

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



**10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik
KT2012 | Residenzschloss Dresden | 14.–15. Juni 2012**

Stelzer · Grote · Brökel · Rieg · Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

Entwickeln – Entwerfen – Erleben.
Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung
10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)
Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)
Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)
Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei
ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

ma design
//ENGINEERING

Continental 

C.B.I.M.
onsulting

TEDATA

xPLM
Solution

REISS

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.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 987-3-942710-80-0

© 2012 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Jürgen Gausemeier, Christian Tschirner,
Roman Dumitrescu & Tobias Gaukster

Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem als Basis für eine erfolgreiche Produktentstehung

1 Einleitung

Maschinenbauliche Systeme beruhen heute vielfach auf einem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektrotechnik/Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik. Über die Mechatronik hinausgehend werden sie eine inhärente Intelligenz aufweisen und damit Produktfunktionen ermöglichen, die bislang nur von biologischen Systemen bekannt sind. Begriffe wie Intelligente Objekte, Cyber-Physical Systems und Selbstoptimierung charakterisieren diese Perspektive (acatech 2009, 2011, Broy & Geisberg 2012, Adelt et al. 2009). Sie werden sich selbstständig und flexibel an wechselnde Betriebs- bzw. Umgebungsbedingungen anpassen können. Die Entwicklung derartiger Systeme kann nicht aus dem Blickwinkel einer Disziplin allein vorgenommen werden. Das gilt sowohl für mechatronische als auch für intelligente technische Systeme. Daher ist schon frühzeitig ein fachdisziplinübergreifendes Konzept zu erarbeiten, das den grundsätzlichen Aufbau und die Wirkungsweise des Systems beschreibt und die Grundlage für die etablierten Ansätze der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase bildet, wie z.B. die VDI-Richtlinie 2221 (Verein Deutscher Ingenieure 1993) oder das Y-Modell der Schaltungstechnik (Bleck et al. 1996). Ferner zeichnet sich die Notwendigkeit ab, Produkt und Produktionssystem von Beginn an im Wechselspiel zu entwickeln: Produk-

te und ihre korrespondierenden Produktionssysteme lassen sich heute nicht mehr trennen. Gerade bei komplexen Produkten haben Fertigungstechnologien und neue Werkstoffe großen Einfluss auf das Produktkonzept. Andererseits ist auch festzustellen, dass ein neues Produktkonzept die Entwicklung von Fertigungstechnologien und -prozessen erforderlich macht.

Im Prinzip sind deshalb die Grenzen des zu entwickelnden Systems so zu erweitern, dass sie das Produktionssystem von Beginn an mit einschließen. Für diese Art einer ganzheitlichen, integrativen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem gibt es heute nur erste Ansätze, allerdings keine etablierte Methodik. Für die Phasen Entwurf und Ausarbeitung dagegen haben die fachdisziplinspezifischen Entwicklungsmethoden einen ausgezeichneten Stand erreicht. Sie konzentrieren sich jedoch auf das jeweilige Fachgebiet und berücksichtigen weder das Zusammenwirken der einzelnen Disziplinen noch ein Gesamtmodell des Systems, das dessen disziplinübergreifende Zusammenhänge angemessen dargestellt. Ferner ermöglichen sie keine frühzeitigen Analysen, was zu hohen Kosten und unnötigen Iterationsschleifen führt. Es bedarf daher einer Beschreibungssprache zur fachdisziplinübergreifenden Spezifikation des Produkt- und Produktionssystemkonzepts und zur Synchronisation aller fachdisziplinübergreifenden Entwicklungstätigkeiten. Diese Beschreibungssprache sollte im Sinne der Systemtechnik drei wesentliche Anforderungen erfüllen (Ropohl 1975, Ropohl 2009):

Ganzheitlichkeit ist das grundlegende Wesensmerkmal der Systemtechnik. Die Komplexität der Systeme lässt sich nur mit einem interdisziplinären ganzheitlichen Ansatz bewältigen. Für die Entwicklung der technischen Systeme von morgen ist es daher unabdingbar, Produkt und Produktionssystem integrativ zu entwickeln.

Ein technisches Erzeugnis ist das Produkt eines Handlungssystems: eine Produktidee wird über ein Handlungssystem in ein Sachsystem überführt. Das bedeutet, dass die *Durchgängigkeit* sämtlicher Informationen und Modelle innerhalb der Produktentstehung von der ersten Idee bis zum Serienanlauf sichergestellt sein muss.

Die Systemtechnik und ihre Methoden sollen Hilfsmittel bei der Synthese interdisziplinärer Arbeit sein. Daher muss im Rahmen der fachdisziplinübergreifenden Zusammenarbeit die *Anwendbarkeit* sämtlicher Methoden und Werkzeuge sichergestellt werden. Nur so können neue Ansätze Akzeptanz bei den Arbeitspersonen der Produktentstehung finden und erfolgreich eingesetzt werden.

2 Model-Based Systems Engineering

Die Lücke zwischen der Produktkomplexität technischer Systeme und der Leistungsfähigkeit fachdisziplinspezifischer Entwicklungsmethoden kann nur durch eine frühzeitige systemische Modellierung geschlossen werden. Dabei ersetzt diese nicht die etablierten Methoden der Fachdisziplinen, sondern wird diesen vorangestellt.

So sieht es auch das International Council on Systems Engineering (INCOSE), welches das Model-Based Systems Engineering (MBSE) als wirksamen Lösungsweg zur Entwicklung innovativer Systeme versteht. MBSE adressiert die Formalisierung sämtlicher Modelle – insbesondere in den frühen Phasen der Produktentstehung – und soll die Systementwicklung durchgängig über den gesamten Lebenszyklus unterstützen (INCOSE 2007). Die gemeinsam von der Object Management Group (OMG) und INCOSE im Rahmen eines Industriekonsortiums entwickelte SysML (Systems Modeling Language) ist dabei das populärste Beispiel der MBSE-Aktivitäten (Friedenthal et al. 2011). Sie unterstützt die Spezifikation, Analyse, Design, Verifikation und Validierung von Systemen, die beispielsweise Hardware, Software, Informationen und Anlagen enthalten können. Neben der SysML als reine Modellierungssprache wurden in den letzten Jahren auch MBSE-Methoden und Vorgehensmodelle entwickelt. Die bekanntesten Beispiele hierfür sind die Object Oriented Systems Engineering Method (OOSEM) der INCOSE (Friedenthal et al. 2011) und der Systems Modeling Process (SYSMOD) von Weikiens (Weikiens 2008). Weitere Beispiele sind Harmony-SE, RUP/SE, ViTech, JPL State Analysis und SysCARS, die meist speziell auf die Entwicklungsumgebungen der entwickelnden Firmen ausgerichtet wurden.

Trotz zahlreicher Bemühungen können die Aspekte Ganzheitlichkeit und Durchgängigkeit bislang von keinem Ansatz methodisch und werkzeugtechnisch unterstützt werden. Gerade die Idee der Durchgängigkeit – oder in der Sprache der Modelltransformations-Community: Vertikale Konsistenz – ist bislang lediglich eine kühne Vision. Dennoch besteht kein Zweifel: die entsprechenden Anstrengungen vorausgesetzt, ist die Lösung dieser Herausforderung nur noch eine Frage der Zeit. Weitaus schwieriger gestaltet sich die Realisierung der Anwendbarkeit und Akzeptanz aktueller Ansätze. Alle Modellierungssprachen wurden aus der Softwareentwicklung heraus entwickelt und maximal um die Abbildung von EE-Systemen ergänzt. Mechatronische Systeme sind damit nicht anwender- und fachgerecht abbildbar. Die enge Verbindung zur Softwareentwicklung führt dazu, dass selbst Standards wie die SysML nicht als fachdisziplinunabhängig eingestuft werden können. Gerade in den stark maschinenbaulich geprägten kleinen und mittleren Unternehmen stößt das auf wenig Gegenliebe. Das ist aber nicht verwunderlich: so wurden im Software-Engineering lange Zeit selbst einfache Grundanforderungen an die grafische Notation vernachlässigt oder gar missachtet. Stattdessen wurde meist nur auf die Erstellung ei-

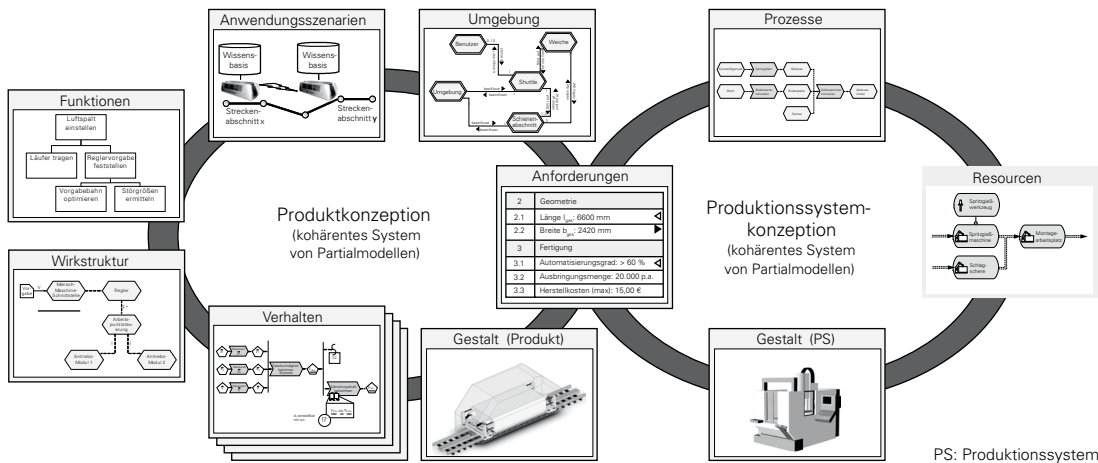


Abbildung 1: System kohärenter Partialmodelle zur domänenübergreifenden Beschreibung der Prinzipiellösung des mechatronischen Systems und des zugehörigen Produktionssystems

ner korrekten Semantik geachtet, nicht aber auf die korrekte Darstellung im Sinne einer visuellen Semantik. Dabei hat aber gerade dieser Aspekt einen größeren Einfluss auf Anwendbarkeit und Akzeptanz, als man bislang annimmt (Moody 2009). Für den Erfolg des MBSE sollte zukünftig mehr Gewicht auf diese Aspekte gelegt werden. Ein guter Maßstab zur Beurteilung ist hierbei das 3-P-Konzept, wonach Methoden und Werkzeuge nur dann akzeptiert werden, wenn sie in ihrer Performance, ihrer Darstellung (Presentation) und ihrer Einbindung in den Prozess überzeugen (Badke-Schaub et al. 2011). Diese Anforderungen versuchen wir schon seit geraumer Zeit in unseren Forschungsaktivitäten zum MBSE zur berücksichtigen.

3 CONSENS: Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems

Mit der Spezifikationstechnik CONSENS existiert ein Ansatz, der die grundsätzlichen Anforderungen eines systemtechnischen Ansatzes im Wesentlichen erfüllt und eine gute Stoßrichtung für weitere Arbeiten aufzeigt.

3.1 Spezifikation der Prinziplösung mit CONSENS

CONSENS setzt sämtliche aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht notwendigen Aspekte zur Beschreibung der Prinziplösung eines mechatronischen Systems in einer semi-formalen Notation um: Anforderungen, Umfeld, Anwendungsszenarien, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt und Verhalten. Ebenso werden die Aspekte Anforderungen, Prozesse, Ressourcen und Gestalt des Produktionssystems berücksichtigt, welche die Prinziplösung eines Produktionssystems beschreiben. CONSENS ist den fachdisziplinspezifischen Methoden vorangestellt und ergänzt diese (Gausemeier et al. 2009). Abbildung 1 zeigt die genannten Aspekte. Diese werden rechnerintern durch Partialmodelle repräsentiert. Da die Aspekte zueinander in Beziehung stehen und ein konsistentes Ganzes ergeben, besteht die Prinziplösung aus einem kohärenten System von Partialmodellen.

Im Folgenden werden die genannten Partialmodelle kurz beschrieben. Für eine detaillierte Beschreibungen sei auf (Gausemeier et al. 2009) und (Brandis et al. 2009) verwiesen.

Umfeld: Das System wird zu Beginn als »Black Box« in seinem Umfeld abgebildet. Alle Einflüsse, die auf das System wirken, sowie Systemelemente des Umfelds, die in Wechselwirkung mit dem System stehen, werden modelliert.

Anwendungsszenarien: Anwendungsszenarien beschreiben eine situationsspezifische Sicht auf das in der Prinziplösung beschriebene System und das Systemverhalten. Sie bestehen aus einem Steckbrief und Referenzen auf alle für das Szenario relevanten Elemente der Prinziplösung.

Anforderungen: Das Partialmodell umfasst eine strukturierte Sammlung aller Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt und das zugehörige Produktionssystem. In den Entwicklungsphasen Konzipierung und Konkretisierung sind diese Anforderungen umzusetzen. Jede Anforderung wird textuell beschrieben. Quantifizierbare Anforderungen werden durch Attribute und deren Ausprägungen konkretisiert. Checklisten geben Hilfestellung beim Aufstellen von Anforderungslisten (Pahl et al. 2007, Roth 2000).

Funktionen: Es handelt sich um eine hierarchische Aufgliederung der Funktionalität. Eine Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen. Funktionen werden durch Lösungsmuster bzw. deren Konkretisierungen realisiert. Eine Untergliederung in Subfunktionen erfolgt so lange, bis zu den Funktionen sinnvolle Lösungsmuster gefunden werden.

Wirkstruktur: In der Wirkstruktur werden die Systemelemente, deren Merkmale sowie die Beziehungen der Systemelemente zueinander beschrieben. Die Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zur Erfüllung der Gesamtfunktion werden miteinander verknüpft. Ziel ist die Abbildung des grundsätzlichen Aufbaus und der prinzipiellen Wirkungsweise des Systems. Systemelemente repräsentieren Systeme, Module, Bauteile oder Software-Komponenten. Stoff-, Energie- und Informationsflüsse sowie logische Beziehungen beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen.

Verhalten: Bei der Spezifikation von mechatronischen Systemen spielen die Modellierung von Zuständen und Zustandsübergängen sowie die Auswirkungen auf die Wirkstruktur eine wesentliche Rolle. Diese Art der Modellierung erfolgt im Partialmodell Verhalten.

Gestalt (Produkt): Bereits in der Konzipierung sind erste Festlegungen der Gestalt des Systems vorzunehmen. Sie sind ebenfalls Teil der Prinziplösung. Der Aspekt umfasst Angaben über Anzahl, Form, Lage, Anordnung und Art der Wirkflächen und Wirkorte des Systems. Des Weiteren können Hüllflächen und Stützstrukturen beschrieben werden. Die rechnerunterstützte Modellierung erfolgt später mit Hilfe gängiger 3D CAD-Systeme.

Prozesse: Die Fertigung und Montage wird mit Hilfe von Prozessen spezifiziert. Die Prozesse beschreiben den Ablauf der Montage als eine Folge von Arbeitsvorgängen. Diese beinhaltet Füge-, Handhabungs-, Kontroll- und Justierprozesse sowie Sonderoperationen wie Reinigen und Erwärmen. Prozesse werden durch die zu erfüllenden Funktionen und Montageverfahren sowie weitere Attribute beschrieben. Die Prozessschritte werden im Laufe der Ausarbeitung des Produktentwurfs verfeinert und konkretisiert (Brandis et al. 2009).

Ressourcen: Den Prozessen werden Ressourcen zugeordnet. Dies umfasst die zur Durchführung der Prozesse benötigten Sachmittel sowie das Personal (Deutsches Institut für Normung e.V. 1987). Sie werden durch Attribute und Gestaltinformationen konkretisiert.

Gestalt (Produktionssystem): Analog zur Produktentwicklung werden bereits während der Konzipierung des Produktionssystems erste Festlegungen zu seiner Gestalt getroffen. Unter Gestalt verstehen wir Arbeitsräume und Platzbedarf von Maschinen oder Wirkflächen von Handhabungseinrichtungen.

3.2 Konzipierung des Systemmodells: Produkt und Produktionssystem

Das grundsätzliche Vorgehen zur Konzipierung von Produkt und Produktionssystem sei ausgehend von Abbildung 2 erläutert. Es zeigt die wesentlichen Entitätsmengen und ihre Beziehungen

zueinander. Die genannten Aspekte sind im Rahmen der Konzipierung im Wechselspiel zu bearbeiten, wenngleich es eine gewisse Reihenfolge gibt. Den Startpunkt bilden eine Umfeldbeschreibung, Anwendungsszenarien und Anforderungen. Aus den Anforderungen werden Funktionen abgeleitet und hierarchisch angeordnet. Basierend auf den Funktionen erfolgt die Modellierung der Wirkstruktur. Diese verknüpft die Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zur Erfüllung der Gesamtfunktion. Die Modellierung der Wirkstruktur erfolgt funktionsorientiert. Das heißt, Systemelemente werden aufgrund ihrer Funktion bzw. ihres funktionalen Zusammenhangs zu Modulen aggregiert oder in Teilfunktion erfüllende Systemelemente dekomponiert. Bauliche Zusammenhänge finden hierbei keine Berücksichtigung. Aufbauend auf der Wirkstruktur wird die Gestalt des Systems modelliert.

Mit dem Vorliegen von Anforderungen, Wirkstruktur und ersten Gestaltinformationen des Produkts wird mit der Konzipierung des Produktionssystems begonnen. Anforderungen an das Produktionssystem werden aus der Anforderungsliste des Produkts gefiltert. Anschließend wird eine erste Montagereihenfolge der Bauteile und Baugruppen ermittelt. Hierfür wird die funktionsorientierte Wirkstruktur in eine gestaltorientierte Baustruktur überführt. Diese beschreibt den Bauzusammenhang eines Produkts, d.h. die räumliche und logische Aggregation von Bauteilen zu Baugruppen und Erzeugnissen (Pahl et al. 2007).

Die Montageprozesse werden mittels Funktionen beschrieben, zum Beispiel »Getriebemotor und Gehäuse verbinden«. Sie werden im Laufe der Ausarbeitung des Produktentwurfs verfeinert und konkretisiert. Hierbei ist eine Auswahl geeigneter Montageverfahren notwendig, zum Beispiel »Schrauben«. Anforderungen, Wirkstruktur und Gestalt bestimmen notwendige Eigenschaften der Verbindungen. Die zerstörungsfreie Lösbarkeit, geeignete Materialien oder die Art des Zusammenhalts sind Beispiele solcher Verbindungseigenschaften. Die Baustruktur wird um diese Informationen erweitert. Auf Grundlage dieser Verbindungseigenschaften kann eine Auswahl möglicher Montageverfahren getroffen werden. Diese Auswahl sollte durch eine Ontologie unterstützt werden.

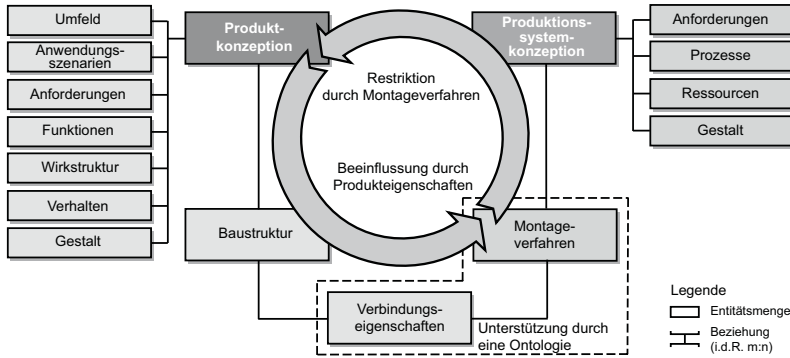


Abbildung 2: Vereinfachte Relationale Darstellung eines semantischen Informationsmodells für die Konzeption von Produkt und Produktionssystem

Dieser Ansatz zeigt deutlich die Wechselwirkungen zwischen Produkt und zugehörigem Produktionssystem. Als Ergebnis liegen die Prinziplösungen von Produkt und Produktionssystem und ihre wechselseitigen Abhängigkeiten vor. Damit ist das mit CONSENS erstellte Systemmodell die Grundlage für die fachdisziplinspezifische Ausarbeitung des Produkts sowie die Konkretisierung der Aspekte eines Produktionssystems (Arbeitsablaufplanung, Arbeitsstättenplanung, Arbeitsmittelplanung, Materialflussplanung).

3.3 Mechatronic Modeller

Schon früh haben wir erkannt, dass ein derartiger Ansatz mit einem entsprechenden Werkzeug unterstützt werden muss. Daher haben wir den Mechatronic Modeller entwickelt, der speziell auf die Anforderungen von CONSENS ausgelegt ist und offene Schnittstellen zu den Werkzeugen anderer Hersteller besitzt. Die Produktkonzeption wird rechnerintern in einem formalen zusammenhängenden Datenmodell abgebildet, gleiches gilt für die Partialmodelle des Produktionssystems. Gegenüber einer kommerziellen Standardsoftware zeichnet sich ein solches dediziertes Werkzeug dadurch aus, dass hier formale, zu der Sprachspezifikation konforme Modelle zum Einsatz kommen. Die Vorteile liegen dabei auf der Hand: Auf Basis eines Meta-Modells lässt sich die Konsistenz eines formalen Modells anhand seiner Konformität zu seinem Metamodell überprüfen.

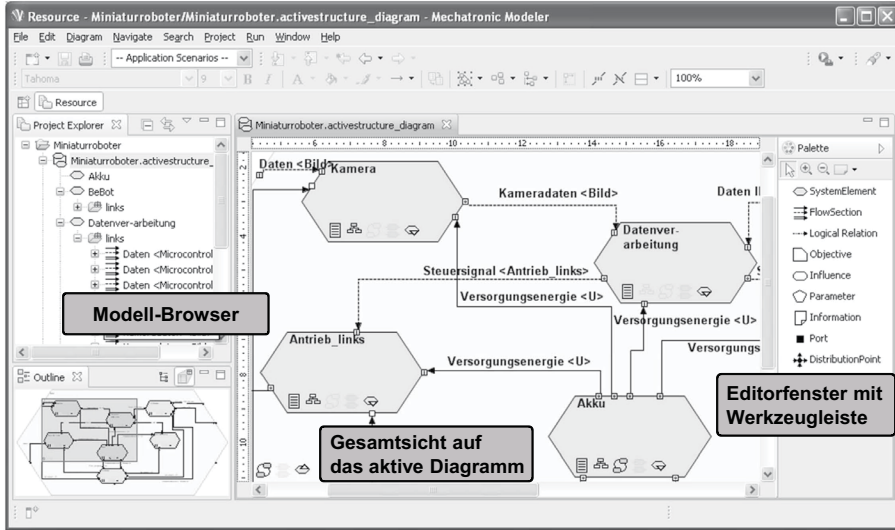


Abbildung 3: Oberfläche des Software-Werkzeugs Mechatronic Modeller

Neben dem Aspekt der reinen Modellkonsistenz bietet ein formales Modell weitere Möglichkeiten zur Analyse. So lassen sich formale Modelle beispielsweise mit formalen Methoden (z.B. Model-Checking) analysieren, oder – die Vollständigkeit des Modells vorausgesetzt – sogar simulieren. Zudem werden Modelltransformationen unterstützt, wie sie beispielsweise beim Übergang zwischen den Entwicklungsphasen Konzipierung und Konkretisierung zum Einsatz kommen können (Gausemeier et al. 2009). Darüber hinaus werden weitere Analysen möglich, wie etwa eine Konzept-FMEA und frühzeitige Kostenanalysen. Darüber hinaus sind sämtliche Analysen à la DSM (Design Structure Matrix) möglich.

4 Management der Produktentstehung auf Grundlage eines fachdisziplinübergreifenden Systemmodells

Durch die Anwendung von CONSENS und Mechatronic Modeller ergeben sich neue Möglichkeiten für Analysen von Produkt und Produktionssystem. In der Konzipierung umfasst dies z.B. Methoden zur Produktmodularisierung. Ferner können auf Basis des Systemmodells erste aussagefähige Analysen zu Herstellkosten

oder zur Robustheit des Produktionssystems hinsichtlich verschiedener Produktvarianten durchgeführt werden. Dies unterstützt die Auswahl optimaler Produkt- und Produktionssystem-Kombinationen, die gezielte Steuerung von Varianten sowie die Überwachung von Entwicklungs- und Herstellkosten.

Ebenfalls kann CONSENS zur Planung und Steuerung von Entwicklungsprojekten genutzt werden, da eine direkte Abhängigkeit zwischen der Struktur des Systems und der Struktur des Entwicklungsprozesses besteht. So besteht bspw. für das Projektmanagement die Möglichkeit, Experten früher und besser für bestimmte Aufgaben auszuwählen und durch die Offenlegung von Kommunikationsschnittstellen den Abstimmungsaufwand einzelner Entwicklerteams zu reduzieren und damit eine verbesserte Projektdurchführung zu ermöglichen.

4.1 Produktstrukturierung mit CONSENS

Die Produktstruktur wird im Rahmen der frühen Entwicklungsphasen erarbeitet und beeinflusst die Eigenschaften und die weitere Entwicklung des Produkts stark. Bei der Produktstrukturierung werden unterschiedliche Beziehungsaspekte – räumliche Abhängigkeiten, Stoff-, Energie- und Informationsflüsse sowie Eigenschaften der Systemelemente – untersucht, um das System hierarchisch zu staffeln. Voraussetzung dafür ist ein übergreifendes Verständnis der Funktionsweise des Produkts und aller seiner Abhängigkeiten, die aus dem interdisziplinären Ansatz der Mechatronik resultieren (Badke-Schaub et al. 2004). Das angestrebte Resultat ist eine hierarchische Erzeugnisgliederung, die das Produkt in parallel weiterzuentwickelnde Einheiten unterteilt und damit die Komplexität handhabbar macht. Auf Basis von CONSENS kann für unterschiedliche Entwicklungsaufgaben die optimale Produktstruktur ermittelt und ihre Erstellung unterstützt werden. Die Produktstrukturierung mit CONSENS erfolgt dabei parallel zur Modellierung der Prinziplösung. Dabei werden vier Schritte durchlaufen (Steffen 2007):

- Analyse der Entwicklungsaufgabe
- Bestimmung relevanter Entwurfsregeln
- Anwendung der Entwurfsregeln
- Bewertung der Produktstruktur

Eine konkrete Entwicklungsaufgabe wird zunächst einem von neun charakteristischen Grundtypen an Entwicklungsaufgaben zugeordnet. Hieran kann ermittelt werden, zu welchem Grundtyp die größte Ähnlichkeit besteht und welche Ausprägung der Produktstruktur dementsprechend anzustreben ist. Entwurfsregeln beschreiben detailliert die Produktstrukturierung unter Beachtung unterschiedlicher Beziehungsaspekte. Sie sind auf die Eigenschaften mechatronischer Systeme ausgerichtet, wie Miniaturisierung, Wiederverwendung, Rekonfiguration etc. Die Anwendung der Entwurfsregeln im Entwicklungsablauf wird durch mehrere matrixbasierte Methoden unterstützt. Mit der Design Structure Matrix können die Abhängigkeiten zwischen den Systemelementen des Produkts betrachtet werden, mit der Module Indication Matrix werden die Eigenschaften der Systemelemente in die Produktstrukturierung einbezogen. Die unterschiedlichen Beziehungsaspekte werden gegeneinander abgewogen und zur angestrebten Erzeugnisgliederung geführt. In einer abschließenden Bewertung wird sichergestellt, dass die angestrebte Produktstruktur erreicht wurde (Abbildung 4). Gleichzeitig liegt auch die Prinziplösung als Grundlage für die weitere Entwicklung vor.

4.2 Planung und Steuerung von Entwicklungsprojekten mit CONSENS

Einen Ansatz zur Planung und Steuerung von Entwicklungsprojekten haben wir aufbauend auf den Arbeiten von (Sosa et al. 2007) in CONSENS integriert. Mit ihrem Projektmanagement-Tool können die Ursachen schlechter Kommunikation aufgedeckt und entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet werden. Da das Projektmanagement-Tool auf eine Matrixdarstellung zurückgreift, konnten wir es problemlos rechnerisch umsetzen und an den Mechatronic Modeller koppeln.

Die Grundidee ist folgende: Teams müssen in der Entwicklung effektiver kommunizieren. Die notwendigen Verantwortlichkeiten werden jedoch oft nur nach Organigramm definiert, weshalb die tatsächlichen Kommunikationsbeziehungen nicht aufgedeckt werden. Unternehmen und Projektleiter würden davon profitieren, wenn sie die tatsächlichen Kommunikationsbeziehungen innerhalb eines Projekts kennen. Mit der Methode von (Sosa et al. 2007) können genau

diese Schnittstellen identifiziert werden (Abbildung 5). Zunächst werden die technischen Schnittstellen des Produkts identifiziert und in einer Schnittstellen-Matrix dokumentiert. Statt auf physische Komponenten, greifen wir hierbei schon auf die weitaus früher vorhandenen Informationen aus der Wirkstruktur zurück. Als nächstes wird in einer Team-Interaktionsmatrix dokumentiert, welche technischen Informationen die Arbeitspersonen erwarten, bekommen oder auch bekommen haben. Durch den Abgleich der beiden Matrizen werden nun fehlende und unbekannte, oder gar ignorierte Schnittstellen identifiziert. Nun können entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Kommunikation ergriffen werden. Umgekehrt können natürlich den Systemelementen über die Team-Interaktionsmatrix auch Verantwortlichkeiten zugeordnet werden. Dadurch dass das Systemmodell die Grundlage für die Kommunikation und Koordination aller Beteiligten ist, sind im Vergleich zum einfachen Organigramm die Zuständigkeiten und Aufgabenbereich noch klarer dokumentiert und besser verfügbar.

5 Zusammenfassung

Die integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem ist die Basis für die Produktentstehung von morgen. Erfolgreiche Unternehmen bestätigen das Potential einer derartigen Herangehensweise. Eine starke Verbreitung werden diese Ansätze jedoch erst finden, wenn neben einer ganzheitlichen Betrachtung von Produkt und Produktionssystem und einer Durchgängigkeit sämtlicher Informationen insbesondere die Anwendbarkeit und Akzeptanz durch die Nutzer sichergestellt sind. Mit der Spezifikationstechnik CONSENS haben wir einen Schritt in die richtige Richtung gemacht, da hier auch denkpsychologische Aspekte adressiert werden. Dennoch steigt bei der Anwendung solcher Modellierungstechniken in den frühen Phasen des Entwurfs zunächst der Aufwand stark an, weshalb derartige Ansätze mit einem geeigneten Software-Werkzeug unterstützt werden müssen. Hierfür haben wir den Mechatronic Modeller entwickelt. Momentan werden aufgrund des Aufwands oftmals nur Teilsysteme modelliert. Die Möglichkeit frühzeitiger Analysen oder die Unterstützung des Projektmanagements rechtfertigt

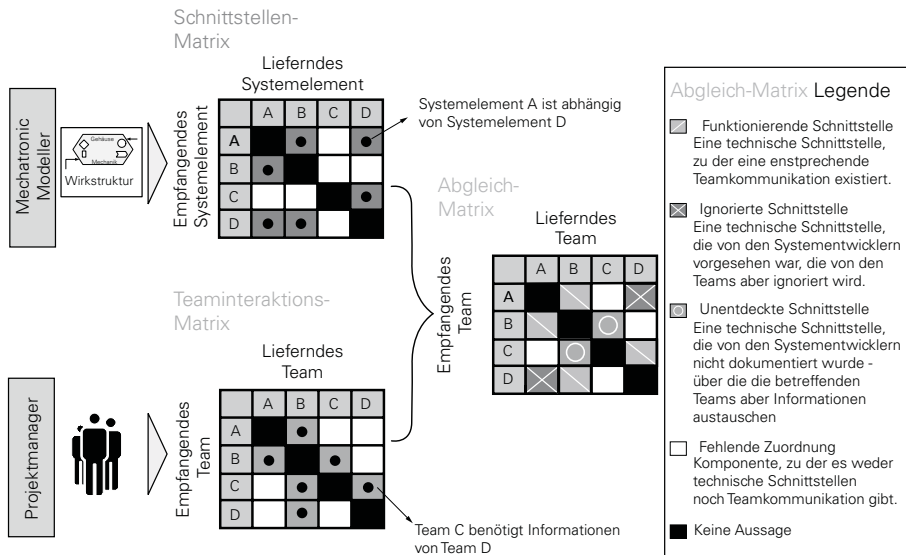


Abbildung 5: Projektmanagement mit CONSENS nach (Sosa et al. 2007)
Anhand eines Beispiels von Sosa/Eppinger 2007

jedoch den Einsatz dieser Modelle: Sie reduzieren das Entwicklungsrisiko und über die gesamte Produktentstehung gesehen auch den Entwicklungsaufwand. Im Beitrag haben wir zwei Beispiele für frühzeitige Methoden vorgestellt: Zunächst einen Ansatz zur frühzeitigen Produktstrukturierung auf Basis von CONSENS, dann einen Projektmanagement-Ansatz, den wir in den Mechatronic Modeller integriert haben. Damit sind erste Schritte zu einer umfassenden Unterstützung der Produktentstehung im Sinne des MBSE getan.

Literaturverzeichnis

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.) 2009: Intelligente Objekte – klein, vernetzt, sensitiv. Eine neue Technologie verändert die Gesellschaft und fordert zur Gestaltung heraus. acatech bezieht Position – Nr. 5. Berlin: Springer-Verlag.
- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.) 2011: Cyber-Physical Systems – Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. acatech Position. Berlin: Springer-Verlag.

- Adelt, P., Donoth, J., Gausemeier, J., Geisler, J., Henkler, S., Kahl, S., Klöpper, B., Krupp, A., Münch, E., Oberthür, S., Paiz, C., Pormann, M., Radkowski, R., Romaus, C., Schmidt, A., Schulz, B., Vöcking, H., Witkowski, U., Witting, K. & Znamenshchykov, O. 2009: Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen, Anwendungen, Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe Band 234. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.
- Badke-Schaub, P. & Frankenberger, E. 2004: Management kritischer Situationen – Produktentwicklung erfolgreich gestalten. Berlin: Springer Verlag.
- Bleck, A., Goedecke, M., Huss, S. & Waldschmidt, K. 1996: Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag.
- Brandis, R., Gausemeier, J., Nordsiek, D. & Reyes-Perez, M. 2009: A Holistic Approach for the Conceptual Design of Production Systems regarding the Interaction between Product and Production System. In: Zäh, M.-F. (Hrsg): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München: Herbert Utz Verlag.
- Broy, M. & Geisberger, E. (Hrsg.) 2012: AgendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Acatech Studie. Berlin: Springer-Verlag 2012.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg) 1987: DIN 69902. Projektwirtschaft, Einsatzmittel, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag.
- Friedenthal, S., Moore, A. & Steiner, R. 2011: A Practical Guide to SysML. The Systems Modeling Language. Amsterdam: Elsevier Verlag, 2. Auflage.
- Gausemeier, J., Frank, U., Donoth, J. & Kahl, S. 2009: Specification Technique for the Description of Self-Optimizing Mechatronic Systems. In: Research in Engineering design 20 (4). London: Springer-Verlag.
- Gausemeier, J., Schäfer, W., Greenyer, J., Kahl, S., Pook, S. & Rieke, J. 2009: Management of cross-domain model consistency during the development of advanced mechatronic systems. International Conference on Engineering Design, ICED'09. Stanford.
- International Council on Systems Engineering (INCOSE) 2007: Systems Engineering Vision 2020. INCOSE-TP-2004-004-02. Version/Revision 2.03.
- Moody, D.L. 2009: The „Physics“ of Notations: Toward a Scientific Basis für Constructing Visual Notations in Software Engineering. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 35, No.6, Nov/Dec 2009
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. 2007: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Berlin: Springer-Verlag. 7. Auflage.
- Ropohl, G., 1975: Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung. München/Wien: Carl Hanser Verlag.

- Roth, K.-H. 2000: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1.
 Berlin: Springer-Verlag, 3. Auflage.
- Sosa, M.E., Eppinger, S.D., Rowles, C.M. (2007): Wie Sie Ihre Ingenieure zum Reden bringen. In: Harvard Businessmanager, Dezember 2007
- Stahl, T., Völter, M., Effttinge, S. & Hasse, A. 2007: Modellgetriebene Softwareentwicklung: Techniken, Engineering, Management.
 Heidelberg: Dpunkt Verlag, 2. Auflage.
- Steffen, D. 2007: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe Band 207.
 Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Weilkiens, T. 2008: Systems Engineering mit SysML/UML.
 Heidelberg: Dpunkt Verlag, 2. Auflage.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier
 Dipl.-Wirt.-Ing. M.Eng. Christian Tschirner
 Dipl.-Wirt.-Ing Tobias Gaukster
 Heinz Nixdorf Institut
 Universität Paderborn
 Fürstenallee 11
 33102 Paderborn
www.hni.upb.de/pe

Dr.-Ing. Roman Dumitrescu
 Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
 Zukunftsmeile 1
 33102 Paderborn
<http://www.ipt.fraunhofer.de/mechatronik>

