungssprachen und Vorgehensweisen sehen eine sequentielle Erarbeitung der kontinuierlichen Anteile durch die Regelungstechnik und die ereignisdiskreten Anteile durch die Softwaretechnik vor. Anschließend erfolgt die Integration beider Anteile. Diese Vorgehensweise birgt ein hohes Fehlerpotential in sich, das durch mangelnde Kooperation und Synchronisation oftmals erst sehr spät im Entwurfsprozess ersichtlich wird. Vor diesem Hintergrund wurde aufbauend auf bestehenden Forschungsergebnissen¹⁰, eine Spezifikationstechnik erarbeitet, die den Regelungs- und Softwareentwurf vereint. Sie dient zur Modellierung der Informationsverarbeitung intelligenter mechatronischer Systeme, deren Regelung der Aktorik erheblich von der nachrichtenbasierten Kommunikation und Koordination der Systeme abhängig ist.

⁹ Ein Parser ist ein Bestandteil eines Interpreters oder Compilers, mit dessen Hilfe eine beliebige Eingabe in seine Bestandteile zerlegt und analysiert wird. Auf diese Weise werden z. B. textuelle Eingaben in Maschinensprache übersetzt und auswertbar.

¹⁰ Die Spezifikationstechnik MECHATRONICUML entstand im Rahmen des SFB 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ [GTB+03; EHH+13].

Semantic Web: Im Semantic Web wird das Lösungswissen für den Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme bereitgestellt. Es handelt sich hierbei um Lösungselemente und Lösungsmuster. Zur Einordnung der Wissensinhalte wurde auf der bestehenden Klassifikation eCl@ss aufgebaut. Es wurden Ontologien und Inferenzmechanismen entwickelt, um das Lösungswissen zielgerichtet bereitzustellen. Ferner wurde eine IT-Infrastruktur geschaffen, um die erarbeiteten Inhalte prototypisch umzusetzen.

- **Lösungselemente:** Lösungselemente lassen sich in materielle (physikalische) und immaterielle (Softwaretechnik-)Lösungselemente unterscheiden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der individuellen Aufbereitung für das Semantic Web kurz beschrieben.
 - Physikalische Lösungselemente: Zur effektiven Suche nach Lösungselementen wurden diese gemäß dem Klassifikationsstandard eCl@ss (Auswahlmerkmale) aufbereitet. Lösungselemente wurden zudem um Informationen über die Kombinierbarkeit und über die erfolgreiche Verwendung in unterschiedlichen Anwendungen erweitert. Ferner wurden detailreiche physikalisch motivierte Verhaltensmodelle inkl. spezifischer Parameter erstellt.
 - Lösungselemente der Softwaretechnik: Es wurden zwei Klassen von Softwaretechnik-Lösungselementen identifiziert und aufbereitet: Softwarekomponenten und Koordinationsprotokolle. Softwarekomponenten kapseln ein Verhalten und besitzen fest definierte Schnittstellen. Sie wurden von Herstellern u. a. für die Auswertung ihrer Sensoren und die Ansteuerung ihrer Aktoren bereitgestellt. Beispiele sind Funktionsbausteine für speicherprogrammierbare Steuerungen. Ferner wurden Koordinationsprotokolle definiert, die Abstimmungsvorgänge zwischen Softwarekomponenten mittels asynchroner Nachrichten beschreiben. Für die Simulation nachrichtenbasierter Echtzeitkoordination wurde zusätzlich die Modelica-Bibliothek RealTimeCoordinationLibrary entwickelt.
- **Lösungsmuster:** Lösungsmuster werden bereits in den frühen Phasen des Entwurfs eingesetzt. Sie sind daher durch ein hohes Maß an Interdisziplinarität geprägt und berücksichtigen Problemstellungen und Lösungsansätze aller beteiligten Disziplinen gleichermaßen. Es wurde daher eine einheitliche Strukturierung von Lösungsmustern erarbeitet. Lösungsmuster enthalten unterschiedliche Aspekte, die z. T. durch Partialmodelle von CONSENS realisiert werden. Zusätzlich wurden idealisierte Simulationsmodelle erstellt und den Lösungsmustern zugeordnet.

Durchgängige IT-Unterstützung: Die entwickelten Spezifikationstechniken wurden prototypisch in Softwarewerkzeugen umgesetzt. Die Umsetzung der Weiterentwicklung von CONSENS basiert auf dem bereits bestehenden Mechatronic Modeller. Dieser wurde um die erarbeiteten Inhalte aus dem Systementwurf – dem Partialmodell Verhalten–Zustände und der Anforderungssynthese – erweitert. Ferner wurde eine Schnittstelle zum Simulationstool Dymola geschaffen, das die automatisierte Generierung initialer Modelle ermöglicht. Für die Spezifikationstechnik MECHATRONICUML wurde der Softwareprototyp Embedded Modeller entwickelt. Dieser verfügt über Schnittstellen zum Mechatronic Modeller und zum Simulationstool Dymola. Eine vollautomatische Transformation ermöglicht die Überführung von MECHATRONICUML-Modellen in FMU¹¹-konforme Simulationsmodelle und in ausführbaren Code.

¹¹ Functional Mock-up Unit (FMU) / Functional Mock-up Interface (FMI), eine standardisierte Simulations-schnittstelle

Das Verbundprojekt ENTIME gliederte sich gemäß Bild 1.5 in Querschnittsprojekte (QP), Innovationsprojekte (IP) und Transferprojekte (TP). Diese wurden jeweils durch einen Partner verantwortet. Die Bearbeitung der Projekte erfolgte in Zusammenarbeit mehrerer Partner.

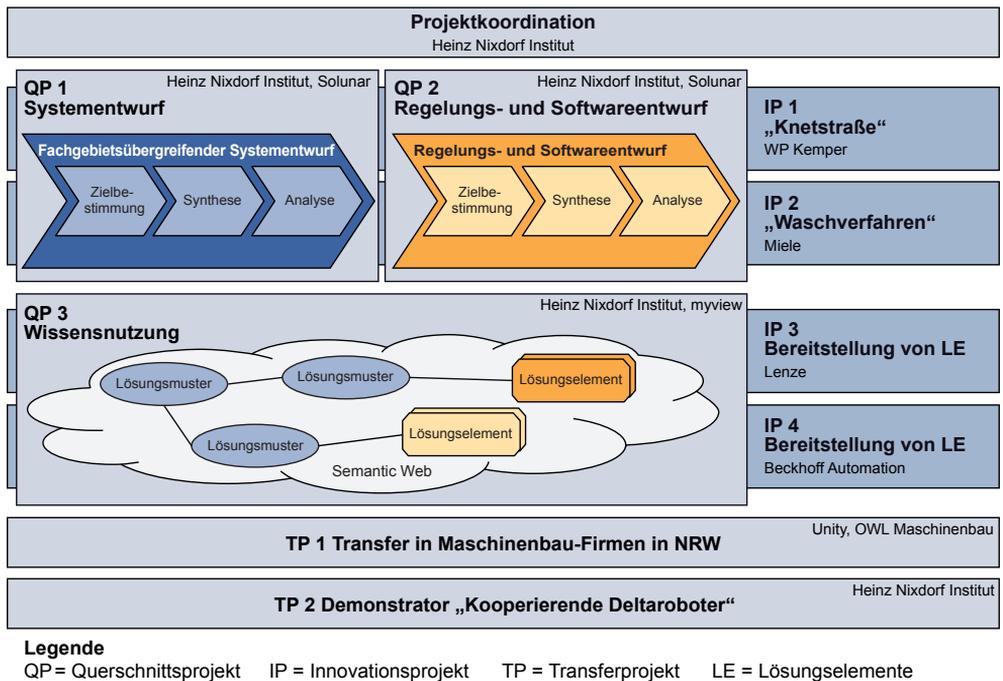


Bild 1.5 Projektstruktur

Querschnittsprojekte (QP): Sie dienen der Erarbeitung der für das Instrumentarium notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen. Die Inhalte wurden primär durch die Hochschulen und die beteiligten Softwarehäuser durchgeführt.

- QP 1: Systementwurf** (Lehrstuhl für Produktentstehung, Heinz Nixdorf Institut; Solunar GmbH): Zur Anwendung des Instrumentariums wurde in Anlehnung an die VDI 2206 ein allgemeingültiger Referenzprozess für den Entwurf mechatronischer Systeme erarbeitet. Hierbei sind folgende Merkmale wesentlich: die Einbindung von externem Lösungswissen Dritter, fortlaufende fundierte Analysen der Systemdynamik, vorrangige Berücksichtigung des Steuerungs- und Regelungsentwurfs. Ferner wurden im Rahmen von QP 1 notwendige Methoden und Inhalte erarbeitet, um Lösungswissen frühzeitig in den Entwurf einbinden zu können. Dazu zählt: die Formalisierung der Entwicklungsdokumente „Anforderungen“ und „Funktionen“, die Aufbereitung des Lösungswissens im Semantic Web in Form sog. Lösungsmuster und die Auswahl von Lösungsmustern und deren Kombination zur Prinziplösung. Die dabei entstandenen Weiterentwicklungen an der Spezifikationstechnik wurden prototypisch in einem Softwarewerkzeug implementiert. Die Ergebnisse wurden im TP 2 sowie in den Pilotprojekten zur Erarbeitung innovativer Produktkonzepte eingesetzt und validiert.
- QP 2: Regelungs- und Softwareentwurf** (Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Heinz Nixdorf Institut; Lehrstuhl für Softwaretechnik; Heinz Nixdorf Institut Pader-

born; Solunar GmbH): Das Ziel des QP 2 war eine Spezifikationstechnik für den integrierten Regelungs- und Softwareentwurf. Die erarbeitete Spezifikationstechnik ermöglicht die integrierte Entwicklung der ereignisdiskreten und kontinuierlichen Anteile der Informationsverarbeitung mechatronischer Systeme. Das Fachkonzept für die Erarbeitung der ereignisdiskreten Anteile wurde im Rahmen von QP 2 prototypisch in dem Softwarewerkzeug Embedded Modeller implementiert. Die integrierte Entwicklung im Zusammenspiel mit den kontinuierlichen Anteile wird durch speziell entwickelte Schnittstellen zum Simulationstool Dymola und MATLAB/Simulink ermöglicht. Ferner wurden in diesem Querschnittsprojekte alle notwendigen Mechanismen erarbeitet, um Lösungselemente der Softwaretechnik und physikalische Lösungselementen im Semantic Web bereitzustellen. Die Ergebnisse wurden ebenfalls im TP 2 sowie in den Pilotprojekten erfolgreich eingesetzt und validiert.

- **QP 3: Wissensnutzung** (myview systems GmbH): Aufbauend auf QP 1 und QP 2 stand im Kern des Vorhabens der Aufbau eines Semantic Web zur zielgerichteten Bereitstellung von Lösungswissen – Lösungselemente und Lösungsmuster. Hierzu wurde die dafür notwendige IT-Infrastruktur geschaffen. Ferner wurden die notwendigen Mechanismen für den Zugriff erarbeitet (Ontologien und Inferenzmechanismen). Es wurden mehrere Schnittstellen erarbeitet, um auf das Lösungswissen zugreifen zu können, z. B. ein Web-Interface, direkter Zugriff aus dem Tool Dymola.

Innovationsprojekte (IP): Das Instrumentarium entstand im Zusammenspiel mit der Umsetzung von vier Innovationsprojekten. Sie spielten eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung und Anwendung des Instrumentariums. Bei den Innovationsprojekten und den verantwortlichen Unternehmen sind zwei verschiedene Rollen hervorzuheben. Bei den Firmen Kemper und Miele handelt es sich um Anwender der neu entwickelten Entwurfstechnik. Sie nutzen das globale Angebot von Lösungswissen im Semantic Web für die Entwicklung innovativer Produktlösungen. Die Firmen Lenze und Beckhoff repräsentieren die Anbieter von Lösungswissen für das Semantic Web. Die entsprechende Aufbereitung ihrer Lösungselemente/-muster eröffnet ihnen einen neuen, zukunftsweisenden Vertriebskanal.

- Ziel der Firma *WP Kemper GmbH* war die Entwicklung eines innovativen Transportcarriers, der in hochautomatisierten Knetstraßen zur Teigherstellung und -weiterverarbeitung zum Einsatz kommt. Dabei wurde auf das entwickelte Instrumentarium zurückgegriffen. Nach der Erstellung der Prinziplösung folgte die Ausdetaillierung durch Zuhilfenahme bereitgestellter Lösungselemente aus dem Semantic Web.
- Die Firma *Miele & Cie. KG* entwickelte ein neuartiges Umflutwaschverfahren. Bei der Erprobung und Nutzung des Instrumentariums stand der modellbasierte Entwurf der Systemdynamik im Vordergrund.
- Die Firma *Lenze SE* hat im Rahmen des Projekts Lösungselemente aus ihrem umfangreichen Produktportfolio in die Ontologie für Lösungselemente eingegliedert. Darüber hinaus wurde ein Vorgehen zur Generierung von Simulationsmodellen erarbeitet. Hierzu wurden Schnittstellen zwischen unternehmensinternen und projektspezifischen Simulationsumgebungen geschaffen.
- Die *Beckhoff Automation GmbH* stellte Lösungselemente inklusive applikationsspezifischer Softwarebausteine und Simulationsmodelle bereit. Ferner erprobte sie das erarbeitete Instrumentarium exemplarisch an der Entwicklung einer Sortieranlage.

Die Bereitstellung von physikalischen Lösungselementen und Lösungselementen der Software sowie die Erarbeitung innovativer Produktkonzepte lieferten die Anforderungen, Einsatz- und

Evaluationsmöglichkeiten für das Instrumentarium. Bei den Unternehmen handelt es sich um Anbieter von Automatisierungssystemen (Industrie-PC, I/O- und Feldbuskomponenten, Antriebstechnik, Automatisierungssoftware etc.), einem mittelständischen Maschinen- und Anlagenbauer sowie einem Weltkonzern. Sie stellen somit einen repräsentativen Querschnitt der Unternehmenslandschaft in Deutschland, speziell der Region Ostwestfalen-Lippe, dar.

Transferprojekte (TP): Im Transferprojekt TP 1 hat die Unity AG gemeinsam mit dem OWL Maschinenbau e. V. die Möglichkeit geschaffen, die Projektergebnisse in die Maschinenbauunternehmen in NRW zu transferieren und nutzbar zu machen. Hierzu wurde ein Transferinstrumentarium erarbeitet, mit dessen Hilfe die Semantic-Web-basierte Produktentwicklung im Rahmen einzelner Kleinprojekte in mehreren Unternehmen geplant und umgesetzt werden konnte. Ferner wurde über die Internetportale des Heinz Nixdorf Instituts die Öffentlichkeit über die Projektfortschritte informiert. Für einen effektiven Erfahrungsaustausch wurde darüber hinaus ein Anwenderkreis initiiert. Dieser bildete eine Plattform für den regelmäßigen Austausch zwischen den beteiligten Hochschulpartner und interessierten Unternehmen. Gegenstand des Transferprojekts TP 2 war die Entwicklung des Demonstrators „Kooperierende Delta-Roboter“. Er diente zur Erprobung und Weiterentwicklung der im Projekt erzielten Ergebnisse und ist durchgängiges Anwendungsbeispiel in diesem Buch.

■ 1.3 Hinweis für den Leser

Dieses Buch richtet sich insbesondere an Entscheider in Unternehmen des Maschinenbaus sowie Entwicklungsingenieure der Disziplinen Maschinenbau, Regelungstechnik, Softwaretechnik und im Bereich Systems Engineering. Je nach Vorwissen und Interessen kann dieses Buch unterschiedlich gelesen werden.

Kapitel 2 liefert das für das Verständnis dieses Buchs notwendige Grundlagenwissen. Dieses Kapitel kann selektiv gelesen werden oder auch zum späteren Nachschlagen beim Lesen der weiteren Kapitel genutzt werden.

Die wesentlichen im Projekt erarbeiteten Inhalte werden in Kapitel 3 dargestellt. Zentrale Teile sind dabei Kapitel 3.2, das das Vorgehensmodell zur Entwicklung mechatronischer Systeme erläutert, sowie Kapitel 3.4, das die Aufbereitung von Lösungswissen für das Semantic Web beschreibt. Letzteres bildet einen wesentlichen inhaltlichen Kern der ENTIME-Methodik.

Die weiteren Teile des Kapitels 3 können dabei je nach thematischer Ausrichtung gelesen werden. Für Systems-Engineering-Verantwortliche sind vor allem die Kapitel 3.5 und 3.6 zu den frühen Phasen des Entwurfs wichtig. Ingenieure der Regelungs- und Softwaretechnik werden zusätzlich die Kapitel 3.7 und 3.8 lesen, in denen Details der fachdisziplinspezifischen Ausarbeitung beschrieben werden. Kapitel 3.9 zeigt, wie die Methodik mit Hilfe von Softwarewerkzeugen unterstützt werden kann. Es liefert somit Anregungen für eine mögliche Anpassung der im Unternehmen genutzten Werkzeuglandschaft.

Abschließend beschreiben in Kapitel 4 vier Unternehmen ihre Erfahrungen bei der Anwendung der ENTIME-Methodik. Je nach Zielsetzung können diese Kapitel wertvolle Hinweise zur Nutzbarmachung des in diesem Buch beschriebenen Instrumentariums liefern. Bei den Firmen Kemper (Kapitel 4.1) und Miele (Kapitel 4.2) stand dabei die Anwendung der modellbasierten Entwurfstechnik mit frühzeitigen Analysen im Vordergrund. Die Firma Lenze (Kapi-

tel 4.3) schildert, wie Informationen zu Lösungselementen aufbereitet werden können, und fokussiert dabei die Anbindung an eine existierende Unternehmens-IT-Infrastruktur. Die Firma Beckhoff (Kapitel 4.4) beschreibt ebenfalls, wie Wissen zu Lösungselementen zur Nutzung im Semantic Web aufbereitet werden kann, und evaluiert zudem das ENTIME-Instrumentarium (inkl. der Nutzung dieses Wissens) in einem beispielhaften Entwicklungsprozess.

■ Literatur zu Kapitel 1

- [AIS+77] ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.; JACOBSON, M.; FIKSDAHLKING, I.; ANGEL, S.: Pattern Language – Towns, Buildings, Construction. Oxford University Press, 1st Edition, 1977
- [Ben05] BENDER, K. (Hrsg.): Embedded Systems – qualitätsorientierte Entwicklung. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [BHL01] BERNERS-LEE, T.; HENDLER, J.; LASSILA, O. (Hrsg.): The Semantic Web. Scientific American, 2001
- [BGH+96] BLECK, A.; GOEDECKE, M.; HUSS, S.; WALDSCHMIDT, K. (Hrsg.): Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. B.G. Teubner, 1996
- [BD93] BRÖHLE, A.-P.; DRÖSCHL, W. (Hrsg.): Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. Oldenbourg Verlag, München, 1993
- [CR98] CLAUSSEN, U.; RODENACKER, W. G.: Maschinensystematik und Konstruktionsmethodik – Grundlagen und Entwicklung moderner Methoden. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1998
- [EHH+13] ECKARDT, T.; HEINZEMANN, C.; HENKLER, S.; HIRSCH, M.; PRIESTERJAHN, C.; SCHÄFER, W.: Modeling and Verifying Dynamic Communication Structures based on Graph Transformations. Computer Science – Research and Development 28.1, Feb. 2013. Published online in July 2011, S. 3–22
- [Ehr09] EHRENSPIEL, K. (Hrsg.): Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [GR11-ol] GANTZ, J.; REINSEL, D.: Extracting Value from Chaos. 2011. Unter: <http://www.emc.com/collateral/analyst-reports/idc-extracting-value-from-chaos-ar.pdf>
- [Gau10] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Frühzeitige Zuverlässigkeitsanalyse mechatronischer Systeme. Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [GF06] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K. (Hrsg.): Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [GFD+08] GAUSEMEIER, J.; FRANK, U.; DONOTH, J.; KAHL, S.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus. Konstruktion, Teil 1: Juli/August 2008, Teil 2: September 2008
- [GLL12] GAUSEMEIER, J.; LANZA, G.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren – Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [GSA+11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. In: 8. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, 19.–20. Mai, Paderborn, 2011

- [GTB+03] GIESE, H.; TICHY, M.; BURMESTER, S.; SCHÄFER, W.; FLAKE, S.: Towards the Compositional Verification of Real-Time UML Designs. In: Proceedings of the 9th European Software Engineering Conference held jointly with the 11th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE '03). ACM Press, Helsinki, Finnland, Sep. 2003, S. 38–47
- [Ise08] ISERMANN, R.: Mechatronische Systeme – Grundlagen. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 2008
- [Kol98] KOLLER, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1998
- [Lan00] LANGLLOTZ, G.: Ein Beitrag zur Funktionsstrukturentwicklung innovativer Produkte. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J; GROTE, K.-H. (Hrsg.): Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Sta73] STACHOWIAK, H.: Allgemeine Modelltheorie. Springer-Verlag, 1973
- [Suh98] SUH, N. P. (Hrsg.): Axiomatic Design Theory for Systems. Research in Engineering Design, No. 10, Springer-Verlag, London, 1998

Normen und Richtlinien

- [VDI2206] VDI-RICHTLINIE 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [VDI2221] VDI-RICHTLINIE 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [VDI2860] VDI-RICHTLINIE 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Beuth Verlag, Berlin, 1990

2

Grundlagen

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben und die für das Verständnis des vorliegenden Buchs notwendigen Grundlagen erläutert.

Zunächst werden in Kapitel 2.1 die zentralen Begriffe „intelligente Mechatronik“, „Modell“ und „domänenspezifische Sprache“ definiert. Ausgehend davon beschreibt Kapitel 2.2 die methodischen Grundlagen und Modellierungssprachen des modellbasierten Entwurfs intelligenter mechatronischer Systeme. Diese bilden die Grundlage für die in ENTIME entwickelten Spezifikationstechniken und Entwicklungsmethoden. Abschließend werden in Kapitel 2.3 die Grundlagen zur Wissensrepräsentation mit Hilfe semantischer Technologien wie des Semantic Web erläutert. Mit Hilfe dieser semantischen Technologien kann die Auswahl und Integration der besten geeigneten Lösungselemente unterschiedlicher Anbieter signifikant verbessert werden.

■ 2.1 Begriffsdefinitionen

**Harald Anacker, Stefan Dziwok, Jürgen Gausemeier, Felix Oestersötebier,
Uwe Pohlmann, Jan Rieke, Wilhelm Schäfer, Ansgar Trächtler**

Im Folgenden werden zwei für dieses Buch zentrale Begriffe erläutert. Intelligente mechatronische Systeme, auf die sich die in diesem Buch erläuterten Entwicklungsmethoden beziehen, werden in Kapitel 2.1.1 eingeführt und ihre grundsätzliche Struktur und Funktionsweise erklärt. Die im vorliegenden Buch beschriebenen Entwicklungsmethoden basieren auf Modellen; Kapitel 2.1.2 führt daher den Begriff des Modells ein. In Kapitel 2.1.3 wird der Modellbegriff durch das Konzept der domänenspezifischen Sprache weiter präzisiert und formalisiert.

2.1.1 Intelligente Mechatronik

Der Begriff Mechatronik ist ein Kunstwort aus Mechanik und Elektronik [Mor69]. Gemeint ist die Erweiterung mechanischer Systeme um elektronische Funktionen. Kern der heute existierenden Definitionen lieferten HARASHIMA ET AL. Sie definierten Mechatronik erstmalig als das synergetische Zusammenwirken von Mechanik, Elektrik/Elektronik, Regelungs- und Softwaretechnik inkl. Entwicklung und Produktion [HTF96]. Darauf aufbauend liefert die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ folgende Übersetzung der im Original engl. Definition.

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie bei der Prozessgestaltung.“ [VDI2206]

Die Variantenvielfalt an mechatronischen Systemen ist groß. Wir unterscheiden daher drei Klassen mechatronischer Systeme (vgl. Bild 2.1):

- Systeme, die auf der räumlichen Integration von Mechanik und Elektronik beruhen
- Mehrkörpersysteme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten
- Intelligente Mechatronik mit inhärenter Teilintelligenz

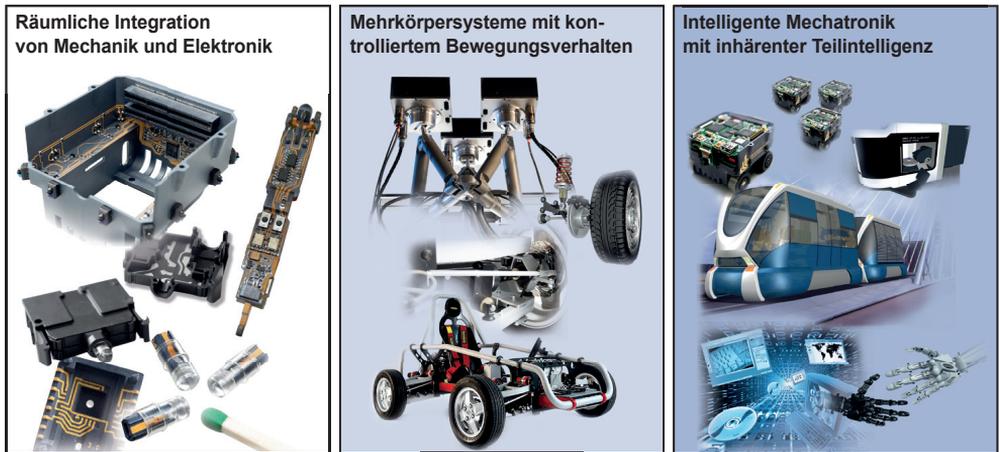


Bild 2.1 Klassen mechatronischer Systeme

Ziel der ersten Klasse ist eine hohe Integration mechanischer und elektronischer Funktions-träger auf kleinem Bauraum. Wesentliche Erfolgspotentiale liegen in der Miniaturisierung, Funktionsintegration, der höheren Zuverlässigkeit und den geringeren Herstellungskosten. Zentrale Aufgabe ist die Aufbau- und Verbindungstechnik z. B. auf Basis innovativer Technologien wie MID (Molded Interconnect Devices). Aufgrund starker Wechselwirkungen zwischen Produkt und zugehörigem Produktionssystem sind diese parallel und integrativ zu entwickeln [GF06].

Bei mechatronischen Systemen der zweiten Klasse liegt der Fokus auf der Verbesserung der Verhaltensweise. Ziel ist es, technische Systeme mit kontrolliertem Bewegungsverhalten zu entwickeln. Systeme dieser Klasse können durch Sensor-Aktor-Verknüpfungen sowie eine Informationsverarbeitung selbstständig auf Veränderungen in ihrer Umgebung reagieren. Die Hauptaufgabe liegt in der ganzheitlichen Optimierung des Gesamtsystems, indem sowohl das mechanische Grundsystem als auch die Informationsverarbeitung auf die erforderliche Bewegungsdynamik abgestimmt werden [JIZ+10; GF06].

Aus der sich abzeichnenden Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik eröffnen sich neuartige Perspektiven für mechatronische Systeme, die weit über die bekannten Standards hinaus gehen: Intelligente mechatronische Systeme. Systeme dieser dritten Klasse besitzen inhärente Teilintelligenz. Sie sind somit in der Lage sich ihrer Umgebung und den Wünschen ihrer Anwender im Betrieb anzupassen. Sie stiften Nutzen im Haushalt, in der Produktion, im Handel, auf der Straße; sie sparen Ressourcen, sind intuitiv zu bedienen und verlässlich. Schlüsselwörter wie *Selbstoptimierung*, *Things that Think*, *Cyber-Physical Systems* oder *Industrie 4.0* repräsentieren diese faszinierende Perspektive intelligenter Mechatronik. Sie sind charakterisiert durch eine hohe informationstechnische Vernetzung untereinander als auch innerhalb der Systeme zu Subsystemen.

Trotz der hohen Bandbreite an mechatronischen Systemen weisen alle Systeme eine gleiche Grundstruktur bzw. Referenzarchitektur auf. Bild 2.2 zeigt die Grundstruktur eines mechatronischen Systems in Anlehnung an die VDI2206. Mechatronische Systeme bestehen in der Regel aus vier Einheiten: einem **Grundsystem**, einer **Sensorik**, einer **Aktorik** und einer **Informationsverarbeitung**. Diese vier Einheiten bilden einen systeminternen Regelkreis. Einflüsse aus der Umgebung, in der das System betrieben wird, werden von der Sensorik detektiert. Ferner existieren zwei weitere Schnittstellen nach außen: eine Mensch-Maschine-Schnittstelle, über die der Mensch Einfluss auf das System nehmen kann, und einem Kommunikationssystem für den Informationsaustausch mit anderen (technischen) Systemen. Die Leistungsversorgung kann sowohl intern als auch extern erfolgen [VDI2206].

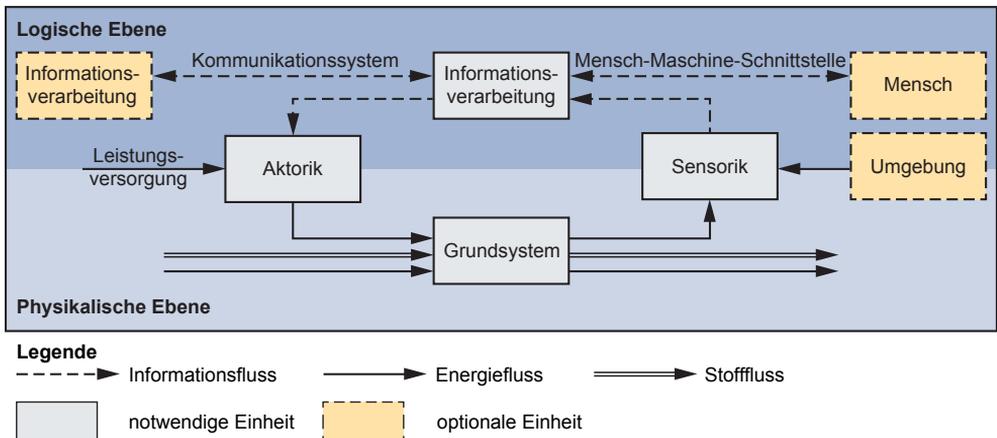


Bild 2.2 Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI2206]

Grundsystem: Das Grundsystem stellt im Normalfall eine mechanische, elektromechanische, hydraulische oder pneumatische Struktur dar. Es ist somit das Kernelement der physikalischen Ebene. Technologische Weiterentwicklungen ermöglichen auch Kombinationen dieser Strukturen.

Aktorik: Der Aktor (bzw. Aktuator) hat die Aufgabe, durch eine gewünschte Aktion unmittelbar an dem Grundsystem Einfluss auf die Zustandsgrößen¹ zu nehmen. Durch den technologischen Fortschritt erweitern sich die Einsatzfelder von Aktoren stetig.

Sensorik: In einem mechatronischen System werden sowohl ausgewählte Zustandsgrößen des Grundsystems als auch äußere Einflüsse der Umgebung von den Sensoren erfasst. Es folgt die Übermittlung der gewonnenen Messwerte an die Informationsverarbeitung.

¹ Im Buch werden zwei Arten von Zuständen unterschieden, von denen hier die erste gemeint ist:

- Zustandsgrößen sind physikalische Größen eines technischen Systems, durch deren Wert zu einem beliebigen Zeitpunkt t_0 der Ablauf des Systems für $t > t_0$ eindeutig bestimmt ist, sofern die Eingangsgrößen des System für $t > t_0$ gegeben sind [Foe13].
- Bei ereignisdiskreten Steuerungssystemen beschreibt ein Zustand (auch: Systemzustand) im Zustandsautomaten eine Situation, während der eine bestimmte, unveränderliche Bedingung gilt.