

# Design for X

Beiträge zum 22. DfX-Symposium  
Oktober 2011

Dieter Krause  
Kristin Paetzold  
Sandro Wartzack  
(Hrsg.)



The Design Society is a charitable body,  
registered in Scotland, number SC 031694

---

## 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.

## Impressum

TuTech Verlag  
TuTech Innovation GmbH  
Harburger Schloßstr. 6-12  
21079 Hamburg  
Tel.: +49 40 76629-0  
Fax: +49 40 76629-6559  
E-Mail: [verlag@tutech.de](mailto:verlag@tutech.de)  
[www.tutechverlag.de](http://www.tutechverlag.de)

Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder -verwertungssysteme sind -auch auszugsweise- ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von TuTech Innovation GmbH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus *Design for X | Beiträge zum 22. DfX-Symposium* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.  
© TuTech Innovation GmbH, Hamburg, 2011

ISBN 978-3-941492-37-0

---

## Vorwort

Das Symposium DfX soll in erster Linie jungen Wissenschaftlern die Möglichkeit geben, ihre Ideen vorzustellen und zu diskutieren. Wir freuen uns, dass nach erfolgreicher Übergabe des Staffelstabes im vergangenen Jahr von Prof. Harald Meerkamm an uns, Dieter Krause, Sandro Wartzack und mich, das Symposium nicht an Beliebtheit und Bedeutung verloren hat. Mit Bedauern mussten wir auch in diesem Jahr Beiträge aufgrund der beschränkten Kapazität ablehnen.

In diesem Jahr liegt ein Schwerpunkt auf der **Prozessunterstützung in der Entwicklung**. Damit greifen wir ein Thema auf, welches für die Industrie einen sehr hohen Stellenwert für die Erhaltung ihrer Wettbewerbsfähigkeit hat. Als ähnlich bedeutsam erweisen sich Herausforderungen im Kontext der **interdisziplinären Produktentwicklung**. Methodische Unterstützung hilft hier, unterschiedliche Sichtweisen von Fachdisziplinen auf die Produktgestaltung zu integrieren. Ein weiterer Themenblock beschäftigt sich mit Fragestellungen zum **Robust Design**. Die Rechnerunterstützung trägt maßgeblich dazu bei, die Produktfunktionalität prozessbegleitend abzusichern.

Für ihre Unterstützung danke ich meinen Kollegen und Mitveranstaltern, Dieter Krause und Sandro Wartzack. An der Organisation und Vorbereitung des Symposiums ist mein Mitarbeiter, Jochen Reitmeier maßgeblich beteiligt, auch ihm herzlichen Dank für die tatkräftige Unterstützung. In Erwartung interessanter Vorträge und lebhafter Diskussionen danke ich natürlich auch allen Teilnehmern für ihr Engagement.

München, August 2011

Kristin Paetzold



---

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Session: Keynotes

Anforderungen an „Robust Engineering“ in globalen Projekten <i>Markus Eglinger</i> <i>Continental AG</i> .....	1
Industrielle Anwendung der Autogenetischen Konstruktionstheorie <i>Sándor Vajna</i> <i>Universität Magdeburg</i> .....	5

## 2 Session: Knowledge Based Engineering

Werkzeugunterstützung bei der Ermittlung von Anforderungen für regionsspezifische Fahrzeugkonzepte <i>Frank Nehuis, Carsten Stechert und Thomas Vietor</i> <i>Technische Universität Braunschweig</i> .....	9
Konzept eines Wissensintegrationssystems zur benutzerfreundlichen, benutzer- spezifischen und selbstständigen Integration von Konstruktionswissen <i>Martin Kratzer, Michael Rauscher, Hansgeorg Binz und Peter Göhner</i> <i>Universität Stuttgart</i> .....	21
Formalisierung und Verwaltung von Entwicklungswissen im Kontext des Integrierten Produktmodells <i>Thilo Breitsprecher, Christoph Westphal, Nico Meintker und Sandro Wartzack</i> <i>Universität Erlangen-Nürnberg</i> .....	33
Vereinheitlichung von Werkstoffinformationen auf Basis VDA 231-200 <i>Andreas Janus, Johannes Staeves, Dieter Tartler und Sandro Wartzack</i> <i>BMW Group, Universität Erlangen-Nürnberg</i> .....	45

---

### 3 Session: Prozessunterstützung

Ansatz zur Entwicklung seniorengerechter Mobilitätssysteme unter Berücksichtigung technischer und sozialer Anforderungen  
*Johanna Schmidt, Ines Karl, Kristin Paetzold und Berthold Färber*  
*Universität der Bundeswehr München* ..... 57

Design for Value Chain - Handlungsfelder zur ganzheitlichen Komplexitätsbeherrschung  
*Max Brosch, Gregor Beckmann, Marc Griesbach, Jörg Dalhöfer und Dieter Krause*  
*Technische Universität Hamburg-Harburg, Dräger Safety AG & Co. KGaA.* 67

Evaluation of linear drivers with different fuzzy methods  
*Attila Piros und Tibor Bercsey*  
*Budapest University of Technology and Economics* ..... 79

### 4 Session: Interdisziplinarität in der Produktentwicklung

Application of Design Models in Mechatronic Product Development and Building Design – Reflections of Researchers and Practitioners  
*Boris Eisenbart und Lucienne Blessing*  
*Universität Luxembourg* ..... 87

Modulare Produktstrukturen methodisch umsetzen - Entwicklung von Standardumfängen und Integration von Erfahrungswissen  
*Sandra Eilmus, Gregor Beckmann und Dieter Krause*  
*Technische Universität Hamburg-Harburg* ..... 99

Erweiterung der MID-Produktentwicklung um ein optisches Partialmodell  
*Christian Fischer und Jörg Franke*  
*Universität Erlangen-Nürnberg* ..... 119

Modellierung und Simulation im mechatronischen Produktentwicklungsprozess  
*Fabio Dohr und Michael Vielhaber*  
*Universität des Saarlandes* ..... 129

---

## 5 Session: Robust Design

Anforderungen an technische Oberflächen und die Herausforderungen für den Produktentwickler

*Thomas Sander und Sandro Wartzack*  
*Universität Erlangen-Nürnberg* ..... 141

Integrating Failure Analysis into the Conceptual Design of Cognitive Products: Towards a New Paradigm

*Thierry Sop Njindam, Torsten Metzler, Kristin Paetzold und Kristina Shea*  
*Universität der Bundeswehr München, Technische Universität München* .. 153

Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung nicht-idealer bewegter technischer Systeme

*Michael Walter und Sandro Wartzack*  
*Universität Erlangen-Nürnberg* ..... 171

## 6 Session: Design for Cost und Leichtbau

Modellierung und Prognose von Entwicklungs- und Recyclingkosten in frühen Entwicklungsphasen

*David Hellenbrand, Maximilian Kissel, Jonathan Rohloff und Udo Lindemann*  
*Technische Universität München* ..... 183

Projektbegleitende Kalkulation komplexer Produkte der Auftragsfertigung

*Michael Konarsky, Erhard Leidich und Uwe Götze*  
*Technische Universität Chemnitz* ..... 195

Computergestützte Multiebenen-Simulationen zur optimierten Auslegung von CFK-Bauteilen

*Jochen Zapf und Frank Rieg*  
*Universität Bayreuth* ..... 207

Berücksichtigung anisotroper Materialeigenschaften crashbelasteter Leichtbaustrukturen im Kontext früher Entwicklungsphasen

*Georg Gruber, Nick Maltz und Sandro Wartzack*  
*Universität Erlangen-Nürnberg* ..... 217

---

## 7 Session: Prozessunterstützung

Design for Ramp-up komplexer Produkte am Beispiel der Flugzeugindustrie <i>Steffen Elstner und Dieter Krause</i> <i>Technische Universität Hamburg-Harburg</i> .....	229
Bewertung von Methoden zur Herstellbarkeitsabsicherung von Serienfahrzeugen <i>Miriam Hesse, Christian Weber und Holger Diestelkamp</i> <i>BMW AG, Technische Universität Ilmenau</i> .....	241
Is what you see really what you get? – Case study of virtual prototyping in designing the production process <i>Ilse Becker und Ville Toivonen</i> <i>Valmet Automotive, Tampere University of Technology</i> .....	253
Notwendigkeit für eine Methodenplattform zur Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse <i>Daniel Krüger, Sandra Eilmus, Johanna Schmidt, Sandro Wartzack,</i> <i>Dieter Krause und Kristin Paetzold</i> <i>Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Universität</i> <i>Hamburg-Harburg, Universität der Bundeswehr München</i> .....	265

## Anforderungen an „Robust Engineering“ in globalen Projekten

Markus Eglinger

*Competence Center Transmission Actuators*

*Business Unit Transmission, Division Powertrain, Continental AG*

### 1 Einführung

Die Business Unit Transmission entwickelt komplexe mechatronische Steuergeräte für Automatikgetriebe im PKW-Bereich.



Bild 1: Mechatronisches Getriebesteuergerät

---

In Abhängigkeit der Getriebebauart sind in den Steuergeräten die verschiedensten Funktionen integriert.

Durch die globalen Strukturen der heutigen Automobilindustrie werden die Produkte in verschiedenen Kontinenten entwickelt, gefertigt und eingesetzt. Häufig wird dabei ein Produkt in mehreren Werken auf verschiedenen Kontinenten gefertigt und an unterschiedliche Kunden (=Fahrzeughersteller) geliefert.

Die komplexe Struktur der Produkte, eine Fertigung in mehreren Werken sowie die unterschiedlichen Mentalitäten auf verschiedenen Kontinenten stellen neue Anforderungen an den Begriff „Robust“ in Zusammenhang mit DfX.

## 2 Herausforderungen

Während der Entwicklung eines neuen Getriebesteuergerätes sind mehrere Anforderungen zu berücksichtigen. Das fertige Produkt soll den bestmöglichen Kompromiss der teilweise stark widersprüchlichen Anforderungen darstellen. Dadurch stellen sich auch neue Anforderungen an eine „robuste“ Auslegung.

### 2.1 Technologie

Getrieben durch die steigenden Anforderungen bzgl. Verbrauchssenkung und den zunehmenden Einschränkungen an den Bauraum nähert sich die heute eingesetzte Produkte immer mehr den technologischen Grenzen an.

### 2.2 Kosten

Durch die steigende Zahl an Varianten von Automatikgetrieben (Automatisierte Schaltgetriebe, „herkömmliche“ Automatikgetriebe mit Drehmomentwandler, stufenlosen CVT-Getrieben, Doppelkupplungsgetrieben, ...) und den zunehmenden Einsatz von Automatikgetrieben in allen Fahrzeugklassen steigt die Vielzahl an Varianten an. Parallel dazu wird vom Kunden eine stetige Reduzierung der Kosten sowie der Entwicklungszeiten erwartet.

### 2.3 Globalisierung

Die Zulieferindustrie muss sich der, immer noch, zunehmenden Globalisierung der Automobilhersteller anpassen. Dies betrifft zum einen die von den Kunden geforderte lokale Produktion in allen Kernmärkten (Europa, NAFTA,

---

Asien). Zum anderen auch eine lokale Entwicklung für neue, besonders in China entstehenden, Kunden.

### **3 Lösungsansätze**

Die angesprochenen Herausforderungen erfordern eine ständige und flexible Anpassung von Technologie und Organisation. Im Folgenden sollen einige Ansätze kurz dargestellt werden.

#### **3.1 Plattformstrategie**

Basis für eine Plattformstrategie ist ein Baukasten aus Technologien, die sich flexibel zu neuen Produkten kombinieren lassen.

#### **3.2 Organisation**

Zur Erfüllung der globalen Anforderungen müssen sowohl Entwicklung als auch Fertigung eine globale Organisation aufweisen.

#### **3.3 Interkulturelles Verständnis**

Für eine erfolgreiche globale Zusammenarbeit muss ein Verständnis für die Mentalitätsunterschiede zwischen verschiedenen Kontinenten und Ländern vorhanden sein.

### **4 Zusammenfassung**

Der Beitrag sollte, anhand eines Beispiels aus der Automobilindustrie, aufzeigen, dass die immer noch zunehmende Globalisierung neue Anforderungen an die Produktentwicklung stellt. Neben den, schon länger berücksichtigten, Anforderungen an Funktion, Herstellbarkeit und Kosten sind auch organisatorische und kulturelle Faktoren von Bedeutung.



## Industrielle Anwendung der Autogenetischen Konstruktionstheorie

Sándor Vajna  
*Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik  
Universität Magdeburg*

Die Produktentwicklung ist die wichtigste Aktivität innerhalb des Produktentstehungsprozesses. Mit der Autogenetischen Konstruktionstheorie (AKT) wird die Entstehung eines individuellen Produktes als Analogie zu der Evolution von Lebewesen betrachtet. Dazu werden Begriffe und Verfahren aus der natürlichen Evolution in die Produktentwicklung und ihre jeweiligen (sowie parallel ablaufenden und sich gegenseitig beeinflussenden) Phasen übertragen. Die AKT ist dabei keine "Spielart" der Bionik, denn während die Bionik die Ergebnisse der Evolution überträgt (beispielsweise das Auslegen von technischen Tragwerken analog zu der Gestaltung von Ästen eines Baumes), überträgt die AKT die Vorgehensweisen der Evolution, so dass die AKT auf beliebige Produkte aus beliebigen Domänen anwendbar ist.

In der AKT bilden die Produktentwicklung und die darin enthaltenen Vorgehensweisen, Verfahren und Werkzeuge einen kontinuierlichen evolutionären Prozess von Techniken und Technologien, wobei die Entstehung als ein selbstähnliches und iteratives Vorgehen mit entsprechenden treibenden Kräften aus der Evolution beschrieben wird. Die AKT führt so zu einem besseren Verständnis der Produktentwicklungsprozesse, ermöglicht eine erweiterte Lösungssuche und die sehr frühzeitige Unterstützung kreativer Denkprozesse, so dass leistungsfähigere Produkte entstehen.

Die AKT wird seit 1990 an der Universität Magdeburg und an der Technischen Universität Budapest gemeinsam erforscht und entwickelt. Derzeit wird

---

sie in Zusammenarbeit mit der Universität Linz (Österreich) auf mechatronische Produkte erweitert. Die Forschungsarbeiten werden von der DFG gefördert.

Ein Teilgebiet der AKT ist die multikriterielle Optimierung von Produkten. Dafür wurde mit NOA ein flexibles und für viele Anwendungsfälle verwendbares modulares Optimierungssystem entwickelt. NOA verwendet dazu eine automatisierte Prozesskette (beginnend beim CAD-System zur Erzeugung verschiedener Ausprägungen des Optimierungsobjektes über die Automation des Preprozessors zur Definition von Lastfällen und Randbedingungen bis zur Lösung der Lastfälle sowie die Extraktion der Zielkriterien und die Berechnung des jeweiligen Fitnesswertes).

Zahlreiche Praxisbeispiele zeigen den erfolgreichen Einsatz von NOA in der Industrie bei sehr verschiedenen Anwendungsfällen. Resultat sind Produkte, die in ihren Eigenschaften wesentlich besser und leistungsfähiger sind als "herkömmlich" entwickelte und optimierte Produkte, beispielsweise:

- Waggonaufsatz für einen Fahrzeughersteller. Dieser weist gegenüber dem Original ein um 10% geringeres Gewicht, um 37% reduzierte Herstellkosten sowie eine um 90% reduzierte Anzahl von Bauteilen auf.
- Bumper-Systeme für einen Zulieferanten der Automobilindustrie. Dabei wurde die Masse des Optimierungsobjektes bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit wesentlich reduziert.
- Konverteranlage für einen Automobilhersteller. Durch eine neuartige Anströmung und Variation der Trichterform wurde die Gleichverteilung der Strömung (Uniformity Index) auf der Katalysatoroberfläche um 5% erhöht und so der Wirkungsgrad der Konverteranlage verbessert.

## Grundlagen der Autogenetischen Konstruktionstheorie

"Evolution" bedeutet kontinuierliche Entwicklung, dauernde Anpassung und Optimierung zu einem Ziel oder zu mehreren Zielen, die sich während der Evolution selbst auch beliebig verändern können. "Autogenese" beschreibt die daraus resultierende selbstgetriebene Steigerung der Komplexität einer entstehenden Lösung, wobei diese Steigerung entlang der Zeitachse oder durch zunehmende Konkretisierung der Lösung aufgrund geeigneter Entwicklungsaktivitäten oder evolutionärer Operatoren erfolgen kann.

---

Sowohl die Entwicklung eines neuen Produktes (Neukonstruktion) als auch die Änderung eines vorhandenen Produktes (Anpassungskonstruktion) können aus den Sichten von Evolution und Autogenese als fortlaufende multi-kriterielle Optimierung einer Ausgangslösung beschrieben werden, die unter Anfangs-bedingungen, Randbedingungen und Zwangsbedingungen (die sich ebenfalls alle im Verlauf der Entwicklung beliebig ändern können) verläuft.

### Die AKT

- beschreibt und entwickelt ein Produkt parallel anhand der gleichwertigen Sichten Funktionserfüllung, Form und Gestalt, Zuverlässigkeit und Sicherheit, Ergonomie, Preis-Leistungs-Verhältnis, Herstellbarkeit, Wartbarkeit, Nachhaltigkeit (nach dem Magdeburger Ansatz der Integrierten Produktentwicklung). Diese gleichwertigen Sichten werden in einer multikriteriellen und dynamischen Zielfunktion integriert.
- verwendet anstelle des von Anforderungen, Anfangs-, Rand- und Zwangsbedingungen begrenzten "klassischen" Lösungsraums einen nur durch naturwissenschaftliche Gesetze bestimmten Raum, in dem lediglich die Eigenschaften, die die entstehenden Lösungen nicht annehmen dürfen, als Tabuzonen definiert werden ("Verbotsraum").
- beschreibt und modelliert alle Vorgehensweisen, Teilprozesse und Aktivitäten im Entwicklungsprozess mit den evolutionären Operatoren Rekombination, Mutation, vertikaler Gentransfer (Weitergabe von Genen innerhalb der eigenen Art), horizontaler Gentransfer (Austausch von Genen über Artenschränken hinweg) und Selektion.
- erzeugt immer eine Menge gleichwertiger, aber nicht gleichartiger Lösungen, wobei jede dieser Lösungen die Zielfunktion bestmöglich erfüllt.
- unterstützt die Übertragung von Wissen bei der Lösungsfindung und die Suche nach möglichen Analogien aus anderen Fachgebieten.



## **Werkzeugunterstützung bei der Ermittlung von Anforderungen für regionsspezifische Fahrzeugkonzepte**

Frank Nehuis, Carsten Stechert und Thomas Vietor  
*Institut für Konstruktionstechnik*  
*Technische Universität Braunschweig*

In response to the ever growing needs and wishes of the customer, cars are continually being developed and refined. The intensifying globalization of the automotive industry as well as an increase in region-specific requirements for a vehicle makes it difficult to define a vehicle concept suitable for all markets. In this context, a major challenge exists to satisfy the individual and region-specific mobility needs of the population with a reasonable number of vehicle variants and to simultaneously take into account region-specific customer requirements. To consider the region-specific differences during the vehicle design, a tool has been developed that shows the influence of the vehicle environment on a vehicle and provides information on these region-specific differences in the early stages of the development process.

# 1 Einleitung

Langfristig werden als Folge einer weltweit urbanisierten Gesellschaft etwa 70% der Bevölkerung in Städten leben. Das gleichzeitig zunehmende Bedürfnis nach individueller Mobilität führt deshalb in wachsenden Metropolen zu regionsspezifischen, ökologischen und verkehrstechnischen Problemen und ist ein limitierender Faktor für die Stadtentwicklung.

Bei Automobilherstellern wird das Bedürfnis der Kunden nach individueller Mobilität derzeit durch eine Vielzahl unterschiedlicher Derivate realisiert. Dabei bilden Plattformen die Basis mehrerer Fahrzeugvarianten, die dann durch verschiedene Derivate kundenindividuell erzeugt werden. Durch diese Strategie werden die Teileanzahl und die damit verbundenen Kosten möglichst gering gehalten, [1]. Neben den kundenindividuellen Anforderungen an ein Fahrzeug müssen zunehmend auch regionsspezifische Einflussfaktoren bei der Entwicklung eines Fahrzeugkonzeptes berücksichtigt und in den Fahrzeugderivaten abgebildet werden, Bild 1.

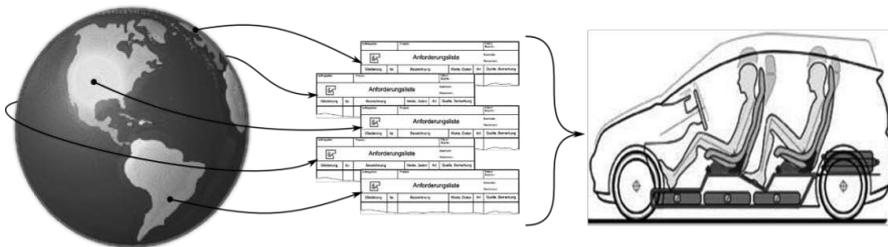


Bild 1: Ermittlung technischer Anforderungen an ein Fahrzeugkonzept auf Basis regional unterschiedlicher Einflussfaktoren

In Großstädten ist es mit heutigen Mobilitätskonzepten beispielsweise nur bedingt möglich, mithilfe der vorhandenen Infrastruktur die zu erwartende Verkehrslast zu tragen. Dies bezieht sich sowohl auf die parallele Nutzung der Verkehrswege durch Fußgänger, Tiere, Zweiräder, Autorikschas, PKW, LKW usw. als auch auf die Infrastruktur (Straßen, Tankstellen, Stromnetz). Außerdem spielen Emissionsschutz und Recycling eine immer größere Rolle, um vorhandene Ressourcen effizient zu nutzen und die ohnehin erkennbaren Umweltbelastungen mit den resultierenden globalen Problemen nachhaltig zu verringern.

Darüber hinaus wird z.B. in indischen Metropolen, wie z.B. Kalkutta, Bombay oder Delhi, in den nächsten 20 Jahren ein Bevölkerungsanstieg um jeweils 6 bis 9 Mio. Menschen von derzeit bereits mehr als 20 Mio. Einwohnern erwartet. Diese Entwicklung ist auch auf andere Regionen übertragbar und zeigt, dass eine Berechtigung für regionsspezifisch angepasste Konzepte vorhanden ist und über die Berücksichtigung regionaler Unterschiede in Fahrzeugderivaten zu diskutieren ist. Dieses gilt insbesondere für Metropolregionen bereits heute und wird mittelfristig zunehmen, wie am Beispiel Indien verdeutlicht wurde.

Zu den äußeren Einflüssen auf ein Fahrzeug zählen z.B. das Klima in einer Region, die Infrastruktur oder auch die kulturellen Gegebenheiten vor Ort. Einige Einflussfaktoren werden in der Praxis jedoch selten berücksichtigt, da nur bedingt Informationen über deren Einfluss auf die technischen Anforderungen eines Fahrzeugkonzeptes vorliegen. An dieser Stelle kann ein Werkzeug helfen, die Umgebung eines Fahrzeugs seinen technischen Anforderungen gegenüberzustellen, Bild 2.

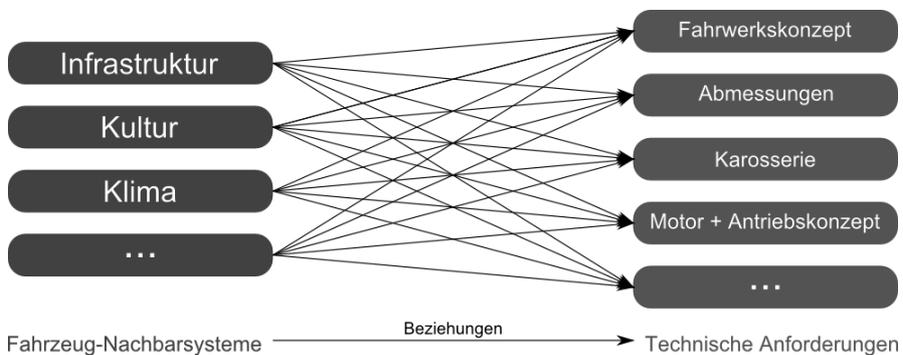


Bild 2: Exemplarische Gegenüberstellung der Fahrzeugumgebung und der technischen Anforderungen

Ziel ist es daher, die Einflussfaktoren aus dem Umfeld des Fahrzeugs zu bestimmen und deren Wirkung auf ein Fahrzeugkonzept zu bestimmen. Darauf aufbauend können die regionsspezifischen Unterschiede der Fahrzeugumgebung analysiert werden. Durch die Gegenüberstellung werden die Beziehungen der Einflussfaktoren auf die Anforderungen verdeutlicht. Sind die Wirkungen zwischen den Nachbarsystemen und den technischer Anforderungen für eine Region bekannt und liegen die dazugehörigen Informationen während der Konzeptphase verdichtet vor, besitzt der Fahrzeugentwickler ein Werkzeug zur gezielten Festlegung eines regionsspezifischen Fahrzeugkonzeptes.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Einordnung der Methode in den Konstruktionsprozess

Bei der Entwicklung eines komplexen Produktes ist die Festlegung der Anforderungen an das System bzw. an einzelne Objekte des Systems ein zentraler Schritt, um die Bedürfnisse des Kunden zu erfüllen. Dieses wird durch die Betrachtung bewährter konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen deutlich, in denen das „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ durch die Formulierung technischer Anforderungen stets einen eigenständigen Vorgehensschritt darstellt, [2]. Exemplarisch wird dieser zentrale Schritt in (Schritt 1 in Bild 3) anhand des Vorgehensmodells nach Richtlinie VDI 2221 verdeutlicht.

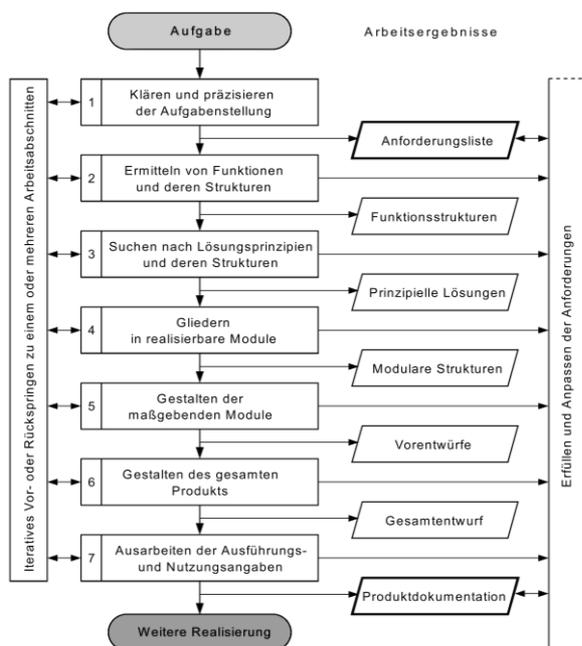


Bild 3: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte nach Richtlinie VDI 2221 [2]

In dem Vorgehensmodell der Richtlinie VDI 2221 findet die Klärung der Aufgabenstellung zu Beginn des methodischen Entwicklungsprozesses statt. In diesem Schritt werden die vom Produkt geforderten Eigenschaften unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen festgelegt. Ergebnis die-

ses Schrittes ist eine Anforderungsliste, in der die Anforderungen gesammelt werden. Im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses wird das zu erstellende Produkt zunehmend konkretisiert. Dadurch werden weitere Informationen gewonnen, die ebenfalls in die Anforderungsliste aufgenommen werden, [3]. Während des Entwicklungsprozesses kann es jedoch auch vorkommen, dass eine bereits festgelegte Anforderung geändert werden muss. Dieses ist z.B. der Fall, wenn die Erfüllung einer Anforderung erst mit steigendem Produktkenntnisstand überprüft wird oder zu Beginn des Entwicklungsprozesses gewisse Randbedingungen und Restriktionen nicht bekannt sind, [4]. Ist die Änderung einer Anforderung in späteren Phasen des Entwicklungsprozesses notwendig, geht dieses in der Regel mit hohen Kosten und zunehmendem Zeitdruck einher. Insbesondere Anforderungen, die bereits bei der Auslegung des Produktes festgelegt wurden, können nur noch mit erhöhtem Aufwand verändert werden, Bild 4.

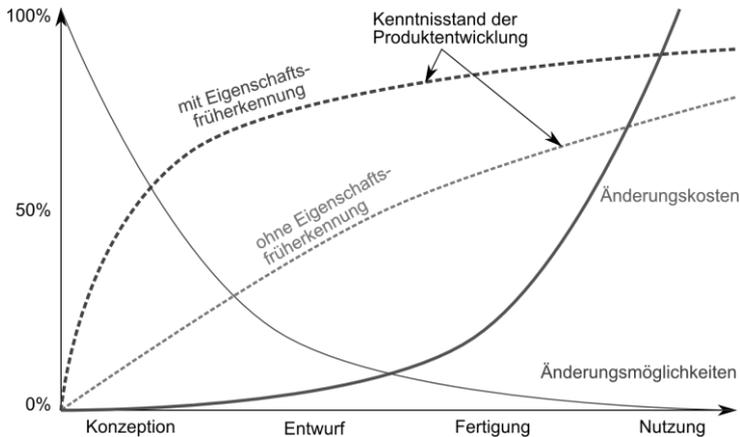


Bild 4: Senken von Änderungsaufwand und die -kosten durch frühes Erkennen der Systemeigenschaften, nach [5]

Um die Entwicklungskosten für ein Produkt zu verringern, müssen insbesondere Änderungen in späten Produktlebenslaufphasen verhindert werden. Dazu werden Methoden eingesetzt, die den Kenntnisstand über ein Produkt in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses erhöhen, [5]. Im Bezug auf das „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ bedeutet dieses, dass die Anforderungen an das Produkt mit Bedacht festgelegt werden und dazu bereits erste Eigenschaften über das Produkt und seine Umgebung bekannt sein sollten. Das an dieser Stelle zu entwickelnde Werkzeug erhöht den Kenntnisstand über die Umgebung des Fahrzeugs und trägt somit zur Unterstützung bei der Festlegung von Anforderungen bei.

## 2.2 Anforderungen an ein Fahrzeugkonzept

Unter dem Begriff Fahrzeugkonzept wird der konstruktive Entwurf verstanden, welcher die grundsätzliche Entwicklungsidee beschreibt und dessen Realisierbarkeit, auch hinsichtlich der topologischen Anordnung – dem sogenannten Package – absichert, [6]. Dabei spiegelt es die wesentlichen Bestandteile, Charakteristiken und Eigenschaften eines Fahrzeugs wieder und zeigt erste Details auf, um eine Entscheidung für oder gegen eine zu bevorzugende Konzeptlösung zu treffen, [7]. Um die Anforderungen an ein Fahrzeugkonzept zu definieren, wird in der Regel von einem bereits bekannten Vorgängermodell ausgegangen (Anpassungskonstruktion). In diesem Fall bleiben der grundsätzliche strukturelle Aufbau des Fahrzeugkonzepts und den damit verbundenen Anforderungen an ein Fahrzeug, wie z.B. die Festlegung der Fahrzeuggrundform oder die Wahl des Antriebskonzeptes, unverändert. In Bild 5 werden diese grundsätzlich veränderbaren Gestaltungsfelder exemplarisch aufgezeigt.

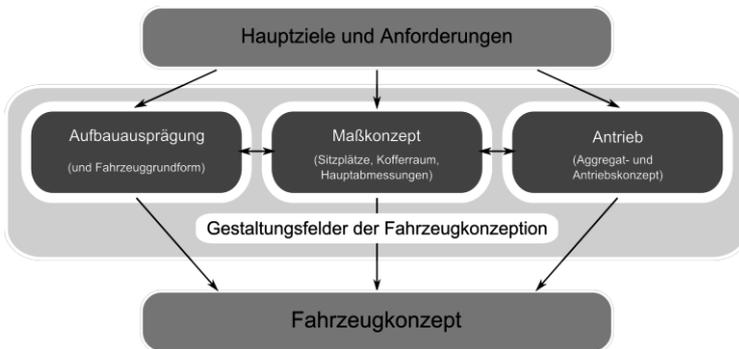


Bild 5: Gestaltungsfelder der Fahrzeugkonzeption nach [6]

Um die Wirkung der Fahrzeugumgebung auf das Fahrzeug darzustellen, werden zunächst unterschiedliche Gestaltungsfelder eines Fahrzeugkonzeptes recherchiert und diesen die technischen Anforderungen zugeordnet. Für diese Strukturierung wurden folgende übergeordnete Gestaltungsfelder festgelegt:

- Hauptabmessungen
- Aufbauausprägung
- Grundformen
- Aggregat-/Antriebsstrangkongzepte
- Gewichte
- Sicherheit und Ergonomie
- Technik
- Umwelt

Um dabei die Komplexität der Struktur für die Entwicklung der Methode zunächst überschaubar zu halten, werden die technischen Anforderungen zunächst bis zu einem geringen Detaillierungsgrad erarbeitet. In diesem Fall spricht man von einem groben Ansatz, wie es beispielsweise in frühen Phasen des Fahrzeugentwicklungsprozesses üblich ist.

Wird der Detaillierungsgrad der Struktur erhöht, steigt die Komplexität des betrachteten Fahrzeugkonzeptes an. In der Regel werden dabei jedoch lediglich die qualitativen Verknüpfungen des groben Ansatzes verfeinert. Daher ist dieser Schritt bei der Entwicklung des Werkzeugs nicht notwendig, [8].

### 2.3 Ermittlung der Einflussfaktoren auf ein Fahrzeugkonzept

Im Umfeld eines Fahrzeuges und über den Produktlebenszyklus betrachtet können eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren benannt werden. Zu diesen zählen naheliegende Einflüsse, wie z.B. die Infrastruktur oder die Gesetzgebung, aber auch Faktoren wie die Individualität des Fahrzeughalters oder die Kultur in einer Region, [1]. Unter diesen in den Beispielen benannten Oberbegriffen können wiederum eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren, die auf ein Fahrzeug wirken, ermittelt werden. In der Realität lassen sich einige Einflüsse jedoch nicht eindeutig zu einem einzigen Oberbegriff zuordnen, Bild 6. Als Beispiel sind die regional verfügbaren Werkstoffe genannt, die sowohl einem Oberbegriff „Rohstoffe“ als auch dem Begriff „Produktion“ zugeordnet werden können.

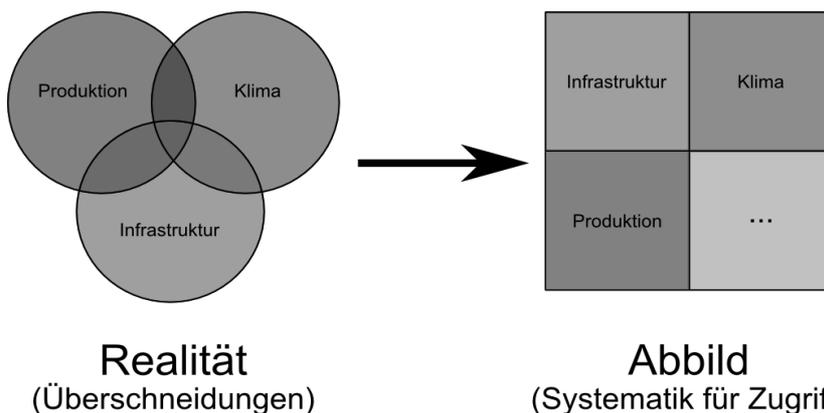


Bild 6: Exemplarische Darstellung der sich in der Realität nicht eindeutig unterscheidbaren Nachbarsysteme und deren technisch verwertbare Abbildung in einer Struktur

Für die Gegenüberstellung der Einflussgebiete und der technischen Merkmale sollen dennoch alle ermittelten Einflüsse Oberbegriffen zugeordnet und systematisch in eine Struktur eingeordnet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass Einflüsse nicht mehreren Oberbegriffen zugeordnet werden, da dieses redundante Aussagen bei einer Gegenüberstellung erzeugen würde. Um die Einflüsse in eine Struktur einzuordnen, wurden zunächst Begriffe recherchiert und im Anschluss folgende Oberbegriffe festgelegt:

- Infrastruktur
- Gesetzgebung
- Ökologie
- Rohstoffe
- Produktion
- Energieverbrauch
- Kundenindividualität
- Demographie
- Anthropologie
- Kultur
- Soziales Umfeld
- Wirtschaftlichkeit

Durch die Zuordnung der Einflussfaktoren zu den Oberbegriffen werden diese zunehmend detailliert. Dadurch wird eine Zuordnung zu den technischen Anforderungen an ein Fahrzeugkonzept ermöglicht. Das Aufstellen der Strukturen erfolgt dabei regionsunabhängig, damit diese auf verschiedene Zielregionen bezogen werden können. Die Detaillierung eines Oberbegriffes wird bei der Entwicklung des Werkzeugs soweit durchgeführt, bis eine Zuordnung zu den technischen Anforderungen möglich ist. Das Aufstellen einer Struktur wird in Bild 7 anhand des Begriffs „Ökologie“ exemplarisch gezeigt:

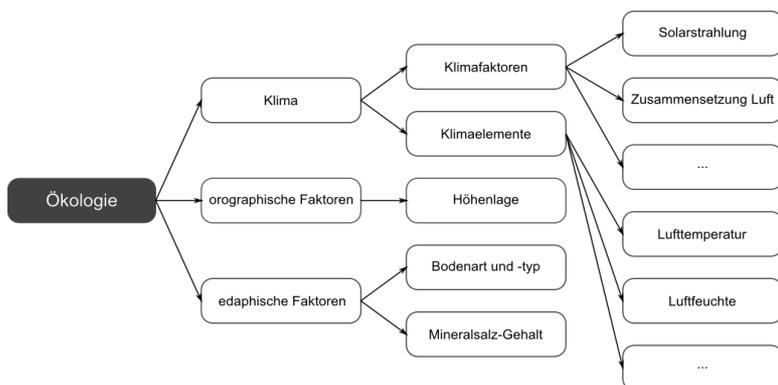


Bild 7: Exemplarisch Darstellung der Struktur des Oberbegriffes „Ökologie“

---

### 3 Aufstellen eines Beziehungssystems

Durch eine übersichtliche und transparente Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren und den technischen Anforderungen, kann das Finden von Kompromissen bei der Festlegung von Anforderungen unterstützt werden. Ein Beziehungssystem bietet dafür formale Ansätze, verschiedene Elemente zu verknüpfen und etwaige Zielkonflikte zu erkennen, [9]

Die in den vorherigen Kapiteln erläuterten Strukturen der technischen Anforderungen und der Einflussfaktoren dienen als Ausgangslage für die Ermittlung der Beziehungen der Umgebung auf ein Fahrzeugkonzept. Dazu werden diese in einem Beziehungssystem gegenübergestellt und der Einfluss jedes einzelnen Nachbarsystems auf einzelne technische Anforderungen ermittelt. Durch die allgemein gültigen Anforderungen an das Fahrzeugkonzept sowie der bewusst regionsunabhängig formulierten Einflussfaktoren unterschieden sich die ermittelten Beziehungen nicht bezüglich der zu untersuchenden Regionen.

Um das Beziehungssystem handhaben zu können, werden die Anforderungen und die Einflussfaktoren in der System Modeling Language (SysML) dokumentiert. Die SysML ist eine auf der Unified Modeling Language (UML) basierende und standardisierte Programmiersprache für die Modellierung komplexer Systeme. Um den Umgang mit der SysML in der Praxis zu vereinfachen, wird zusätzlich der SysML-Editor „Artisan Studio“ eingesetzt. Dieser ermöglicht das einfache grafische Aufstellen und Erweitern umfangreicher Systeme innerhalb der SysML, [10][4].

Jedes Element der SysML kann darüber mit zusätzlichen Daten verknüpft werden. Dadurch können weitere Informationen zu den Einflussfaktoren, zu den technischen Anforderungen und auch zu den Beziehungen zwischen den Elementen dokumentiert werden. Auf diese Weise können beispielsweise die zu den technischen Anforderungen und den Einflussfaktoren erarbeiteten Strukturen erweitert oder auch detailliert werden. Auch das kontinuierliche Erweitern des Beziehungssystems mit empirischen Informationen ist bei der Modellierung in SysML möglich, [11].

Für die Modellierung des Beziehungssystems im Editor Artisan Studio werden verschiedene Objekte, wie z.B. Blöcke und Kanten, eingesetzt. Einzelne Anforderungs- und Einflussfaktoren-Blöcke können in beliebig vielen grafischen Diagrammen dargestellt werden. Mithilfe der Kanten lassen sich die Blöcke durch „Drag and Drop“-Funktionen miteinander verbinden. Dadurch werden z.B. die Beziehungen der Einflussfaktoren auf die technischen Anforderungen im Editor dokumentiert und somit ein komplexes Beziehungssystem

erzeugt. Die Übersichtlichkeit des Beziehungssystems wird dennoch durch die Modellierung in mehreren grafischen Diagrammen gewährleistet. Um darüber hinaus z.B. die Stärke eines Einflussfaktors auf eine technische Anforderung zu dokumentieren, werden die einzelnen Beziehungen außerdem mit Gewichtungen versehen. So kann z.B. der Einfluss des Nachbarsystems „Straße“ auf den Fahrzeugdämpfer im Beziehungssystem stärker gewichtet werden als der Einfluss ausgehend vom „Komfortempfinden des Fahrers“.

Um regionsspezifische Unterschiede im Beziehungssystem zu hinterlegen, werden diese als zusätzliche Informationen den Einflussfaktoren zugeordnet. So kann z.B. dem Einflussfaktor „Straße“ für eine indische Metropolregion die Ausprägung „uneben“ zuordnen werden, während im Vergleich einer europäischen Metropolregion eher die Eigenschaft „eben“ zuzuordnen wäre. Ist eine Region noch nicht in der Software hinterlegt, müssen die Informationen zunächst ermittelt und im SysML-Editor hinzugefügt werden. Die empirisch ermittelten Daten sind dabei im Gegensatz zu den technischen Anforderungen, den Einflussfaktoren und den Beziehungen zeitabhängig und spiegeln in der Regel den aktuellen Stand in der Region wider, [12]. Im Editor können diese jedoch kontinuierlich weitergepflegt werden.

#### 4 Auswertung des Beziehungssystems

Durch die Modellierung des Beziehungssystems in der Programmiersprache SysML können die Informationen je nach Anwendungsfall automatisiert ausgewertet werden. So lassen sich beispielsweise für einzelne technische Anforderungen alle Einflussfaktoren und deren Einfluss sowie die Information für unterschiedliche Regionen, wie in Bild 8 dargestellt, ausgeben.

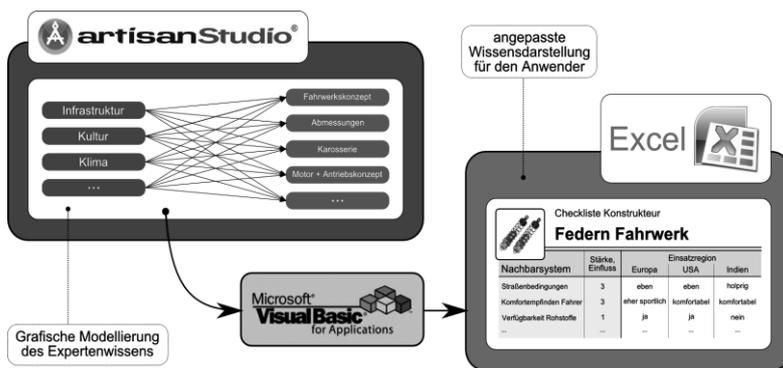


Bild 8: Exemplarische Darstellung der Wissensaufbereitung des auf den Anwender angepassten Expertenwissens

---

Durch die angepasste Darstellung der Informationen wird es dem Fahrzeugentwickler erleichtert, die technischen Anforderungen für das Fahrzeugkonzept zu bestimmen. Darüber hinaus werden dem Entwickler im Beziehungssystem die Abhängigkeiten der Einflussfaktoren auf einzelne technische Anforderungen aufgezeigt. Anhand der Gewichtung der Beziehungen kann der Entwickler außerdem abwägen, welchen Kompromiss er bei der Festlegung der Anforderung aufgrund der Einflussfaktoren eingehen muss. Durch die Dokumentation verschiedener Regionen im Beziehungssystem wird es ermöglicht die technischen Anforderungen zu identifizieren, bei denen regionspezifische Unterschiede – eine sogenannte Anforderungsspreizung – auftreten. Treten besonders markante Spreizungen auf, könnten diese beispielsweise in modularen Fahrzeugkonzepten berücksichtigt und somit regionspezifische Fahrzeuge kostengünstig realisiert werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Gegenüberstellung der Einflussfaktoren und der technischen Anforderungen eines Fahrzeugkonzepts werden die Beziehungen zwischen dem Fahrzeugumfeld und dem Fahrzeug selbst aufgezeigt. Durch die Dokumentation der Beziehungen in der Programmiersprache SysML können außerdem die Darstellung der jeweiligen Informationen auf den Anwender zugeschnitten werden. Dadurch wird es dem Fahrzeugentwickler ermöglicht, bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses Abhängigkeiten zum Fahrzeugumfeld zu erkennen und diese bei der Festlegung der Anforderungen zu berücksichtigen. Sind zusätzlich regionspezifische Informationen über die Einflussfaktoren im Beziehungssystem dokumentiert, können regional abweichende Anforderungen ermittelt werden, die insbesondere in der Entwicklung eines regionspezifischen Fahrzeugs zu berücksichtigen sind.

Bei der programmtechnischen Umsetzung können weitere Informationen kontinuierlich hinzugefügt werden. So lässt sich beispielsweise die Struktur der Einflussgebiete überprüfen und gegebenenfalls erweitern. Auch können die regionspezifischen Informationen im Beziehungssystem konkretisiert oder Informationen über weitere Regionen hinterlegt werden. In diesem Zusammenhang ist es denkbar, eine kontinuierliche Dokumentation der sich in einer Region verändernden Einflussgebiete vorzunehmen. Diese Datengrundlage kann im Anschluss genutzt werden, um Prognosen über die zukünftigen Entwicklungen der Einflussgrößen, beispielsweise durch die Anwendung der Szenariotechnik, zu treffen. Da die Einflussfaktoren aus der Umgebung fahrzeugunabhängig ermittelt wurden, ist darüber hinaus denkbar, die erarbeiteten Strukturen auf andere technische Systeme zu beziehen. Dazu müssen weitere technische Systeme in der SysML erfasst und die Beziehungen abgebildet werden.

---

## Literatur

- [1] Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: „Strategien in der Automobilindustrie – Technologietrends und Marktentwicklung“, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2009
- [2] VDI: "Systematic approach to the development and design of technical systems and products", VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, Düsseldorf, 1993 (VDI-Richtlinie - Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik).
- [3] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [4] Stechert, C.: „Modellierung komplexer Anforderungen“, Diss. TU Braunschweig, Verlag Dr. Hut, München, 2010.
- [5] Ehrlenspiel, K.: „Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit“, 4. Aufl., Hanser, München, 2009.
- [6] Braess, U.; Seiffert, H.-H.: „Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik“, 5. Aufl., Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [7] Grabner, J.; Nothhaft, R.: „Konstruieren von Pkw-Karosserien“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] Prinz, A.: „Struktur und Ablaufmodell für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten“, Logos Verlag, Berlin, 2011
- [9] Alexandrescu, Irene: "Werkzeuge für die rechnerbasierte Konfiguration kundenspezifischer Produkte", Diss. TU Braunschweig, Verlag Dr. Hut, München, 2011
- [10] Stechert, C.; Franke, H.-J.: „Requirements Models for Collaborative Product Development“, veröffentlicht in "Proc. of the 19th CIRP Design Conference", Seite 24-31, 2009
- [11] Franke, H.-J.: „Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses“, Diss. TU Braunschweig, Düsseldorf, 1976
- [12] Weilkens, T.: „Systems Engineering mit SysML/UML – Modellierung, Analyse Design“, dpunkt Verlag, Heidelberg, 2006

# Konzept eines Wissensintegrationssystems zur benutzerfreundlichen, benutzerspezifischen und selbstständigen Integration von Konstruktionswissen

Martin Kratzer<sup>1</sup>, Michael Rauscher<sup>2</sup>, Hansgeorg Binz<sup>1</sup> und Peter Göhner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)*

<sup>2</sup> *Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik (IAS)  
Universität Stuttgart*

This paper presents an approach for a knowledge integration system to integrate engineering design knowledge user friendly, user specific and independent from a knowledge engineer into a multi-agent design system. In order to obtain requirements on this knowledge integration system, a survey was made. The results of this survey are presented here. Based on these requirements, the concept of the knowledge integration system and the modified knowledge base are explained. An example illustrates the previously described approach.

## 1 Einleitung

Die Informations- und Wissensbasis ist in der heutigen Zeit innerhalb von produzierenden und service-orientierten Unternehmen eine wichtige Ressource in Geschäftsprozessen. Diese wird zudem in naher Zukunft noch wichtiger, um wettbewerbsfähig und innovativ zu bleiben [1]. Der Schlüssel liegt u. a. in der unternehmensweiten Einführung des kodifizierten Wissensmanagements (WM), das neben dem personellen WM den Schwerpunkt auf die elektronische Speicherung von Wissen legt [2]. Über die elektronische Spei-

---

cherung ist die rechnergestützte Verbreitung von individuellem Fachwissen im Unternehmen möglich [1]. Hierzu können wissensbasierte Systeme (WBS) verwendet werden, die im Produktentwicklungsprozess den Konstrukteur in Verbindung mit einem CAD-System von Routinetätigkeiten entlasten [3].

Ein neuartiger Ansatz im Bereich der WBS sind agentenbasierte Systeme in der Konstruktion (engl. MADS, multi-agent design system). Auf Basis früherer Entwicklungen konnte mit dem ProKon-Unterstützungssystem ein grundsätzlich neuer Ansatz entwickelt werden [4]. Hierbei entstand ein Basissystem (BS), das ein Produktmodell auf Konsistenz mit geltenden Anforderungen an das spätere Produkt und auf Konsistenz mit Gestaltungsrichtlinien (DfX, DtX) überprüft. Während der Entwicklung konnten frühere Behauptungen bestätigt werden, dass eine erfolgreiche Überführung eines unter akademischen Bedingungen entwickelten Systems in die Industrie nur dann möglich ist, sofern Konstrukteure die Möglichkeit haben, Konstruktionswissen benutzerfreundlich, benutzerspezifisch und selbstständig zu integrieren. Aus diesem Grund ist es im aktuellen Forschungsprojekt das Ziel, ein Wissensintegrationssystem (WIS) zu entwickeln, das genau diese Grundanforderungen erfüllt. Mit diesem System kann die Funktionalität des in der indirekten Wissensakquisition notwendigen Wissensingenieurs übernommen und der Wartungsaufwand minimiert werden. Jedoch ist bisher im Bereich der agentenbasierten Konstruktionssysteme nicht geklärt, wie ein solches WIS aussehen könnte und ob ein bereits existierendes für die eigene Entwicklung adaptiert werden kann. Besonders das Zusammenspiel der einzelnen Agenten bzw. des gesamten Agentensystems mit den lokalen Wissensbasen bzw. der zentralen Wissensbasis ist nicht geklärt. Zudem sind die Anforderungen der Industrie an ein WIS nicht definiert, deren Erfüllung für eine erfolgreiche Überführung des Gesamtsystems (BS + WIS) wichtig ist.

In diesem Beitrag wird zunächst im Stand der Forschung (Abschnitt 2) das bereits entwickelte Basissystem kurz vorgestellt und die indirekte Wissensakquisition erläutert. Darauf folgt eine Einführung in bisher entwickelte Wissensintegrationssysteme bzw. -komponenten. Abschnitt 3 handelt von den aus Industrie und Forschung erhobenen Anforderungen. Auf dieser Basis erfolgt die Vorstellung des Konzepts eines Wissensintegrationssystems, das die zuvor genannten Probleme beheben soll (Abschnitt 4). Der Beitrag wird von einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick abgerundet.

---

## 2 Stand der Forschung

Das bereits entwickelte ProKon-Basissystem dient als Kernsystem zur Überprüfung von Produktmodellen im CAD-System in Bezug auf Inkonsistenzen gegenüber nicht erfüllten Anforderungen an das spätere Produkt und gegenüber nicht eingehaltenen DfX-Richtlinien. Die Funktionalität wird durch ein Agentensystem abgebildet, das eine einer Konstruktionsabteilung nachempfundenen Struktur aufweist. Agenten sind autonome Softwareeinheiten, die die ihnen gegebenen Ziele verfolgen und dabei untereinander oder mit der Umgebung interagieren können [5]. Eine zentrale Aufgabe im ProKon-Basissystem kommt den Aspektagenten zu, die jeweils eine DfX-Richtlinie (z. B. fertigungsgerechtes Konstruieren) betreuen. Unterstützt werden sie durch Fachagenten mit Wissen über ein spezielles Maschinenelement (z. B. Fachagent für die Welle). Die dritte Agentenklasse bilden die Objektagenten. Diese Agenten sind zuständig für CAD-Objekte (Bauteile, Baugruppe, Verbindungen), die Anforderungsliste und weitere sich in der Umgebung des Systems befindenden Objekte. Letztlich koordiniert der Managementagent als „Konstruktionsleiter“ die Konsistenzprüfung, die Lösungsfindung und Lösungsumsetzung. Durch die somit erreichte Funktionalität kann der Konstrukteur bei der Arbeit mit dem CAD-System von Routinetätigkeiten entlastet werden [4].

Darauf aufbauend stellt die benutzerfreundliche, benutzerspezifische und selbstständige Integration von Wissen für den Konstrukteur im Umgang mit dem entwickelten Basissystem ein wichtiger Baustein dar, um das System auf spezifische Projekte und firmeninterne Gegebenheiten anzupassen. Die Notwendigkeit begründet sich auch in der Tatsache, dass in den verbreitetsten Definitionen von Experten- und wissensbasierten Systemen stets eine Wissensenerwerbs- bzw. Wissensakquisitionskomponente aufgeführt wird [6]. Diese Art der Integration wird hauptsächlich als direkte Wissensakquisition eingestuft, da dort im Gegensatz zur indirekten Wissensakquisition die Tätigkeiten des Wissensingenieurs weitgehend übernommen werden. Diese Maßnahme ist für den Konstrukteur eine deutlich flexiblere Lösung, da ein Wissensingenieur als Vermittler nicht mehr notwendig ist. Ein Kommunikations- und Verständnisproblem kann in diesem Fall somit nicht mehr auftreten. Vorteile ergeben sich durch einen zeit- und kosteneffizienteren Produktentwicklungsprozess. Letztlich wird das organisationale Wissensmanagement verbessert. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bereits vielfältige Wissensakquisitionskomponenten entwickelt wurden, die jedoch punktuell Schwachstellen aufweisen (notwendige Schulungsmaßnahmen, Fokussierung auf spezielle Wissensformen und Wissenstypen etc.). Zudem ist eine Anbindung an ein agentenbasiertes System bisher nicht erfolgt. Aus diesem Grund ist es

zweckmäßig, ein Wissensintegrationssystem unter Berücksichtigung der bisherigen Forschung zu entwickeln. Eine Adaption, wie sie in Abschnitt 1 in Betracht gezogen wurde, ist demnach nicht möglich. Im nächsten Abschnitt werden zunächst Anforderungen an das Wissensintegrationssystem aufgeführt.

### 3 Anforderungen an ein Wissensintegrationssystem

Mit Hilfe einer empirischen Untersuchung wurden im Vorfeld der eigentlichen Entwicklung Anforderungen an das Wissensintegrationssystem erhoben. An der Untersuchung haben sich insgesamt 24 Probanden beteiligt (21 aus der universitären Forschung und 3 aus der industriellen F&E). Die Untersuchung bestand aus einem Fragebogen, der aus einer Signifikanzbewertung von vorgegebenen Anforderungen und aus einem Freitextteil bestand. Die Auswertung der Signifikanzbewertung zeigt Bild 1.

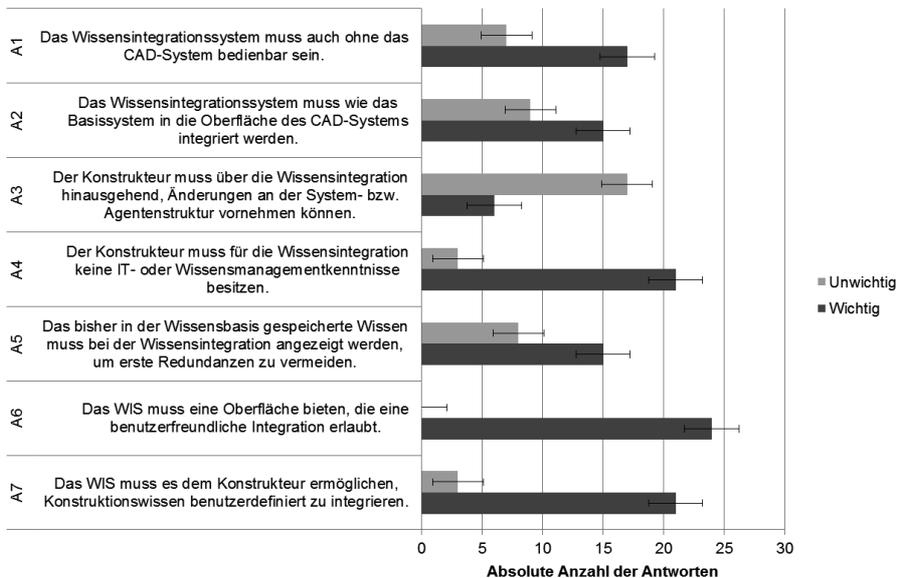


Bild 1: Auswertung der Signifikanzbewertung (A = Anforderung)

Die Anforderungen 1, 2, 4, 6 und 7 können für die weitere Entwicklung des Wissensintegrationssystems verwendet werden. Hierbei stellen Anforderungen 4, 6 und 7 grundsätzliche Anforderungen dar, die eine benutzerfreundliche, benutzerspezifische und selbstständige Integration von Konstruk-

tionswissen fordern. Anforderung 5 wurde nicht eindeutig als wichtig empfunden. Die von Probanden abgegebenen Antworten stehen hierbei z. T. den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung entgegen. Beispiel hierfür ist die Behauptung, dass es für Fachexperten schwierig ist, Inkonsistenzen in einer Wissensbasis zu identifizieren, sollte mit der Integration auf „einer grünen Wiese“ begonnen werden. Als offensichtlich unwichtig wurde die Anforderung nach einer über die Wissensbasis hinausgehenden Änderung an der Systemstruktur eingestuft (Anforderung 3). Zudem konnten die Probanden über ein Freitextfeld eigene Anforderungen an das WIS angeben. Bild 2 listet diese Anforderungen ungeachtet deren Wichtigkeit auf. Nach eigener Interpretation im Hinblick auf das auszuarbeitende Konzept erfolgt zudem eine Einstufung in Forderung (F) und Wunsch (W).

Nr.	Beschreibung
A8	Einheitliche Definition von Begriffen, Attributen oder Kategorien bzgl. der Wissensbeschreibung (F).
A9	Geringer Aufwand bei der eigentlichen Integration von Konstruktionswissen (F).
A10	Informationsquelle muss bei der Integration von Wissen stets angegeben werden, um eine Rückverfolgung zu gewährleisten (F).
A11	Das WIS muss eine Systemperformance aufweisen, die es Konstrukteuren erlaubt, sofort an der Konstruktion weiter zu arbeiten (F).
A12	Die Oberfläche des WIS sollte nach den Normen und Richtlinien der Interfacegestaltung ausgelegt sein (W).
A13	Die Eingabe von Wissen sollte u. a. grafisch möglich sein (F).
A14	Die Integration muss über Wissensrepräsentationsformen erfolgen, die dem Konstrukteur bekannt sind (F).

Bild 2: Weitere Anforderungen an das WIS

Auf Basis dieser Anforderungen wird im nächsten Schritt ein Konzept für das Wissensintegrationssystem präsentiert.

#### 4 Konzept eines Wissensintegrationssystems

In diesem Abschnitt wird zunächst auf das Gesamtkonzept und auf die Eingliederung in das Gesamtsystem eingegangen (Abschnitt 4.1). Anschließend erfolgt die Beschreibung der zentralen Wissensbasis, die für das Wissensintegrationssystem sowie für das Basissystem eine wichtige Rolle spielt (Abschnitt 4.2). Eine abschließende Verdeutlichung der Thematik mit Hilfe eines Beispiels findet in Abschnitt 4.3 statt.

## 4.1 Gesamtkonzept

Auf Basis der erhobenen Anforderungen wird im Folgenden ein Konzept für das Wissensintegrationssystem (WIS) präsentiert. Die bisher existierende ProKon-Wissensbasis wird für diesen Zweck inhaltlich bzw. strukturell überarbeitet und angepasst. Neben dem formalen Teil der Wissensbasis, die lediglich vom Agentensystem verwendet wird (siehe Bild 3, dunkelblaue Wissensenselemente), unterstützt die semi-formale Wissensbasis den Konstrukteur mit für ihn aufbereiteten Wissensenselemente (siehe Bild 3, weiße Wissensenselemente). Des Weiteren besteht das WIS aus einem Front-end, das über Kommunikations- und Interaktionsfähigkeiten bzgl. der semi-formalen Wissensbasis verfügt und für den Konstrukteur eine Benutzungsoberfläche bereitstellt. Letztlich ist die WIS Middleware für die Aufbereitung von Wissensenselementen aus dem formalen Teil und für die Rückführung modifizierter Wissensenselemente aus dem semi-formalen Teil der Wissensbasis zuständig. Bild 3 zeigt den Aufbau des Wissensintegrationssystems im Kontext des Gesamtsystems.

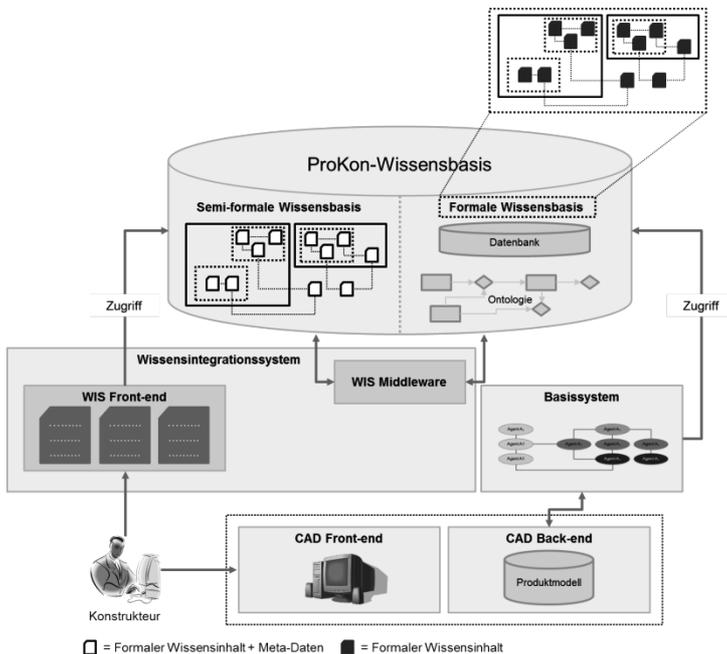


Bild 3: Gesamtaufbau des ProKon-Systems mit Wissensintegrationssystem

Das Wissensintegrationssystem stützt sich auf zwei grundlegende Prinzipien, die im weiteren Verlauf erläutert werden:

1. Prinzip des fallbasierten Kreislaufs
2. Prinzip der Initialisierung

Das Prinzip des fallbasierten Kreislaufs ist vom Cased-based Reasoning (CBR) in dessen Grundidee adaptiert worden und regelt den Zugriff auf die Wissensbasis durch den Konstrukteur, die Verarbeitung semi-formaler Wissensselemente zuzüglich deren Überprüfung auf Abgeschlossenheit und Konsistenz sowie letztlich das Einpflegen in die Wissensbasis. Die Notwendigkeit des Konstrukteurs zur Wissensintegration (z. B. eine Regel für das funktionsgerechte Gestalten eines Querpressverbands) stellt den Anfang der Integration dar. Der Konstrukteur verwendet eine Suchfunktion unter der Verwendung von Schlagwörtern. Die WIS Middleware sucht auf Anfrage des Konstrukteurs mögliche Wissensselemente zusammen und bildet daraus Anwendungsfälle (z. B. funktionsgerechtes Gestalten von Pressverbänden), Sachverhalte (z. B. Regel bzgl. des Übergangs vom Presssitz zum nächsten Wellenabschnitt) und einzelne Wissensselemente, den so genannten *ProKon-Knowledge-Forms* (PKF). Die Abgrenzung zwischen Anwendungsfall, Sachverhalt und PKF verdeutlicht Bild 4 mit den jeweiligen Beispielen.

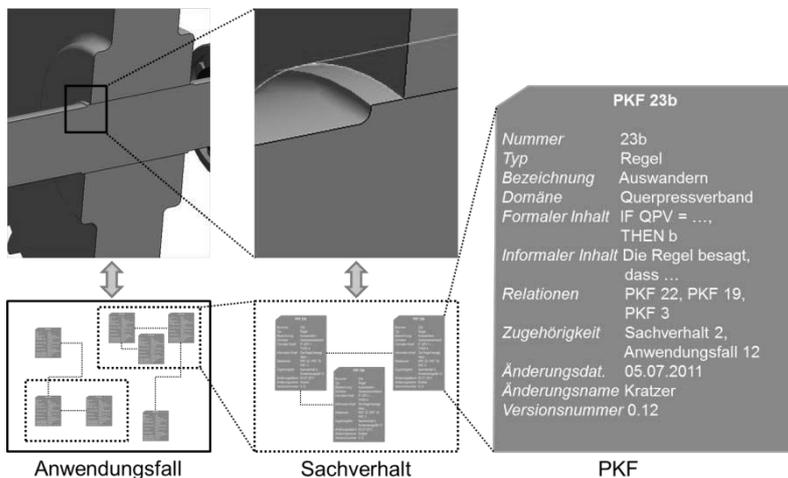


Bild 4: Abgrenzung Anwendungsfall, Sachverhalt und PKF

Die PKFs stellen eine Weiterentwicklung der ICARE-Forms aus der MOKA-Methodik [3] dar und beinhalten unter den Oberkategorien Regel, Bedingung, Formel, Parameter, Tabelle und Begriff den kleinsten Teil eines Wissensselements. Dieser Zugriff kann mit dem aus dem CBR bekannten Begriff *Retrieve*

---

verglichen werden. In einem zweiten Schritt greift sich der Konstrukteur den Anwendungsfall bzw. Sachverhalt heraus. Dort fügt er innerhalb des Anwendungsfalls oder Sachverhalts ein neues PKF an oder ändert ein bestehendes PKF ab (CBR: *Reuse*). Der dritte Schritt *Überprüfen* beinhaltet die komplexe Aufgabe, die abgeänderten PKFs bzw. neu hinzugefügten PKFs zum einen auf Abgeschlossenheit gegenüber der gesamten Wissensbasis und zum anderen auf Konsistenz, d. h. Redundanz- und Widerspruchsfreiheit, hin zu überprüfen. Wird beispielsweise die Regel für das funktionsgerechte Gestalten eines Querpressverbands integriert, weist das WIS den Konstrukteur darauf hin, dass u. a. eine übergeordnete Regel angepasst und eine Bedingung erstellt werden muss. Die Überprüfung auf Redundanzfreiheit beinhaltet die Funktionalität, doppelte Wissens Elemente anhand deren Kennung (z. B. bei Formeln der Ergebnisoperand oder die einzelnen Formeloperanden) zu identifizieren. Die Widersprüchlichkeit von Wissens Elementen wird z. B. bei Bedingungen erkannt, die sich gegenseitig widersprechen (z. B.  $I_F/D_F \geq 1,5$  und  $I_F/D_F < 0,5$ ). Dieser Vorgang entspricht beim CBR dem Schritt *Revise*. Letztlich sind die Wissens Elemente (Anwendungsfälle, Sachverhalte und PKFs) in die Wissensbasis über die WIS Middleware zurückzuführen (CBR: *Retain*). Das Prinzip der Initialisierung regelt nach der Modifikation der Wissensbasis die Neuzusammenstellung des gesamten Systems. Sofern nur geringfügige Änderungen an der Wissensbasis erfolgt sind, ist eine reine *Neuinitialisierung* notwendig. Die Agenten greifen hierbei auf den gewohnten Kommunikationspfaden auf die formalen Wissens Elemente zu. Sofern eine größere Änderung an der Wissensbasis durchgeführt wurde oder sogar ein neuer Agent instanziiert werden soll, muss das Wissensintegrationssystem das Agentensystem neu zusammenstellen (*Neugenerierung*). Diese Aktion läuft für den Konstrukteur im Hintergrund ab. Nach der Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus des WIS und der Erläuterung der Funktionalitäten durch die beiden Prinzipien wird im nächsten Abschnitt die Wissensbasis in ihrem Aufbau näher beschrieben.

## 4.2 Wissensbasis

Wie bereits erwähnt, wurden die sechs verschiedenen Wissensformen *Bedingung, Regel, Formel, Parameter, Tabelle und Begriff* identifiziert. Die einzelnen Wissens Elemente gehören jeweils einer dieser Formen an, jedoch bestehen diverse Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Formen. Eine Übersicht über diese Abhängigkeiten ist in Bild 5 dargestellt, eine Erläuterung erfolgt am Beispiel der Wissensform *Formel*. Jedes Wissens Element besitzt zwei Kategorien von Informationen. Die semi-formale Beschreibung unterstützt den Autor der Wissens Elemente und enthält beispielsweise textuelle Beschreibungen, Skizzen oder Ähnliches. Die formale Beschreibung enthält die Informationen, die für das ProKon-Basissystem von funktionaler Bedeutung sind.

Das jeweils unterstrichene Attribut identifiziert ein Wissenselement eindeutig, kursive Begriffe bezeichnen den Typ eines Attributs. So enthält ein Wissenselement vom Typ *Formel* ein Ergebnis. Dieses ist für jede Formel eindeutig, da für jedes Ergebnis nur eine einzige Formel im System existieren darf. Das Ergebnis ist vom Typ *Parameter* und somit mit einer anderen Wissensform verknüpft. Die Formel selbst besteht aus Operanden, die wiederum *Parameter* sind, und Operatoren. Schließlich werden die für die weitere Verarbeitung der Formel notwendigen veränderlichen Parameter angegeben.

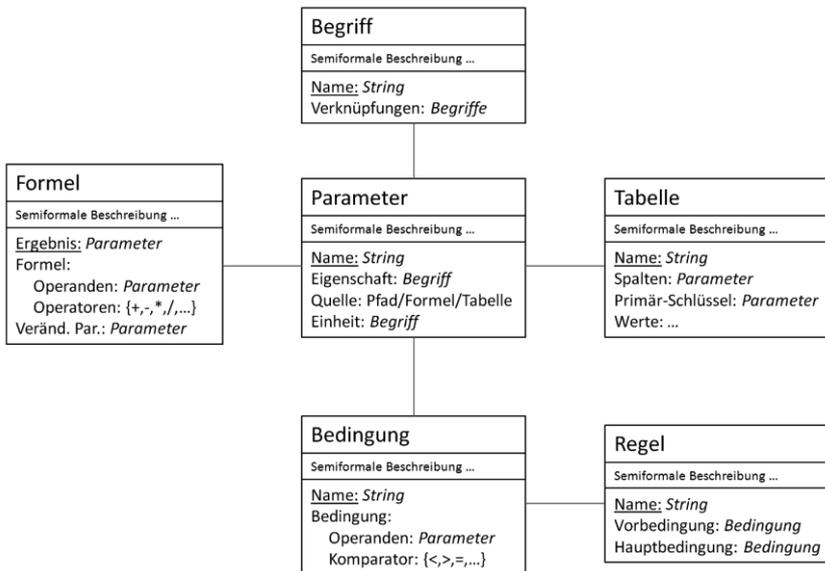


Bild 5: Übersicht über die abzubildenden Wissensformen

Die Wissenselemente werden innerhalb der Wissensbasis in einfachen Datenbanktabellen abgebildet. Die Datenbanktabellen besitzen für jedes Attribut eines Wissenselements eine oder mehrere Spalten, die Wissenselemente selbst sind somit zeilenweise abgelegt. Die Verknüpfung zwischen den Wissenselementen wird jeweils durch die Angabe des identifizierenden Attributs des zu verknüpfenden Elements realisiert. Wissenselemente des Typs *Begriff* werden zusätzlich in einer Ontologie abgelegt. In dieser sind die Begriffe selbst als Konzepte und die Verknüpfungen zwischen diesen als Relationen abgebildet. Die Ontologie dient als Grundlage für die Wissensbasis, da hier die Begriffe definiert werden, die in den übrigen Wissenselementen benutzt werden. Für die Konsistenzsicherung der Wissensbasis sind folgende Überprüfungsmechanismen vorgesehen. Der Aufbau jedes Wissenselements wird

---

gemäß Spezifikation geprüft. Zusätzlich wird die Eindeutigkeit sichergestellt, indem die Werte der identifizierenden Attribute auf Einmaligkeit im System geprüft werden. Da die Vollständigkeit der Wissensbasis nicht überprüft werden kann, wird lediglich die Abgeschlossenheit untersucht. Hierzu werden die Verknüpfungen der einzelnen Wissens Elemente analysiert. Jede im Wissensmodelltyp definierte Verknüpfung muss gesetzt sein und eine Verknüpfung muss in einem existierenden Element enden. Sind alle drei Mechanismen erfolgreich durchlaufen, so ist die Konsistenz der Wissensbasis gegeben. Diese Mechanismen werden bereits während der Eingabe des Konstrukteurs angewendet, damit diesem direkt Rückmeldung gegeben werden kann, wenn eine Inkonsistenz vorliegt, und dieser entsprechende Korrekturen vornehmen kann. Zur Überführung der Wissens Elemente aus der Wissensbasis in das bereits angesprochene ProKon-Basissystem werden die Elemente zunächst aus der Wissensbasis extrahiert und gemäß dem Einsatz im Basissystem gruppiert. Je nach Gültigkeitsbereich (Aspekt) werden sie einem bestimmten Agenten zugeordnet und die formalen Teile der Wissens Elemente in das im Basissystem verwendete Dateiformat (XML) übersetzt. Tabellen werden in einer dem Basissystem zugehörigen Datenbank erstellt und die einzelnen Werte übernommen. Die die Begriffe enthaltende Ontologie wird direkt kopiert, da sie für das Basissystem ebenfalls als Grundlage für die Wissensverarbeitung bzw. als Begriffsdefinition für die Agenten dient.

### 4.3 Beispiel zur Wissensintegration

Im Folgenden wird ein Beispiel zur Wissensintegration durch den Konstrukteur aufgezeigt, um das in Abschnitt 4.1 und 4.2 vorgestellte Konzept zu veranschaulichen. Ausgangspunkt stellt der Konstrukteur dar, der eine Regel zur Überprüfung der funktionsgerechten Gestaltung eines Querpressverbands nachträglich integrieren möchte. Er bekommt nach der Suche in der Wissensbasis vom WIS den Anwendungsfall *Gestaltung von Querpressverbänden*, den Sachverhalt *funktionsgerechtes Gestalten von Querpressverbänden* und die dazu passenden PKFs angezeigt (Retrieve). Ein Ausschnitt aus dem Anwendungsfall wird in Bild 6 dargestellt. Im darauf folgenden Schritt (Reuse) wird der aufgerufene Anwendungsfall beibehalten und die Regel 3 (siehe Bild 6, 1) hinzugefügt. Nach dieser Eingabe überprüft das System die Konsistenz und Abgeschlossenheit der integrierten Wissens Elemente (Revise). Hierbei wird der Konstrukteur auf weitere zu integrierende Wissens Elemente aufmerksam gemacht. Zum einen sind bereits bestehende PKFs zu erweitern (2) und zum anderen ein neues PKF hinzuzufügen (3).

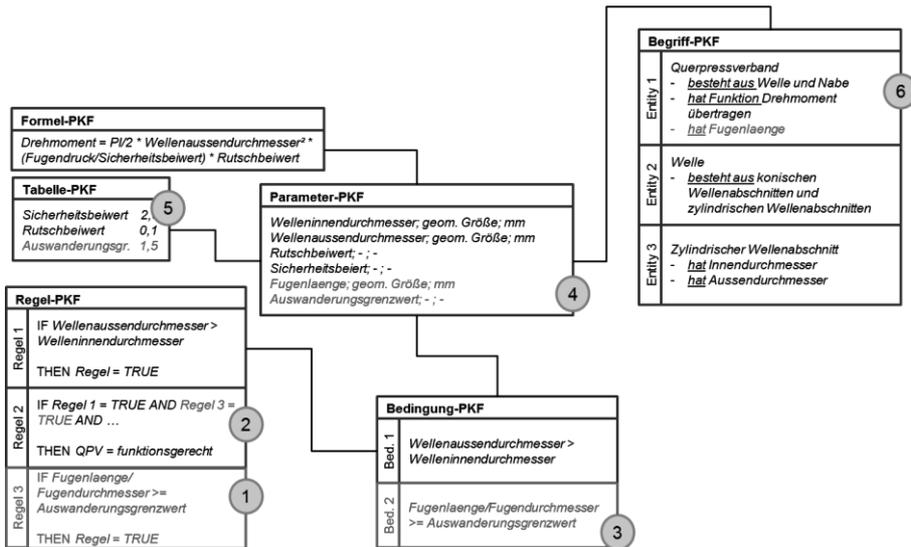


Bild 6: Beispiel für die Integration von Konstruktionswissen

Nach jeder Eingabe werden diese wiederum überprüft und es werden ggf. weitere zu integrierende Wissens Elemente identifiziert (4, 5, 6). Erst wenn alle Inkonsistenzen beseitigt sind und die Wissensbasis abgeschlossen ist, kann der Integrationsprozess abgeschlossen werden. Ist dies geschehen, so kann der Inhalt der Wissensbasis in das ProKon-Basis system übertragen und verwendet werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden zum einen Anforderungen an das ProKon-Wissensintegrationssystem von Seiten der potenziellen Anwender aus Forschung und Industrie erhoben. Zum anderen ist ein Konzept vorgestellt worden, das es Konstrukteuren erlaubt, Konstruktionswissen benutzerfreundlich, benutzerspezifisch und selbstständig in das Unterstützungssystem zu integrieren. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung können gemäß der Wissensstrukturierung in der Konstruktionstechnik verschiedene Wissenstypen und Wissensformen integriert werden. Dies wurde durch die Verwendung der ProKon-Knowledge-Forms (PKF) erreicht, die mit insgesamt sechs Ausprägungen die Wissensrepräsentation von Konstruktionswissen zulassen. Hierbei sind diese in der Wissensbasis in sogenannte Sachverhalte und Anwendungsfälle eingeordnet, um den Konstrukteur auch eine einfache Navigation durch die Wissensbasis zu ermöglichen. Das in der Literatur häufig er-

---

wähnte Problem der Anknüpfung neuer Wissens Elemente an bestehende wird somit umgangen. Im weiteren Verlauf des Projekts ist das Konzept weiter zu detaillieren. Besonders auf die Mechanismen zur Überprüfung der Abgeschlossenheit und Konsistenz ist Wert zu legen. Mit Hilfe zweier Anwendungsszenarien (Integration einer Norm und Integration einer bisher in der Wissensbasis fehlenden Welle-Nabe-Verbindung) ist abschließend ein Prototyp zu entwickeln, der in Kombination mit dem Basissystem im industriellen Umfeld erprobt wird.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung des Projekts *ProKon – Proaktive Unterstützung von Konstruktionsprozessen durch Softwareagentensysteme*.

## Literatur

- [1] Hicks, B. J.; Culley, S. J.; Allen, R. D.; Mullineux, G.: A framework for the requirements of capturing, storing and reusing information and knowledge in engineering design. In: International Journal of Information Management 22, 2002, S. 263-280
- [2] Remus, U.: Prozessorientiertes Wissensmanagement: Konzepte und Modellierung. Dissertation, Universität Regensburg, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik III, 2002.
- [3] Stokes, M.: Managing engineering knowledge. MOKA: methodology for knowledge based engineering applications. Professional Engineering Publishing, London, 2001.
- [4] Kratzer, M.; Rauscher, M.; Binz, H.; Göhner, P.: An agent-based system for supporting design engineers in the embodiment design phase. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), 2011
- [5] Wagner, T.; Göhner, P.; Urbano, Paulo G. A. de: Softwareagenten: Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung. In: atp Automatisierungstechnische Praxis, 2004, Nr. 4 Sonderdruck, S. 1-31
- [6] Görz, G.: Handbuch der künstlichen Intelligenz. 4. Aufl. München: Oldenbourg, 2003.

## Formalisierung und Verwaltung von Entwicklungswissen im Kontext des Integrierten Produktmodells

Thilo Breitsprecher, Christoph Westphal, Nico Meintker und  
Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg*

The structured management of product data has been one of the most important aspects in increasing the efficiency of development processes. But next to the access to product data the management of expert- and development knowledge is one key factor for successfully development. Therefore this paper should present an approach to acquire, store and to visualize knowledge by integrating a data mining process into an integrated product model.

### 1 Einleitung und wissenschaftliche Fragestellung

Die strukturierte Verwaltung von Produktdaten hat in den letzten Jahrzehnten maßgeblich zur Effizienzsteigerung in der Konstruktion aber auch in der Simulation beigetragen. Ausgehend von den EDM-Ansätzen der achtziger Jahre ist eine heterogene Systemlandschaft zur Verwaltung aller im Produktlebenszyklus anfallenden Daten entstanden, die auch in den nächsten Jahren zur Optimierung von Prozessen und Organisationen beitragen wird [1]. Dennoch ist für die Auslegung und Entwicklung von Produkten neben dem Zugriff auf bereits gespeicherte Daten vor allem der Zugriff auf existierendes Experten- und Entwicklungswissen von entscheidender Bedeutung. Doch hierzu fehlt es nach GERHARD nach wie vor an Konzepten das Expertenwissen des

---

Konstrukteurs „systematisch zu erfassen und so in eine formalisierbare Form zu bringen, dass es einerseits maschinenlesbar und trotzdem für den Konstrukteur verständlich und beherrschbar bleibt“ [7].

Aus diesem Gedanken lässt sich direkt die wissenschaftliche Fragestellung ableiten, in welcher Form Expertenwissen erfasst, formalisiert und abgebildet, also akquiriert werden kann (Knowledge Engineering). Diese Fragestellung ist jedoch nicht isoliert zu betrachten, sondern um den Aspekt des Managements von Konstruktions-, Simulations- bzw. Versuchsdaten zu erweitern. Neben der reinen Verwaltung von Daten und Wissen stellt sich darüber hinaus die Frage, wie dieses Wissen dem Entwickler in geeigneter Art und Weise zur Verfügung gestellt bzw. visualisiert werden kann.

Diese Fragestellung soll im Kontext des SFB Transregio 73 „Umformtechnische Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen mit Nebenformelementen aus Feinblechen – Blechmassivumformung“ bearbeitet werden. Die im Rahmen dieses Beitrags entwickelten Methoden und Werkzeuge sollen es ermöglichen, dem Produktentwickler schnell und unkompliziert Auslegungsrichtlinien zur Verfügung zu stellen. Die angestrebte Visualisierung der Sensitivitäten und Abhängigkeiten zwischen Produkt- bzw. Prozessparametern einerseits und Produkteigenschaften andererseits soll die Qualität von Änderungskosten bei gleichzeitiger Reduzierung der Entwicklungszeit erhöhen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Das TOTE-Schema als Problemlösungszyklus

Die wesentlichen Kerntätigkeiten im Entwicklungsprozess lassen sich nach WEBER auf Synthese – die Ableitung von Produktmerkmalen bzw. -parametern aus den Anforderungen – und Analyse – die Ermittlung der Produkteigenschaften anhand der festgelegten Produktmerkmale – reduzieren [14]. Eine Berücksichtigung der im Entwicklungsprozess üblichen Iterationen kann durch das TOTE-Schema nach MILLER realisiert werden [8]. Dabei wird ein Regelprozess beschrieben, der bei Nichterfüllung der Produkteigenschaften nach einer *Analyse (Test)* eine weitere *Synthese (Operate)* vorschlägt. Auf diese folgt eine weitere *Analyse (Test)*. Stimmen die geforderten Eigenschaften mit den ermittelten überein kann die Iterationsschleife beendet werden (*Exit*).

### 2.2 Verwaltung von Produktdaten

Dieser Problemlösungszyklus bedarf allerdings einer ganzheitlichen Verwaltung aller Daten über den gesamten Produktlebenszyklus, welche durch

---

Produktdatenmanagement-Systeme (PDMS) ermöglicht werden soll. Das Resultat einer gesamtheitlichen Modellierung aller Produktdaten wird als integriertes Produktmodell bezeichnet. Die bekannteste Form dieses Integrierten Produktmodells bietet die ISO 10303 bekannt als STEP [2], [6]. Sogenannte Application Protocols stellen dabei eine anwendungsspezifische Instanz dieses Produktmodells zur Verfügung und dienen als datentechnische Grundlage für etliche kommerziell erhältliche PDM-Systeme wie Windchill PDMLink der Fa. PTC oder Teamcenter der Fa. Siemens UGS. Da diese Systeme ursprünglich zur Verwaltung der CAD-Daten konzipiert wurden, steht die Verwaltung der Konstruktionsdaten im Vordergrund.

Die Verwaltung der Simulationsdaten dient dagegen zur Unterstützung des Entwicklers bei der Dokumentation, Wiederverwendung und dem Vergleich Modelle aus aktuellen bzw. abgeschlossenen Projekten. Neben der ISO 10303 mit dem Application Protocol AP209 *Composite and Metallic Structural Analysis and Related Design* ist vor allem der SimPDM-Ansatz zur Verwaltung von Simulationsdaten hervorzuheben [13]. Auch im Simulationsdatenmanagement sind etliche kommerzielle Systeme wie bspw. *SimManager* der Fa. MSC oder *Teamcenter for Simulation* der Fa. Siemens UGS verfügbar. Für die Verwaltung von physikalischen Messdaten bieten neben dem generischen STEP-Ansatz der ASAM ODS Standard eine wichtige Grundlage bei der Konzeption des Computer-Aided Testing [3].

### 2.3 Akquisition von Entwicklungswissen via Data Mining

Die genannten Ansätze verfolgen jedoch hauptsächlich die Verwaltung und Archivierung von Produktdaten. Zur Verwaltung von Entwicklungswissen sind neben der Wissenssicherung allerdings die Wissensakquisition und die Wissensbereitstellung notwendig.

Im Kontext des Knowledge Engineering nimmt die Wissensakquisition eine zentrale Rolle ein, ist aber gleichzeitig auch eine „Engstelle“, die den späteren Nutzen einer wissensbasierten Anwendung stark determiniert. In der Literatur sind hinsichtlich der Unterteilung der Wissensakquisition in Subprozesse unterschiedliche Tendenzen zu erkennen. Allen gemein ist aber der Standpunkt, dass die Wissensakquisition direkt, indirekt oder automatisiert erfolgen kann, wie in Bild 1 gezeigt [4], [5], [12].

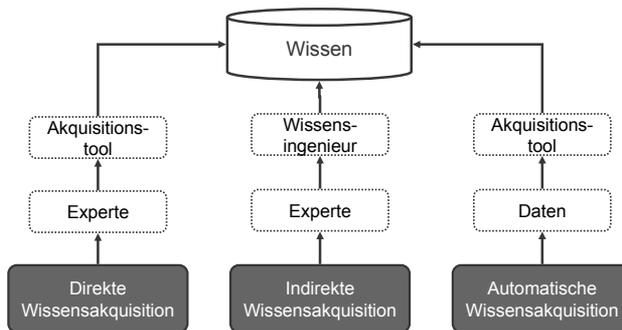


Bild 1: Methoden der Wissensakquisition nach [11]

Bezüglich formulierter Anforderungen an die Wissensakquisitionskomponente eines selbstlernenden Assistenzsystems zeigen die direkten und indirekten Methoden Defizite gegenüber automatisierter Vorgehensweisen. Daher wurde im des SFB/TR73 eine Methodik entwickelt, die es ermöglicht Entwicklungswissen aus Simulations- und Versuchsdaten automatisiert zu akquirieren [9], [10].

### 2.3.1 Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM)

Kernprozess dieser Methodik ist die systematische Anwendung von Verfahren aus den Domänen der Statistik, der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens, die unter dem Sammelbegriff „Data Mining“ subsumiert werden [15].

Das CRISP-DM Referenzmodell sieht im Wesentlichen das Durchlaufen folgender Phasen vor: Das erste Teilziel ist ein *Aufgaben- und Prozessverständnis* (1) zu schaffen, zur Klärung der gesamten Data Mining Ziele und der gestellten Anforderungen aus Sicht des Anwenders. Es schließt sich die *Datensichtung und -selektion* (2) an, um ein grobes „Gefühl“ für die Daten zu entwickeln. Erste Hypothesen über vermutete Zusammenhänge können bereits aufgestellt werden. Die folgende *Datenvorverarbeitung und -transformation* (3) dient der Zusammenführung, Säuberung und gezielten Auswahl der Daten. Der erste Einsatz von Data Mining Methoden erfolgt in der Phase *Modellierung und Wissensentdeckung* (4) und liefert bereits eine Lösungen für das jeweilige Data Mining Problem. Die *Interpretation und Auswertung* (5) liefert Hinweise darauf, welche Entscheidung auf Basis der erreichten Ergebnisse zu treffen ist. Beispielsweise könnte ein zu schlechtes Prognosemodell die iterative Wiederholung der vorherigen Phasen notwendig machen. In der letzten Phase *Umsetzung* (6) sind die Ergebnisse so aufzube-

reiten, dass der adressierte Endnutzer sie direkt für seine Zwecke einsetzen kann.

### 2.3.2 Realisierung der Wissensakquisition

Die Grundlage für die Durchführung eines Data Mining Prozesses ist per se das Vorhandensein von Daten. Im Rahmen des SFB/TR73 fallen diese in Form von FE-Parametervariationen mit den entsprechenden Simulationsergebnissen sowie realen Umformversuchen an. Die „Achsen“ die diesen multidimensionalen Datenraum aufspannen sind „Produkt“ (z. B. ein bestimmtes Nebenformelement mit den Geometrie Größen - Produktmerkmale), „Prozess“ (Prozessmerkmale) und die erzielten „Ergebnisgrößen“ (z. B. der Umformgrad im Bauteil - Produkteigenschaften). Für eine spezifische Ausprägung dieser „Achsen“ steht nach einer Parametervariation oder einer Umformversuchsreihe ein Set an Daten für das Data Mining zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Datensatzes sind die Algorithmen des Data-Minings in der Lage Vorhersagemodelle zu entwickeln, die in Abhängigkeit von Merkmalen (bspw. Geometrieparameter) festgelegte Eigenschaften (z. B. den Umformgrad) prognostizieren können [9], [15]. Dieses Schema ist durch Bild 2 wiedergegeben.

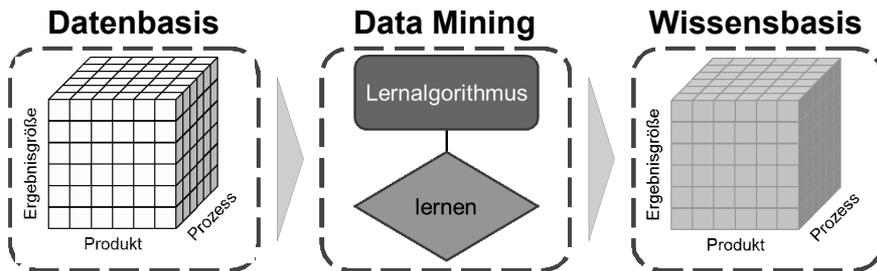


Bild 2: Prinzipieller Ablauf der automatischen Wissensakquisition via Data Mining

### 2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

Mit dem TOTE-Schema wurde ein etablierter Problemlösungszyklus vorgestellt, der den natürlichen Arbeitsablauf des Entwicklers darstellt. Um diesen effektiv zu unterstützen bedarf es nach Ansicht der Autoren Methoden das in der Analyse (Test) und der Synthese (Operate) benötigte Wissen effektiv in einem Produktdatenmanagementsystem zu verwalten und bereitzustellen.

Um die dazu notwendige systematischen Wissenserfassung und Formalisierung zu überwinden ist nach Ansicht der Autoren eine Integration des Data-Mining Prozesses in ein Produktdatenmanagementsystem zielführend.

### 3 Vorgehensweise für die Formalisierung und Verwaltung von Entwicklungswissen

Bei der Bereitstellung von Wissen muss dabei zwischen der Analyse und Synthese unterschieden werden. Einerseits kann die Analyse durch geeignete Vorhersagemodelle beschleunigt werden. Diese Vorhersagemodelle ermöglichen schnelle Aussagen zu den Produkteigenschaften ohne vorher zeitaufwändige Simulationen oder physische Versuche durchzuführen. Andererseits unterstützt eine Visualisierung der Sensitivitäten bzw. Korrelationen den Entwickler bei der Anpassung der Merkmale in der Synthese und vermeidet so unnötige Iterationsschleifen (Bild 3).

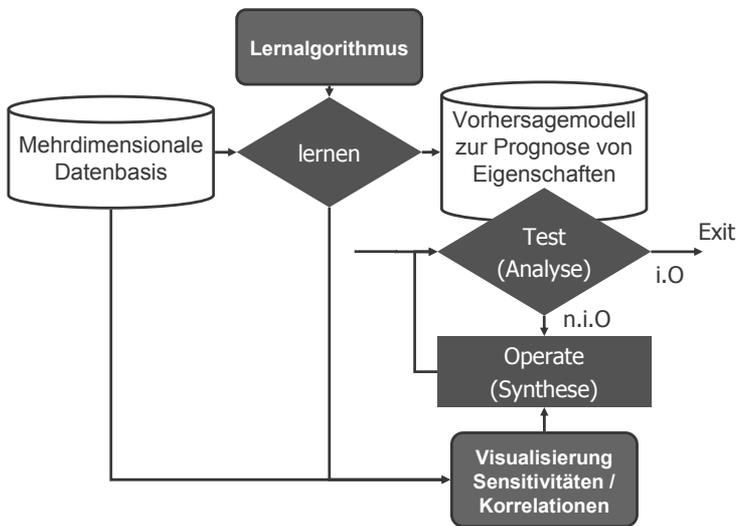


Bild 3: Angepasstes TOTE-Schema

Basis für die Erstellung des Vorhersagemodells bietet dabei die Verwaltung der Simulations- bzw. Versuchsparameter in einer Datenbank. Ein Data-Mining Tool (bspw. *RapidMiner* der i-Rapid GmbH) kann diese analysieren und verschiedene Arten von Vorhersagemodellen erzeugen. Die Auswahl der implementierten Vorhersagemodelle orientiert sich am vorliegenden Ziel des Teilprojektes: Lineare und Polynomiale Regression, Regellerner und Regres-

---

sionsbäume sind in der Lage aus numerischen Eingangsgrößen einer Datenbasis numerische Zielgrößen wie den Umformgrad oder auftretende Spannungen zu prognostizieren. Lernalgorithmen zur Prognose nomineller Zielgrößen (gut/schlecht; ja/nein; blau/grün/gelb/lila/usw.) können ebenfalls implementiert werden ohne vorher eine neue Datenbasis zur Verfügung stellen zu müssen. [15]

Aus diesem Prozess resultiert letztendlich ein Vorhersagemodell pro Produkteigenschaft (z.B. Umformgrad). Zusätzlich sind zu diesem Vorhersagemodell Fehlermaß und Standardabweichung bekannt. Dieses Vorhersagemodell kann nun auf Basis der aktuellen Konstruktionsparameter bzw. Produktmerkmale (z.B. Zahnhöhe) die zu erwartende Produkteigenschaft prognostizieren. Falls diese geforderte Produkteigenschaft nicht erfüllt werden, sind die Beitragsleister (Merkmale) für diese Eigenschaft zu ermitteln und dem Entwickler graphisch aufbereitet anzuzeigen. Die geänderte Merkmalskonfiguration kann anschließend durch das Vorhersagemodell wieder analysiert werden.

## 4 Implementierung und Vorhersage

Die Implementierung des Prozesses zur automatischen Wissensakquisition setzt sich aus einem Steuerprogramm mit grafischer Benutzerschnittstelle, einem Prozess-Steuerprogramm, einem relationalen Datenbanksystem sowie einem System für die Durchführung des Data Minings zusammen.

### 4.1 Implementierung der Datenbankstruktur

Grundlage für ein effizientes Datenmanagement ist ein Produktmodell. Dieses orientiert sich am STEP-Produktmodell, besteht aus 24 Entitäten und ist im relationalen Datenbankverwaltungssystem MySQL 5 implementiert. Somit können sämtliche relevanten Informationen eines Umformvorganges sowie die daraus resultierenden Eigenschaften aufgenommen werden. Relevante Informationen sind u.a. die Parameter der verwendeten Konzepte für Werk- und Halbzeug, spezifische Fertigungsverfahren sowie Geometriegrößen des Bauteils mit seinen Haupt- und Nebenformelementen (Merkmale). In diesem Aspekt spiegelt sich auch der in 2.3.2 beschriebene, multidimensionale Charakter des Datenraumes wider. Weitere Funktionalitäten sind die Zuordnung eines Vorhersagemodells zu einem Bauteil und die Archivierung älterer Modelle.

## 4.2 Realisierung des Selbstlernprozesses

Über eine graphische Oberfläche werden dem Anwender nur diejenigen Bauteile und Eigenschaften zur Verfügung gestellt, zu denen eine Vorhersage erstellt werden kann. Von dieser GUI aus kann der Nutzer anschließend den Selbstlernprozess anstoßen. Der nun ausgeführte Programmcode sorgt für die Steuerung des Data Mining Prozesses sowie für die notwendigen Datenbankoperationen zum Aus- und Einlesen aller benötigten und anfallenden Daten. Der gesamte Vorgang ist zusammenfassend in Bild 4 dargestellt und wird nachfolgend im Detail erklärt.

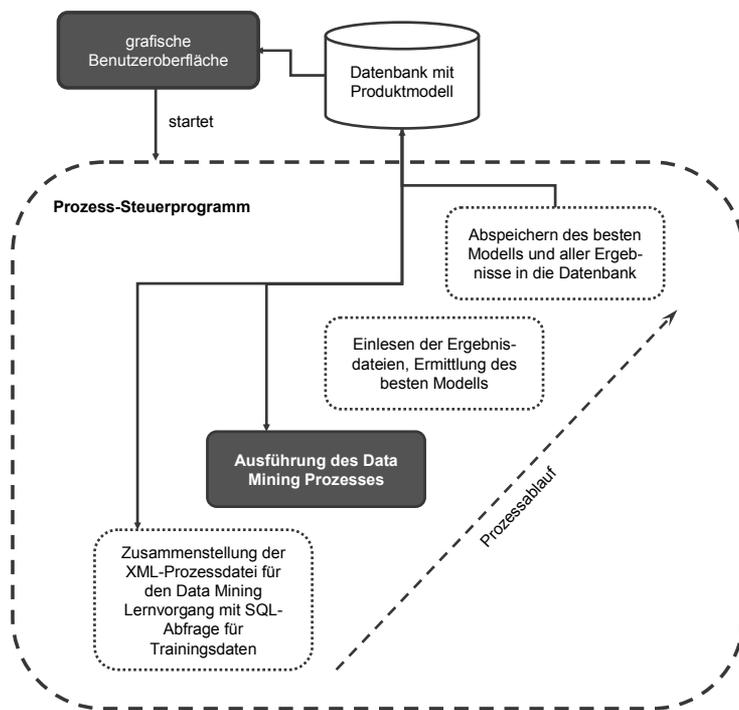


Bild 4: Ablauf des Prozesses zur automatischen Wissensakquisition mit Datenbankinteraktion

Nach Anstoß des Selbstlernprozesses durch den Anwender erfolgt zunächst die Erstellung eines Templates, welches den Data Mining Prozess vorgibt. In diesem Template erfolgt die Festlegung des korrekten Ausgabezeichnisses für die Ausgabedateien aus dem Data Mining Prozess. Anschließend erfolgt die Erstellung und Import des SQL-Strings zur Auswahl der Train-

---

ningsdaten aus der Datenbank. Nachdem das Template des Data Mining Prozesses erstellt ist, wird der Data Mining Prozesses in dem Data Mining System *RapidMiner* in der Konsolenausgabe gestartet, so dass der Prozess zur Erstellung der Modelle abgearbeitet wird. Nach Abschluss des Data Mining Prozesses erfolgt das Auslesen aller Modelle und Performances sowie der gepaarten T-Tests aus den Ausgabedateien. Dabei werden die Daten aus den Ausgabedateien in den Arbeitsspeicher zur weiteren Verarbeitung übertragen. Bei der Auswertung werden zunächst alle Modelle gesucht, die eine signifikant geringere Vorhersagegenauigkeit aufweisen als irgendein anderes Modell. In diesem Falle scheidet das unterlegene Modell aus der finalen Auswahl aus. Unter den Modellen, welche sich noch in der finalen Auswahl befinden wird dasjenige als bestes Modell gewählt, welches das geringste Fehlermaß aufweist. Falls zwei Modelle das gleiche geringste Fehlermaß besitzen wird dasjenige mit der geringsten Streuung gewählt. Im seltenen Fall, dass mehrere Modelle sowohl das gleiche geringste Fehlermaß als auch die gleiche Streuung besetzen, wird das zuerst gefundene Modell als bestes Modell markiert. Abschließend wird ein SQL-String erstellt und ausgeführt, welcher die Aufgabe hat alle Ergebnisse aus dem Data Mining Prozess in die Datenbank gemäß der Struktur des Produktmodells zu übertragen. Zudem wird auch das beste ermittelte Modell abgespeichert.

### 4.3 Der Data Mining Prozess

Aufgabe des Data Mining Prozesses ist es aus Fertigungs- und Simulationsdaten des Umformprozesses automatisch ein bestmögliches Vorhersagemodell für ein bestimmtes Bauteil und für eine vorgegebene Eigenschaft zu erstellen. Hierzu wurde ein 127 Operatoren umfassender Data Mining Prozess erstellt, welcher die gesamte Wissensakquisition ausführt. Dieser Prozess soll im nachfolgenden erklärt werden. Nach dem Auslesen der Daten aus der Datenbank werden zunächst alle numerischen Werte als solches markiert, die Ergebnisgröße wird als Zielfunktion festgelegt. Zudem werden alle Tupel mit fehlender Zielfunktion entfernt. Parameter die sich nicht ändern und dementsprechend eine Standardabweichung von null aufweisen werden ebenfalls entfernt. Um das geforderte, bestmögliche Vorhersageergebnis zu erhalten werden in dem Data Mining Prozess neben den Standardeinstellungen der vier Lernfunktionen - Lineare und Polynomiale Regression, Regellerner und Regressionsbäume - für jede Lernfunktion zusätzlich sowohl eine schrittweise als auch eine evolutionäre Parameteroptimierung durchgeführt. Als weitere Maßnahme wird versucht durch einen „Forward Selection“-Operator, bei der verbrauchte Parameter entfernt werden, das Ergebnis zusätzlich zu verbessern. Somit ergeben sich pro Lernfunktion insgesamt sechs verschiedene Modelle, so dass bei vier Lernfunktionen insgesamt 24 Modelle entstehen. Zu den Mo-

dellen wird per 10-facher Kreuzvalidierung das Fehlermaß ermittelt und Anschließend ein T-Test durchgeführt. Alle Ausgaben der Performances, Modelle und T-Tests werden abschließend in den jeweiligen Ausgabedateien abgespeichert. Nachfolgend ist eine vereinfachte Version der grafischen Darstellung des Data Mining Prozesses dargestellt, welcher nur mit einer anstatt vier Lernfunktionen ausgeführt ist (Bild 5).

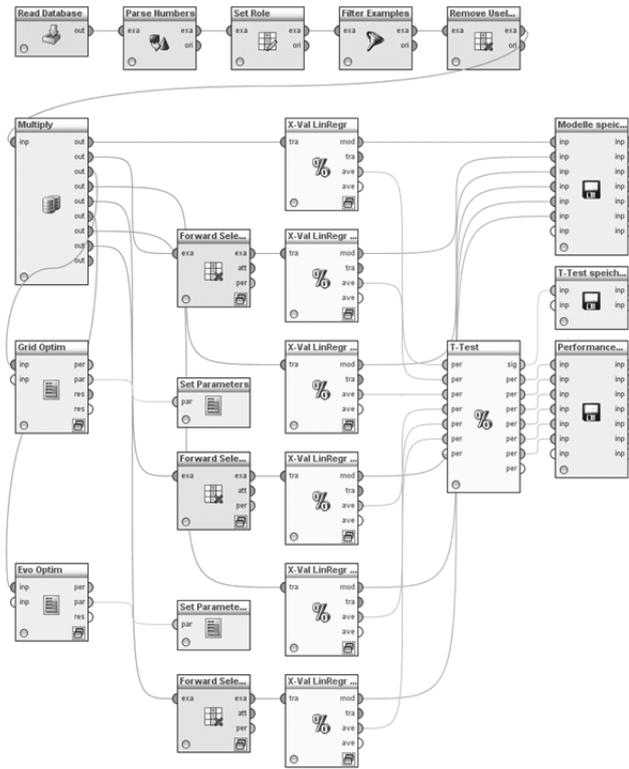


Bild 5: Darstellung eines vereinfachten Data Mining Prozesses mit nur einer Lernfunktion

## 5 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Methodik vorgestellt, wie der natürliche Problemlösungszyklus des Produktentwicklers mit Vorhersagemodellen unterstützt werden kann, die in einer automatischen Wissensakquisition per Data Mining erstellt und in einer Datenbank verwaltet werden können. Somit kann die Analyse der Produkteigenschaften beschleunigt und die Dauer einer Iterati -

---

onsschleife reduziert werden. Diese Methodik eignet sich besonders bei Änderungskonstruktionen, bei denen auf eine bestehende Datenbasis von Vorgängerprodukten zugegriffen werden kann.

Ein Vorhersagemodell beschreibt die Korrelation zwischen einer Eigenschaft und den zugrundeliegenden Merkmalen. Im Syntheseprozess wird allerdings vor allem die Korrelation zwischen einem Merkmal und den daraus resultierenden Eigenschaften benötigt. Daher steht die Ableitung der Sensitivitäten bzw. Korrelationen zwischen Merkmalen und Eigenschaften aus der Datenbasis aber auch vor allem aus den Vorhersagemodellen im aktuellen und zukünftigen Fokus der Arbeiten. Gelingt dies kann auf Basis der Vorhersagemodelle eine ganzheitliche Unterstützung der Synthese und Analyse in der Produktentwicklung geleistet werden.

## Danksagung

Die Autoren möchten an dieser Stelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danken, die den SFB Transregio 73 fördert.

## Literatur

- [1] Abramovici, M., Schindler, T.: "Product Lifecycle Management (PLM), in: "15. Newsletter Berliner Kreis", Paderborn, 2010.
- [2] Anderl, R., Trippner, D.: "STEP Standard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303", B. G. Teubner, Stuttgart, 2000.
- [3] Bartz, R.: "Association for Standardization of Automation and Measuring Systems", Hoehenkirchen, 2006.
- [4] Diaper, D.: "Knowledge elicitation. Principles, techniques and applications", New York, 1989.
- [5] Frick, D.: „Die Akquisition betriebswirtschaftlichen Wissens zum Aufbau von wissensbasierten Entscheidungsunterstützungssystemen“. Universität Duisburg, Dissertation, 1997.
- [6] ISO. DIN EN ISO 10303 AP 214 Standard for the exchange of product model data. 1985.

- 
- [7] Gerhard, D., Lutz, C.: "Rechnergestütztes Konfigurieren und Auslegen kundenindividueller Produkte, in: "15. Newsletter Berliner Kreis", Paderborn, 2010.
- [8] Miller, G.A., Galanter, E., Pribram, K.: „Plans and the structure of behaviour“, New York, 1960.
- [9] Röhner, S.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: „Anforderungen an die Wissensakquisitionskomponente eines selbstlernenden Assistenzsystems“, in: „8. Gemeinsames KT-Kolloquium“, Magdeburg, 2010.
- [10] Röhner, S.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: "Acquisition of Design-relevant Knowledge within the Development of Sheet-Bulk metal forming", in: "International Conference on Engineering Design", Kopenhagen, 2011.
- [11] Spur, G.; Krause, F.-L.: „Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik“, München, 1997.
- [12] Puppe, F.: „ Problemlösungsmethoden in Expertensystemen“, Berlin, 1990.
- [13] PROSTEP IVIP, E. V. Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung. Darmstadt. 2008.
- [14] Weber, C.: „CPM/PDD - An extended theoretical approach to modelling products and product development process“, in Proceedings of 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes, Fraunhofer-IRB-Verlag Berlin, 2005.
- [15] Witten, I.: "Data Mining – Practical Machine Learning Tools and Techniques", Burlington, 2011.

## Vereinheitlichung von Werkstoff- informationen auf Basis VDA 231-200

Andreas Janus<sup>1</sup>, Johannes Staeves<sup>1</sup>, Dieter Tartler<sup>1</sup> und  
Sandro Wartzack<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *BMW Group*

<sup>2</sup> *Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg*

Because exchanging material information between OEM`s and/or OEM and supplier becomes more and more important, the specification VDA 231-200 defines a standard structure for storing material information in PDM systems. This article analyses the difficulties by applying the specification in an existing PDM environment and gives an example how to overcome those. In addition to the challenge of creating a database to fit the requirements of VDA 231-200, the next step of combining the material information of different sources. In order to do so, an adequate and precise identification is needed. The shown way to standardize the material naming on the basis of the chemical composition was proven to work effectively.

### 1 Einleitung

Je komplexer Produkte und Anforderungen an Dokumentationen werden, umso mehr Informationen werden generiert. Eine unmittelbare Folge daraus ist, dass die Suche nach Informationen während der Produktentwicklung immer mehr Zeit in Anspruch nimmt. So gibt es Untersuchungen die belegen, dass bis zu 30 % der Arbeitszeit für die Suche nach Informationen aufgewendet werden. [6]

Alleine im Bereich der Werkstoffinformationen gibt es eine große Vielzahl an Informationen, die zu unterschiedlichen Zeiten im Produktlebenszyklus und in unterschiedlichen Fachbereichen eines Unternehmens benötigt werden. Bild 1 zeigt hier einen Ausschnitt dieser Informationen. Aufgrund der großen Bandbreite an Informationsarten und der Tatsache, dass fast alle Fachbereiche gewisse Informationen zu Werkstoffen benötigen, gibt es eine große Vielzahl von unterschiedlichen Quellen innerhalb und außerhalb eines Unternehmens.

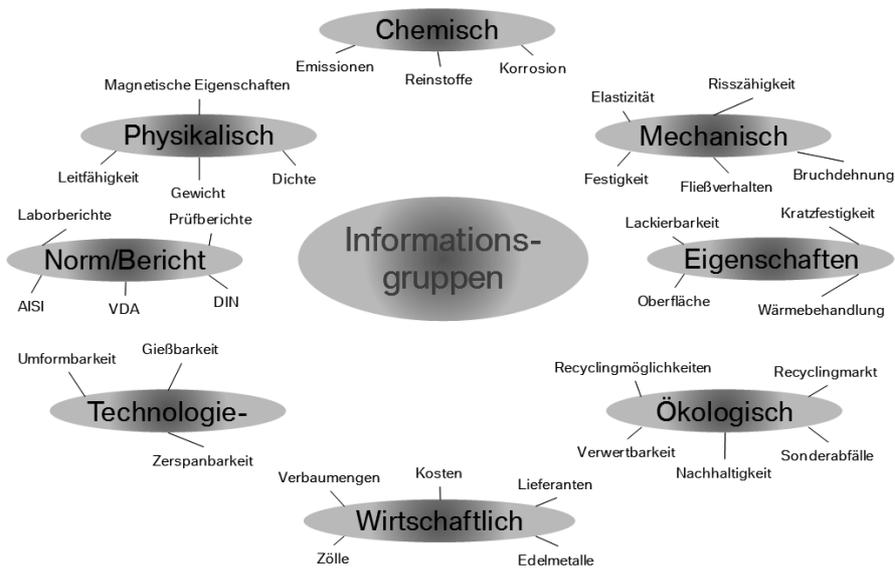


Bild 1: Informationsgruppen zu Werkstoffen (Auszug)

Die Kombination der unterschiedlichen Informationsquellen untereinander ist dabei oftmals schwierig, da die Werkstoffdatensätze bisher nicht flächendeckend standardisiert sind. Gerade die individuelle Datenhaltung in unterschiedlichen Unternehmen macht einen Austausch der Daten oftmals kompliziert.

## 2 Notwendigkeit der Standardisierung

Die Standardisierung der in einem Systemverbund verfügbaren Werkstoffdaten ist wesentliche Grundvoraussetzung für die einheitliche Zugänglichkeit. Dabei steht vor allem die Bezeichnung, oder genauer die Identifikato-

---

ren, der Werkstoffdatensätze im Fokus. Über diese können dann die unterschiedlichen Inhalte der Systeme im Systemverbund abgeglichen und zugänglich gemacht werden.

Die zwei wesentlichen Ursachen für die Notwendigkeit von kompletten Werkstoffinformationen sind die immer strenger und komplexer werdenden gesetzlichen Anforderungen und neue strategische Herausforderungen während des Produktlebenszyklus. [1]

## 2.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die gesetzlichen Anforderungen an die Automobilindustrie werden stetig strenger und komplexer. Der Bereich der Werkstoffe ist dabei genauso betroffen wie beispielsweise strengere Anforderungen zum Fußgängerschutz. Zum Nachweis der Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen sind detaillierte Dokumentationen notwendig.

Im Bereich der Europäischen Union sind hier vor allem zwei Gesetzesvorstöße von Bedeutung. Zum einen die Richtlinien 2000/53/EC und 2005/64/EC welche die geforderten Recycling- und Verwertungsquoten sowie das Verbot der Substanzen Chrom(VI), Cadmium, Blei und Quecksilber regeln. Zusätzlich kommt noch die Regelung zur Nutzung von Chemikalien (2006/1907/EC – REACH) dazu, welche zukünftig den Einsatz von Chemikalien regeln wird. Der große Unterschied zwischen den ersten beiden Richtlinien und der REACH Richtlinie ist, dass über REACH potentiell jede Substanz verboten werden kann. [2,3,4]

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist eine sehr genaue Kenntnis sämtlicher verwendeter Werkstoffe und deren Zusammensetzung erforderlich.

## 2.2 Neue Informationsbedarfe im Produktlebenszyklus

In der aktuellen Zeit wird die Automobilindustrie mit zwei neuen Herausforderungen konfrontiert, welche ein großes Umdenken erfordern und damit einen signifikanten Einfluss auf die Produkte der Zukunft haben.

- Gestiegenes Umweltbewusstsein: Faktoren wie der nachhaltige Umgang mit Ressourcen, eine umweltschonende Produktion und ein möglichst niedriger Kraftstoffverbrauch bzw. Kohlenstoffdioxidausstoß werden immer wichtiger für die Kunden.

- 
- Neue Mobilität in Ballungsräumen: Vor allem in den derzeitigen und zukünftigen Ballungsräumen („Megacities“) werden alternative Mobilitätskonzepte immer wichtiger. Dies betrifft sowohl die Antriebsarten (E-Mobilität) wie auch die Bereitstellung der Fahrzeuge („Car-Sharing“).

Im Zuge dieser beiden Herausforderungen für die Automobilindustrie ergeben sich neue Anforderungen an Informationen zu Werkstoffen. In beiden Fällen ist hier ein Abgleich zwischen unterschiedlichen Informationsquellen dringend erforderlich.

Bedingt durch das gestiegene Umweltbewusstsein beim Kunden und auch bei den Herstellern werden Informationen zum Einfluss des Produktes auf die Umwelt dringend benötigt. Um diese schon in der Produktentwicklung berücksichtigen zu können, werden die messbaren Kriterien, etwa CO<sub>2</sub>-Äquivalente, im Rahmen von Life-Cycle-Assessments („LCA“) erhoben und gemonitort. Zur Durchführung dieser LCA's werden genaue Werkstoffangaben über die gesamte Lieferkette benötigt, um ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen. Dabei wird eine Vielzahl von Informationen benötigt. Diese setzen sich aus bereits bekannten und einigen neuen zusammen.

Im Zuge des notwendigen Wandels der Mobilität in Ballungsräumen wird unter anderem die Elektromobilität immer wichtiger. Damit einher gehen einige neue Herausforderungen, auch im Werkstoffbereich. So werden innovative Leichtbaukonzepte, Batterie- und E-Motorentwicklung immer wichtiger. Um dabei erfolgreich zu sein, sind zahlreiche neue bzw. bisher in der Automobilindustrie weniger wichtige Werkstoffinformationen notwendig. Diese reichen von magnetischen Eigenschaften bis hin zu neuen Werkstoffen wie CFK.

### 2.3 Strategische Zusammenarbeiten

Getrieben durch die unterschiedlichen Herausforderungen und einem hohen Kostendruck wird das erfolgreiche Zusammenarbeiten mit Lieferanten und zwischen OEMs immer wichtiger.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Lieferanten im Rahmen der Produktentwicklung wie auch bei der reinen Lieferung von Serienteilen ist der Austausch von Werkstoffinformationen ein wichtiger Aspekt. Dabei muss aber zwischen verschiedenen Konstellationen der Zusammenarbeit unterschieden werden:

- Werkstoffverantwortung beim Lieferanten

- Werkstoffverantwortung beim Originalhersteller

Liegt die Werkstoffverantwortung beim Lieferanten, so wird dieser auch die bei ihm gängige Bezeichnung für die Werkstoffe verwenden. Diese kann von der zugrundeliegenden Norm oder den Anforderungen von PDM Systemen abhängen. Mit dem Ende der Entwicklung wird die Dokumentation an den Hersteller übergeben, dabei aber nicht an die jeweils anderen Anforderungen angepasst.

Bei einer Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Herstellern gibt es ähnliche Probleme, allerdings weniger stark ausgeprägt, wenn beide Parteien gleichberechtigt an einem Produkt oder Bauteil entwickeln.

Zum Austausch von Werkstoffdaten (vor allem der chemischen Zusammensetzung) wurde eine web-basierte Lösung entwickelt und wird mittlerweile branchenweit eingesetzt. Dabei handelt es sich um das IMDS (International Material Data System) [5]. Über das IMDS können sowohl Lieferanten und OEMs, als auch OEMs untereinander Materialdatenblätter zu Bauteilen austauschen, welche die Werkstoffangaben inklusive der chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe enthalten. Dabei kann aber jeder Ersteller eines Datenblattes seine individuellen Werkstoffbezeichnungen verwenden. Zur besseren Identifizierung wird jeder Werkstoff einer Werkstoffklasse nach VDA 231-106 [8] zugeordnet.

### 3 Standardisierung der Ablage von Werkstoffinformationen

Die aus den beschriebenen Ursachen entstehenden Anforderungen an eine einheitliche Speicherung von Werkstoffdaten in den PDM Systemen der einzelnen Unternehmen sind die Grundlage für die Erstellung der Spezifikation VDA 231-200 [7]. In dieser wird beschrieben wie Werkstoffinformationen in PDM Systemen abzulegen sind und welche Informationen für eine eindeutige Identifizierung eines Werkstoffes notwendig sind.

#### 3.1 Aufbau und Struktur VDA 231-200

Zur eindeutigen Identifizierung wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Identifikatoren definiert. Grundlage für eine saubere Definition eines Werkstoffeintrages ist hierbei eine zugrundelegende Regel. Dabei handelt es sich entweder um eine offizielle Norm (etwa EN, ISO, ...) oder unternehmensspezifische, verbindliche Beschreibung. Diese können interne Standards, Lieferbedingungen oder Materialkarten sein. Damit die Angaben zur verwendeten Regel eindeutig und vollständig erfolgt, ist diese über mehrere Identifikatoren

aufgeteilt (Nr. 2 bis 5 in Tabelle 1). Damit es auch möglich Werkstoffe zu unterschiedlichen Ständen eine bestimmten Norm eindeutig identifizierbar im System zu speichern. Die vollständige Angabe der Informationen zur verwendeten Regel ist erforderlich. Nur bei wenigen Ausnahmen kann auf die Angabe einer Regel verzichtet werden.

Die Kurzbezeichnung nach Regel (Nr. 6 in Tabelle 1) ist eine verpflichtende Angabe und zur Identifizierung notwendig. Die Angaben eines Merkmales nach Regel (Nr. 7 in Tabelle 1) oder zusätzlicher Angaben (Nr. 8 in Tabelle 1) können zur eindeutigen Identifizierung eines Werkstoffes notwendig sein. Diese Felder müssen also nur bei entsprechender Notwendigkeit, etwa wenn eine Norm eine bestimmte Beschichtung für einen Werkstoff vorschreibt, befüllt werden.

Tabelle 1: Identifikatoren nach VDA 231-200 [7]

Nr.	Benennung	Beschreibung
1	Identifikator	Datenbankschlüssel, variabel je nach benutzer Datenbank
2	Regel Art	Abkürzung der jeweiligen Art der Regel; beispielsweise DIN EN, GS, SAE
3	Regel Nummer	Nummer der zugrunde liegenden Regel
4	Gesetzlicher Eigentümer	Ersteller des Regeldokumentes, vor allem bei Unternehmensinternen Regelwerken wichtig
5	Ausgabedatum	Ausgabedatum der zugrunde liegenden Regel
6	Kurzbezeichnung	Die in der Regel definierte Kurzbezeichnung des Werkstoffes
7	Merkmale (nach Regel)	Evtl. zur Identifizierung notwendige weitere Merkmale wie in der zugrunde liegenden Regel definiert, beispielsweise Angaben zu Wärmebehandlungen oder Beschichtungen
8	Zusätzliche Angaben	Möglichkeit unternehmensspezifische zusätzliche Angaben zur Identifizierung des Werkstoffes anzugeben.

Zusätzlich zu den in Tabelle 1 aufgeführten Schlüsselfeldern wurden zahlreiche weitere Datenfelder, vor allem für die gängigsten Mechanischen und



---

Physikalischen Kennwerte, definiert. Da diese nicht für die Identifizierung notwendig sind, wird auf diese hier nicht weiter eingegangen.

### **3.2 Herausforderungen in der Umsetzung**

Die erste Herausforderung zur Umsetzung des Datenmodells der VDA 231-200 liegt in der Anpassung oder Schaffung einer entsprechenden Datenbank („Material Master“). Alle relevanten Systeme, welche Materialdaten speichern oder verwalten, müssen zur eindeutigen Identifizierung der Datensätze die Möglichkeit haben, ihre Inhalte mit dem Material Master abgleichen zu können. Dies kann über Schnittstellen geschehen, was allerdings nicht immer realisierbar und recht aufwändig ist. Ein zweiter Ansatz wäre, die gleiche Bezeichnungssystematik zu verwenden, so dass ein Abgleich über die Benennung und falls notwendig weiteren Schlüsselfeldern des Werkstoffes möglich ist.

Neben der Generierung des Material Master ist also die zweite große Herausforderung die Werkstoffinformationen der bestehenden Systeme so zugänglich und vergleichbar zu machen, dass eine konsistente Datenbasis für Werkstoffinformationen vorhanden ist.

## **4 Umsetzung in PDM Systemen**

### **4.1 Aufbau des Material Master für Werkstoffe**

Zum ersten Mal in der Automobilindustrie wurde eine bestehende Datenbank für das neue Datenmodell angepasst, welches in der VDA 231-200 definiert ist. Diese ist an sehr zentraler Stelle in die PDM Systemlandschaft implementiert und stellt die zentrale Datenquelle für Werkstoffe dar.

Das verwendete Datenmodell entspricht dabei dem in VDA 231-200 beschriebenen. Zusätzlich zur Datenbereitstellung von Werkstoffinformationen wurden noch unterschiedliche Prozessschritte in das entwickelte System integriert. So wurden etwa die Werkstofffreigabe und die Zuordnung von Werkstoffen zu Bauteilen in das System integriert. Die Benutzeroberfläche wurde über eine Webanwendung realisiert, was den administrativen Aufwand von Seiten der IT minimiert.

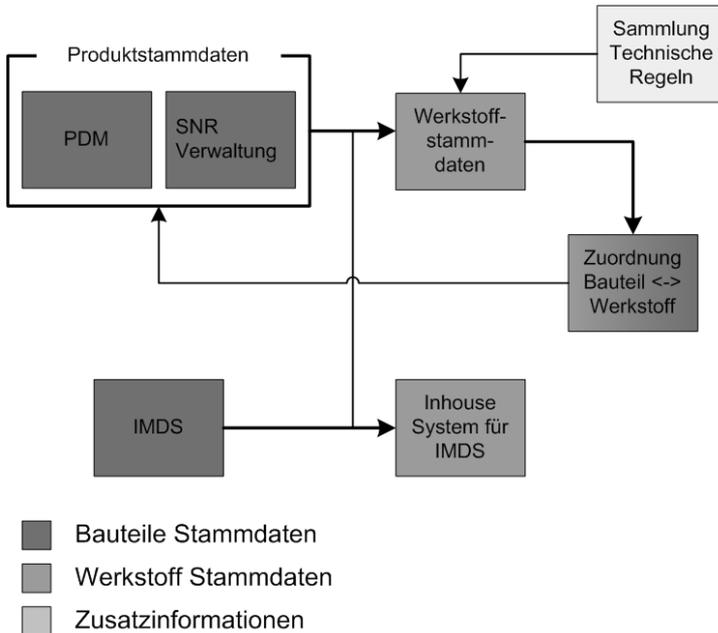


Bild 2: Ausschnitt aus der untersuchten Systemlandschaft zu Werkstoffinformationen

Dabei sind in dieser Datenbank nicht alle Informationen zu den jeweiligen Werkstoffen enthalten, sondern nur die im Datenmodell vorgesehenen. Dies entspricht den grundlegenden Mechanischen und Physikalischen Größen. Alle weiteren Informationen sind in den gewohnten Datenquellen zu finden. Ziel ist es jedoch, diese Datenquellen untereinander zu verbinden, so dass jedem registriertem Werkstoff der Masterdatenbank alle anderen Informationen zugeordnet werden können. Voraussetzung dafür ist, dass es eine Möglichkeit der eindeutigen Zuordnung gibt. Sofern keine online Schnittstelle zum Material Master vorhanden ist, ist eine Zuordnung über eine standardisierte Bezeichnung möglich. Diese muss über die Systeme hinweg sichergestellt sein.

#### 4.2 Standardisierung über chemische Zusammensetzung

Um Werkstoffeinträge aus bestehenden Datenquellen den entsprechenden Werkstoffeinträgen in der Masterdatenbank zuzuordnen, müssen diese eindeutig identifizierbar sein. Eine Möglichkeit ist, wie oben bereits beschrieben, die Verwendung einer einheitlichen Bezeichnungssystematik zwischen den Systemen. Eine rein manuelle Überarbeitung ist dabei nicht zielführend,

da die einzelnen Systeme ständigen Änderungen und Aktualisierungen unterworfen sind. Um diesem Umstand begegnen zu können, ist eine ständige, automatisierte Vorgehensweise erforderlich.

Da die Bezeichnungen standardisiert werden sollen, ist davon auszugehen, dass nicht alle aktuell in den Systemen verwendeten Bezeichnungen dem gewünschten Standard entsprechen. Daher kann die Standardisierung nicht einzige auf Basis dieser Bezeichnungen erfolgen. Eine mögliche Basis für die Standardisierung sind die Eigenschaften, welche einem Werkstoff in dem jeweiligen System zugeordnet sind.

Innerhalb der internen Produktdatensysteme konnte prototypisch die Durchführbarkeit einer solchen Standardisierung von Werkstoffbezeichnungen realisiert werden, welche hierbei auf der chemischen Zusammensetzung der Materialien basiert. Bei dem ausgewählten System handelt es sich um die Materialdatenbank (MDB), welche das unternehmensinterne System für die Daten des IMDS darstellt. Die Besonderheit an daran ist, dass über das IMDS mit den Werkstoffangaben von Lieferanten gearbeitet wird und somit die Datenbasis bezüglich der Werkstoffe in der MDB sehr umfangreich ist und ständig erweitert wird. Damit eignet sich dieses System sehr gut als Entwicklungsplattform für ein solches Vorhaben.

Dabei werden die zu standardisierenden Materialien anhand der Reinstoffe den bekannten Musterwerkstoffen („Master-Material“ in Bild 3) zugeordnet. Der Algorithmus geht dabei die einzelnen Reinstoffe in der Reihenfolge des Gewichtsanteils (absteigend) durch und prüft gegen die bekannten Musterwerkstoffe. Ab einer bestimmten prozentualen Übereinstimmung der Reinstoffe werden der oder die Musterwerkstoffe und der zu standardisierende als möglicherweise übereinstimmend vorgeschlagen. Die entsprechende Zuweisung findet dann über eine manuelle Bestätigung durch einen fachkundigen Nutzer statt.

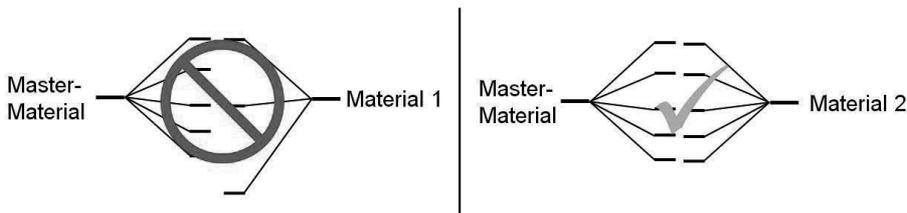


Bild 3: Zuordnung auf Basis der chemischen Zusammensetzung

Dieser Algorithmus generiert dabei keine neue Datenbank sondern ermöglicht die Gruppierung der vielen, von Lieferanten gelieferten, individuell bezeichneten Werkstoffdaten unter einem Musterwerkstoff („Master-Material“ in Bild 3). Diese Musterwerkstoffe sind anhand der Vorgaben des Material Master bezeichnet und können somit den dortigen Einträgen zugeordnet werden. Diese Zuordnung ermöglicht eine Integration aller verfügbaren Werkstoffinformationen (hier die chemische Zusammensetzung, auch der Lieferantwerkstoffe) in die restlichen PDM Systeme.

Im aktuellen Prototyp auf Basis von Microsoft Access wurde der Algorithmus auf Basis von zwei Fahrzeugstücklisten getestet. Dabei konnte die Anzahl der notwendigen Bezeichnungen zur Beschreibung der relevanten Materialien um den Faktor 4,5 reduziert werden (siehe Bild 4). Als relevante Materialien wurden alle Metallischen und Kunststoffwerkstoffe gesehen. Insgesamt konnten 4096 Werkstoffeinträge eindeutig zugeordnet werden (erster Balken in Bild 4), die Anzahl der dafür notwendigen Musterwerkstoffe beträgt 908.

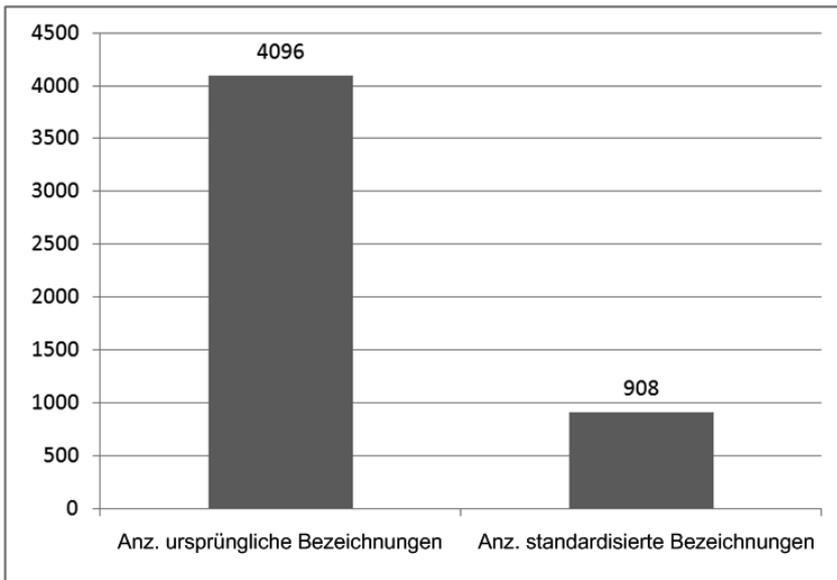


Bild 4: Reduzierung der notwendigen Bezeichnungen um den Faktor 4,5

Als nächster Schritt wird dieser noch sehr manuelle Prototyp direkt in das System implementiert. Dabei sollen sowohl die optimalen Parameter für eine fehlerfreie Zuordnung, wie auch die Möglichkeiten von weiterer Automatisierung geprüft werden. Hier wäre insbesondere die automatische Zuordnung



---

von zwei Werkstoffen mit 100 % Übereinstimmung (inkl. der Bezeichnung) denkbar.

## 5 Mögliche Anwendungen

Da über diese Standardisierung sowohl die Inhalte von unterschiedlichen Datenquellen, als auch redundante Daten innerhalb einer einzelnen vergleichbar werden, ergeben sich eine Vielzahl von möglichen Anwendungen.

Eine offensichtliche Möglichkeit ist die Durchführung von Auswertungen, die Informationen über mehrere Systemgrenzen hinweg benötigen. So können beispielsweise Informationen zur chemischen Zusammensetzung mit Informationen zu Herstellprozessen zu kombinieren. Dies wäre beispielsweise für die Erstellung von LCA's eine sehr hilfreiche Auswertung, da so für Werkstoffe Informationen über die mögliche Vorkette (über die chemische Zusammensetzung) mit der Verwendung im Herstellprozess kombiniert werden können.

Unternehmensübergreifend ist über diese Standardisierung die Kopplung von externen Informationen mit den internen PDM Systemen möglich. Dies erleichtert beispielsweise die Integration von Lieferanteninformationen oder die Zusammenarbeit bei Gemeinschaftsentwicklungen. Der große Vorteil wäre dabei, dass sowohl die Lieferanten, wie auch eventuelle Partner in Entwicklungsprojekten ihre jeweiligen internen Bezeichnungen beibehalten können. Da die Umsetzung der VDA 231-200 nicht vorgeschrieben ist, wird es auch zukünftig Lieferanten und/oder Partner geben, die ihre eigenen Systematiken zur Bezeichnung von Werkstoffen und zur Speicherung der entsprechenden Informationen verwenden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Spezifikation 231-200 wurde erfolgreich in einem ersten Unternehmen etabliert. Die dabei aufgetretenen Herausforderungen konnten erfolgreich bewältigt werden, wie etwa der Aufbau einer entsprechenden Datenbasis.

Im nächsten Schritt wurde versucht eine Möglichkeit zu finden, die weiteren Werkstoffinformationen des Unternehmens zugänglich zu machen. Über die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe wurde ein Algorithmus entwickelt und erfolgreich getestet. Damit ist eine Standardisierung der Werkstoffbezeichnungen realisierbar. Im nächsten Schritt ist zu prüfen, ob ein ähnlicher Algorithmus auch auf andere Eigenschaften eines Werkstoffes anwendbar ist. Hierfür wären die Identifikation möglicher Eigenschaften, die

---

jeweilige Datenqualität und die notwendigen Anpassungen des Algorithmus zu untersuchen.

Sobald eine solche Standardisierung vorhanden ist, wäre die Implementierung dieser in die PDM Umgebung notwendig um die Daten des Material Master mit den restlichen Systemen zu verbinden und so die verteilten Informationen einheitlich zugänglich zu machen.

## Literatur

- [1] Janus, A.; Wartzack, S. et al.: "The challenge of handling material information from different sources", ICED 11, Kopenhagen, 2011.
- [2] 2005/64/EC: "Directive 2005/64/EC of the European Parliament and of the Council of 26 October 2005 on the type-approval of motor vehicles with regard to their reusability, recyclability and recoverability", 2005.
- [3] 2000/53/EC: "Directive 2000/53/EC of the European Parliament and the Council of 18 September 2000 on end-of live vehicles", 2000.
- [4] 2006/1907/EC: "Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)", 2006.
- [5] International Material Data System: "<http://www.mdsystem.com/>", 2010.
- [6] Grabowski, H.; Geiger, K.: "Neue Wege zur Produktentwicklung", Dr. Josef Raabe Verlags GmbH, Stuttgart, 1997.
- [7] VDA: „VDA 231-200 Werkstoffdatensatz: Spezifikation von Werkstoffen und Oberflächen in IT-Systemen“, Berlin, 2010.
- [8] VDA: „VDA 231-106 Werkstoff-Klassifizierung im Kraftfahrzeugbau – Aufbau und Nomenklatur“, Berlin, 1997.

## **Ansatz zur Entwicklung seniorenrechter Mobilitätssysteme unter Berücksichtigung technischer und sozialer Anforderungen**

Johanna Schmidt<sup>1</sup>, Ines Karl<sup>2</sup>, Kristin Paetzold<sup>1</sup> und Berthold Färber<sup>2</sup>

*<sup>1</sup> Institut für Technische Produktentwicklung, <sup>2</sup> Institut für Arbeitswissenschaft Universität der Bundeswehr München*

Age-related limitations of cognitive, sensory or motor functions often restrict the mobility of elderly people. Technical devices are able to compensate for these limitations and can preserve the radius of mobility. But elderly people often do not accept technical devices to support them and hence do not use them. In order to design accepted products designers have to know the users' needs and their criteria for acceptance. The products must be adaptable to the various limitations that can influence mobility in older age and to the changing needs due to progressive age-related diseases. This paper suggests an approach for the inclusion of these aspects into the product development process for the development of products that support mobility.

### **1 Einleitung**

Häufig erschweren sensorische, motorische und kognitive Leistungseinschränkungen die Aufrechterhaltung der individuellen Mobilität und damit der Selbstständigkeit älterer Menschen. Moderne Technologien können dazu beitragen diese Leistungseinbußen zu kompensieren und den Mobilitätsradius Älterer zu erhalten. Um Menschen mit altersbedingten Leistungseinschränkungen wirksam unterstützen zu können, müssen die Produkte an die Einschränkungen des jeweiligen Nutzers angepasst werden. Dabei sollte ein

---

technisches System immer so viel Unterstützung wie nötig, aber so wenig wie möglich anbieten, um die vorhandenen Fähigkeiten des Nutzers weiter zu trainieren. So kann das System in einem ersten Schritt lediglich Hinweise oder leichte Hilfestellungen geben, die dem Nutzer das Alltagsleben erleichtern. Grundlage hierfür ist gutes Design im Sinne des Inclusive Design [1]. Ändern sich durch fortschreitende Krankheiten und damit einhergehenden zusätzlichen Leistungseinschränkungen die Bedürfnisse des Nutzers, muss das Produkt an diese Veränderungen angepasst werden. Dabei gilt es zunächst den Nutzer zu unterstützen und in einem letzten Schritt die verlorenen Fähigkeiten durch das technische System zu kompensieren.

Die technischen Möglichkeiten zu Training, Unterstützung und Kompensation bilden jedoch nur einen Aspekt, den es bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen gilt. Ebenso wichtig ist die Akzeptanz der potenziellen Nutzer für das Produkt. Gerade speziell für ältere Menschen entwickelte Produkte werden von diesen häufig abgelehnt, weil sie als stigmatisierend empfunden werden. Aber nur akzeptierte Produkte werden auch genutzt und bieten dem Nutzer so die nötige Unterstützung zur Aufrechterhaltung seiner Mobilität.

Ziel ist es daher bei der Entwicklung mobilitätsunterstützender technischer Systeme nicht nur die ingenieurmäßige Machbarkeit, sondern auch die nutzerzentrierte Akzeptanz näher zu betrachten und bereits im Entwicklungsprozess zu bewerten. Hierzu wird eine Bewertungsmethodik für die Technikakzeptanz Älterer entwickelt und systematisch in den Entwicklungsprozess integriert, so dass der Informationsfluss zwischen Entwicklern und älteren Nutzern verbessert wird.

## 2 Methoden

Sowohl aus den Ingenieurwissenschaften als auch aus der Psychologie sind Methoden bekannt, die die Entwicklung der oben beschriebenen Produkte unterstützen können. Diese betrachten aber immer nur einzelne Aspekte, greifen nicht ineinander und decken oft nur wenige Schritte im Entwicklungsprozess ab. Was bisher fehlt, ist die Zusammenführung dieser Methoden zu einer Vorgehensweise, die sowohl die technischen als auch die psychosozialen Anforderungen berücksichtigt. Um die Akzeptanz der Produkte durch die Nutzer zu steigern, müssen alle Phasen der Produktentwicklung methodisch abgedeckt und die Akzeptanz während des gesamten Entwicklungsprozesses immer wieder neu bewertet werden.

---

## 2.1 Berücksichtigung technischer Anforderungen

Aus technischer Sicht bildet eine detaillierte Beschreibung typischer Krankheitsbilder und den damit zusammenhängenden Leistungseinschränkungen und Fähigkeiten die Grundlage für die Anforderungsbeschreibung. Durch die Verknüpfung von Einschränkungen und Fähigkeiten mit technischen Lösungsmöglichkeiten zur Unterstützung erhält der Entwickler bereits erste Hinweise, welche Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen [2]. Für die Entwicklung eines Produktes, das den Bedürfnissen der Nutzer gerecht wird, ist dieses Vorgehen aber nicht ausreichend. Nur die gezielte Einbindung der Nutzer in den gesamten Entwicklungsprozess kann eine vollständige Anforderungsbeschreibung liefern. Die Lösungsmöglichkeiten helfen jedoch bei der Ideenfindung für ein neues Produkt und erleichtern so die Nutzerintegration in den frühen Phasen der Produktentwicklung, da den Nutzern bereits Ideen präsentiert werden können.

Ein Problem bei der Entwicklung von Produkten für Menschen mit Leistungseinschränkungen ist die große Variabilität der Einschränkungen. Leistungseinschränkungen aufgrund von Alter oder Krankheiten können die Mobilität verschiedener Menschen in vollkommen unterschiedlicher Weise beeinträchtigen. Zum einen kann eine objektiv gleichstarke Einschränkung als unterschiedlich stark empfunden werden. Zum anderen sind ältere Menschen häufig von mehreren Krankheiten betroffen, wodurch sich die Einflüsse der verschiedenen Krankheiten und des Alters addieren. Damit ergeben sich auch unterschiedliche Anforderungen an die Produkte zur Aufrechterhaltung der Mobilität, was variantenreiche und an die unterschiedlichen Bedürfnisse der verschiedenen Nutzer anpassbare Produkte erfordert. Zusätzlich dazu verlaufen alterstypische Krankheiten häufig progressiv, das heißt die Ausprägung einer Einschränkung nimmt mit der Zeit zu, bzw. ändert sich. Dadurch können sich auch die Anforderungen eines einzelnen Nutzers an ein Produkt über die Dauer der Nutzung verändern.

Diesen unterschiedlichen und sich ändernden Anforderungen der Nutzer gilt es in der Produktentwicklung gerecht zu werden. Um ein Produkt anbieten zu können, das den Bedürfnissen der Nutzer entspricht, aber dennoch bezahlbar ist, muss es so variabel gestaltet werden, dass es an die Anforderungen anpassbar ist. Eine Möglichkeit zur Anpassung an Leistungseinschränkungen bei unterschiedlichen Personen oder an verschiedene Stadien der Einschränkung bei einer Person ist die modulare Gestaltung des Produktes. Wenn einzelnen Modulen bestimmte Funktionen zugeordnet werden und diese austauschbar und durch andere ersetzbar sind, kann die geforderte hohe Varianz realisiert werden. Dabei können Module durch andere ersetzt werden,

---

die die gleiche Funktion erfüllen, aber auf eine andere Art und Weise, so dass dem Nutzer die für ihn beste Lösung angeboten werden kann. Es können aber auch Module hinzugefügt oder weggelassen werden, um den Funktionsumfang des Produktes zu erweitern oder einzuschränken. Die bekannten Ansätze zur Modularisierung (z.B. [3], [4]) müssen dazu so erweitert werden, dass die Anpassung sowohl zu Beginn als auch während der Nutzung möglich wird. Darüber hinaus gilt es aber auch, die einzelnen Module selbst variabel zu gestalten, so dass die Anpassung in gewissen Bereichen erfolgen kann, ohne die Module auszutauschen.

Für eine Benutzerschnittstelle kann dies beispielsweise bedeuten, dass die Ausgabe der Informationen optisch, über eine Anzeige erfolgt. Lässt die Sehfähigkeit des Nutzers nach, kann zunächst die Schriftgröße angepasst werden und dann die Anzeige so vereinfacht werden, dass die wesentlichen Informationen trotz starker Einschränkungen weiterhin erkannt werden. Reicht die Sehkraft des Nutzers nicht mehr aus, um die Informationen auf der optischen Anzeige erkennen zu können, wird das Modul ausgetauscht und beispielsweise durch ein akustisches Ausgabemodul ersetzt.

## 2.2 Berücksichtigung psycho-sozialer Anforderungen

Um seniorengerechte Produkte effektiv entwickeln zu können, reicht, wie bereits erwähnt, eine Fokussierung auf objektive Leistungseinschränkungen allein nicht aus. Vielmehr ist es von essenziellem Interesse, auch wichtige Akzeptanzdeterminanten systematisch im Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen. Aktuell ist jedoch wenig darüber bekannt, von welchen Determinanten die Technikakzeptanz Älterer bestimmt wird. In den letzten 20 Jahren beschäftigte sich v.a. die Wirtschaftsinformatik intensiv mit der Akzeptanz neuer Informationstechnologien. Zur Erfassung der Technikakzeptanz wurde eine Reihe von Akzeptanzmodellen entwickelt (vgl. [5], [6]). Die wichtigsten Einflussfaktoren verschiedener Akzeptanzmodelle wurden von [7] in der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) zu einem Gesamtmodell integriert. Entsprechend diesem Modell wird Akzeptanz als die Nutzung der neuen Technologie definiert. Die UTAUT bildet den Ausgangspunkt für die Erhebung der Technikakzeptanz Älterer. Da sie jedoch an gesunden, jungen Menschen sowie im Arbeitskontext untersucht wurde, kann sie nicht ohne weiteres auf Ältere übertragen werden. Die Vielfalt an sensorischen, motorischen und kognitiven Leistungseinschränkungen wird bei den bisherigen Modellen außer Acht gelassen. Daher wird die UTAUT um weitere Faktoren ergänzt, die darüber entscheiden, ob ein technisches Produkt akzeptiert und genutzt wird. So spielen z.B. der persönliche Gesundheitszustand, die Erhaltung der eigenen Unabhängigkeit sowie weitere sozio-kulturelle Be-

---

dingungen bei Älteren eine große Rolle, wenn es um die Nutzung technischer Geräte geht (vgl. [8], [9], [10]). Um die einzelnen Akzeptanzdeterminanten systematisch und unter Ausschluss von Störvariablen erfassen zu können, wird basierend auf dem Akzeptanzmodell ein standardisierter Fragebogen entwickelt. Neben diesem Akzeptanzfragebogen müssen die Nutzer jedoch noch durch weitere Methoden systematisch in den Produktentwicklungsprozess integriert werden.

Einen Ansatz zur nutzergerechten Produktgestaltung der „Generation Plus“ beschreibt [11]. In seiner Arbeit liegt der Fokus auf den verschiedenen Methoden zur Nutzerintegration. Eine Kopplung mit dem Produktentwicklungsprozess nimmt er jedoch nicht vor. Im Rahmen des Forschungsprojekts „sentha“ wird ebenfalls auf die Integration der Nutzer bei der Entwicklung seniorengerechter Technik im häuslichen Alltag eingegangen [12]. Allerdings bleibt auch hier unklar, wie die nutzerbezogene Herangehensweise gezielt in den Produktentwicklungsprozess eingebunden werden kann.

Die beschriebenen Ansätze liefern bereits erste Anhaltspunkte, wie ältere Nutzer bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden können. Jedoch steht die systematische Einbindung von Methoden der Nutzerintegration in etablierte Modelle des Produktentwicklungsprozesses noch aus. Zudem wird bei all diesen Methoden der Akzeptanzaspekt zu wenig berücksichtigt. Daher müssen diese gegebenenfalls überarbeitet und ergänzt werden.

### 3 Zusammenführung der Methoden

Um die oben beschriebenen Methoden für den Produktentwickler nutzbar zu machen, müssen sie ihm in geeigneter Weise zur Verfügung stehen. Dazu werden sie in das FORFLOW-Prozessmodell (FFPM) [13] integriert. Damit wird ein ganzheitliches Modell für die Entwicklung akzeptierter technischer Systeme zur Mobilitätsunterstützung älterer Menschen erreicht. Dieser Entwicklungsansatz berücksichtigt die Spezifik des Nutzers, die sich in der Gestaltung der Produktstruktur widerspiegelt, indem der Nutzer verstärkt in den gesamten Entwicklungsprozess eingebunden wird. Dadurch sollen zum einen Produkte entwickelt werden können, die den Anforderungen des Nutzers bestmöglich entsprechen, zum anderen aber auch von ihm akzeptiert und genutzt werden. Die einzelnen Faktoren, die in ein ganzheitliches Prozessmodell integriert werden, sind in Bild 1 dargestellt.

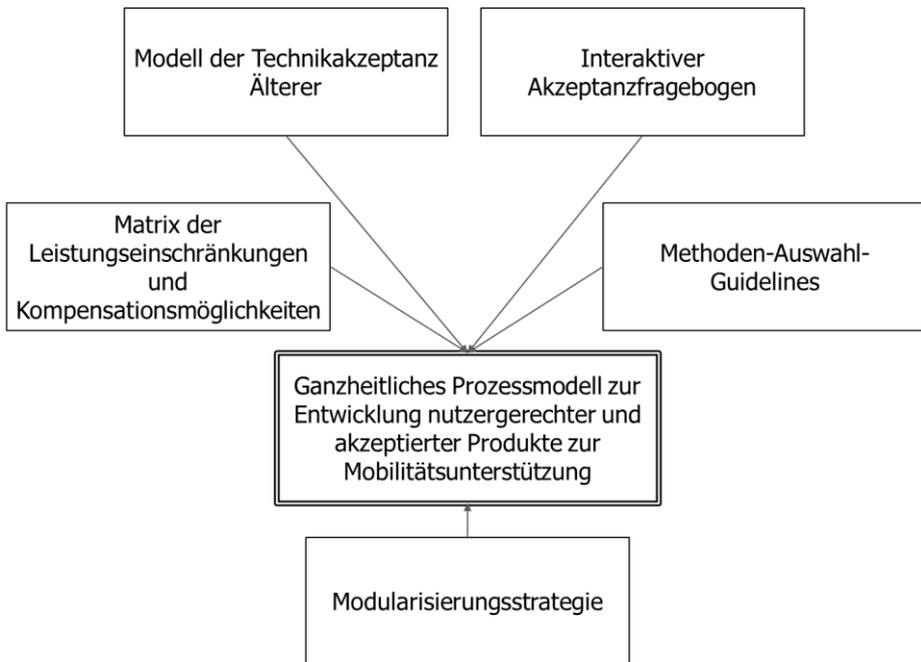


Bild 1: Faktoren eines ganzheitlichen Prozessmodells

Die psycho-sozialen Aspekte werden mittels des Akzeptanzfragebogens in den Produktentwicklungsprozess integriert. Durch den Akzeptanzfragebogen erhält der Entwickler spezifische Nutzeranforderungen. Diese sind einerseits die Voraussetzung für eine spätere Akzeptanz der Produkte, andererseits müssen sie in technische Anforderungen übertragen werden, um so die geforderten Funktionen des Produktes zu beschreiben. Da die Bewertung der Akzeptanz eines Produktes stark davon abhängt, ob die befragten Nutzer das richtige Verständnis von der Produktidee haben, ist es nicht ausreichend, die Nutzer nur zu Beginn der Entwicklung einzubeziehen. Die Akzeptanz muss über den gesamten Entwicklungsprozess immer wieder neu erfasst werden, um am Ende die Akzeptanz des Produktes gewährleisten zu können. Nur wenn die Nutzer in den gesamten Prozess integriert sind, können „Fehlentwicklungen“ vermieden werden. Mit dem Akzeptanzfragebogen werden somit zwei Aspekte abgedeckt. Einerseits kann der von den Nutzern geforderte Funktionsumfang ermittelt, andererseits die Akzeptanz der geplanten Funktionen bestimmt werden.

---

Zur Auswahl geeigneter Methoden zur Nutzerintegration werden sogenannte Methoden-Auswahl-Guidelines an das FFPM angegliedert. Dabei werden besonders folgende Punkte berücksichtigt:

- Zeitpunkt der Nutzerintegration
- technische Realisierung des Produktes
- Nutzungskontext
- Fragestellung
- Leistungseinschränkungen der Nutzer
- Gütekriterien der Methoden
- Stichprobenzusammensetzung / -größe
- Durchführungspraktiken der Methoden

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen helfen die Guidelines dem Entwickler schnell und praktikabel die best practice Methode zu finden. Der Zeitpunkt der Nutzerintegration wird hierbei durch die Angliederung an das FFPM realisiert. Der Entwickler bekommt so zum jeweiligen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess die notwendige Hilfestellung, um aus der Vielzahl der Methoden zur Nutzerintegration die geeignete auswählen zu können.

Von Seiten der Produktentwicklung liefert das FORFLOW-Prozessmodell die grundsätzliche Vorgehensweise. Zusätzlich muss eine Methode zur Modularisierung integriert werden, die die oben beschriebene Besonderheit der Anpassung an den Nutzer vor und während der Nutzung ermöglicht.

Zur ganzheitlichen Betrachtung des Produktentwicklungsprozesses müssen die Methoden aber nicht nur in das Prozessmodell integriert, sondern auch miteinander verbunden werden. Die Erkenntnisse, die durch die Integration der Nutzer gewonnen werden, beeinflussen z.B. die Modulbildung. Andererseits müssen die geplanten Module und die damit einhergehende Variantenvielfalt für die Nutzer auf ihre Akzeptanz hin überprüft werden. Die geeignete Methode hierfür hängt wiederum von den vorhandenen Daten der einzelnen Module ab, die sehr unterschiedlich sein können. Der zur Verfügung stehende Stand der Daten beeinflusst vor allem die möglichen Darstellungs-

---

formen für die Nutzerintegration, was sich wiederum in der Auswahl der geeigneten Methode widerspiegelt.

## 4 Zusammenfassung

Um seniorengerechte Produkte entwickeln zu können, gilt es sowohl die technischen Anforderungen, die sich aus den Leistungseinschränkungen ableiten lassen, als auch die psycho-sozialen Anforderungen, die sich aus der Lebenssituation der Nutzer ergeben, zu erfüllen. Um beide Aspekte berücksichtigen zu können, müssen Ingenieure eng mit Experten aus sozialwissenschaftlichen Disziplinen und vor allem mit den Nutzern zusammenarbeiten. Andernfalls werden wichtige Anforderungen, die für die Akzeptanz der Produkte entscheidend sind, nicht berücksichtigt und die Produkte gegebenenfalls, trotz ihrer technischen Möglichkeiten, nicht von den Nutzern verwendet. Das hier beschriebene Vorgehen soll den Entwickler zum einen dahingehend unterstützen, dass er an den entscheidenden Stellen im Entwicklungsprozess darauf hingewiesen wird, dass eben diese Zusammenarbeit hier notwendig ist und zum anderen bei der Auswahl der jeweils geeignetsten Methode helfen.

---

## Literatur

- [1] Clarkson, J. et al.: "Inclusive design. Design for the whole population" Springer-Verlag, London, 2003
- [2] „FitForAge - Forschungsverbund der Bayerischen Forschungstiftung" Abschlussbericht, Erlangen-Nürnberg, München, Regensburg, Würzburg, 2011
- [3] Erixon, G.: "Modular Function Deployment (MFD), Support for Good Product Structure Creation" In: 2nd WDK Workshop on Product Structuring. Delft, 1994
- [4] Pimmler, T.U. & Eppinger, S.D.: "Integration Analysis of Product Decompositions" In Proceedings of the ASME Design Theory and Methodology Conference. Minneapolis, MN, 1994
- [5] Davis, F. D.: "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology", MIS Quarterly, 13 (3), 319-340, 1989
- [6] Venkatesh, V. & Davis, F. D.: "A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies", Management Science, 46 (2), 186-204, 2000
- [7] Venkatesh, V. et al.: "User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View", MIS Quarterly, 27 (3), 425-478, 2003
- [8] Mollenkopf, H., Meyer, S., Schulze, E., Wurm, S. & Friesdorf, W.: "Technik im Haushalt zur Unterstützung einer selbstbestimmten Lebensführung im Alter. Das Forschungsprojekt "sentha" und erste Ergebnisse des Sozialwissenschaftlichen Teilprojekts". Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie, 33 (3), 155-168, 2000
- [9] Forlizzi, J., DiSalvo, C. & Gemperle, F.: "Assistive Robotics and an Ecology of Elders Living Independently in Their Homes". Human-Computer Interaction, 19, 25-59, 2004
- [10] Wilkowska, W. & Ziefle, M.: "Which Factors Form Older Adults' Acceptance of Mobile Information and Communication Technologies?" In A. Holzinger & K. Miesenberger (Hrsg.): HCI and Mobility for e-Inclusion (S. 81-101), Berlin, Heidelberg: Springer, 2009

- 
- [11] Glende, S.: "Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung – mit Fokus auf die "Generation Plus", Berlin: Dissertation an der TU Berlin, 2010
  - [12] Friesdorf, W. & Heine, A.: "sentha – seniorenerechte Technik im häuslichen Alltag. Ein Forschungsbericht mit integriertem Roman", Berlin, Heidelberg: Springer, 2007
  - [13] Krehmer, H. et al.: "Coping with multidisciplinary product development - a process model approach" In: Proceedings of the 16th International Conference of Engineering Design (ICED 09). August 24-27,2009, Stanford University, Stanford, CA, USA

## **Design for Value Chain – Handlungsfelder zur ganzheitlichen Komplexitätsbeherrschung**

Max Brosch, Gregor Beckmann und Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

Marc Griesbach und Jörg Dalhöfer  
*Supply Chain and Complexity Management  
Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck*

Due to different trends, companies are facing new challenges. One challenge is the handling of complexity in the global value chain and the distribution of goods. This paper describes a methodology to link these company-specific complexities to generic areas of action and addresses the need to expand the understanding of the product. By this linkage company-specific packages of measures in the field of complexity management can be identified.

### **1 Motivation und Einleitung**

Entwicklungstrends, wie die Globalisierung des Wettbewerbs, dynamische Anforderungen sowie kürzere Produktlebenszyklen, stellen Unternehmen vor neue, sich ständig verändernde Herausforderungen. Diesen Trends wird häufig mit der Entwicklung von kundenindividuellen Produktvarianten begegnet, die folglich intern zu erhöhter Komplexität sowohl auf der Produktebene als auch auf der Ebene der Value und Supply Chain führen (Bild 1). Um die vielfältigen und dynamischen Anforderungen der weltweiten Märkte, Länder und

Kunden bedienen zu können, müssen die Unternehmen sich mit der Fragestellung auseinandersetzen, wie aus der derzeitigen Komplexität innerhalb der globalen Wertschöpfung und Warenverteilung Lehren für die Reduzierung, Beherrschung und Vermeidung von Komplexität bei Produktneuentwicklungen gezogen werden können. Eine Analyse unterschiedlicher Ansätze und Methoden des Komplexitätsmanagements hat jedoch ergeben, dass sich bestehende Methoden auf die Ebene der Produkte oder die der Value und Supply Chain Prozesse konzentrieren. Ein ganzheitliches Komplexitätsmanagement unter Berücksichtigung beider Ebenen steht bisher nicht im Fokus.

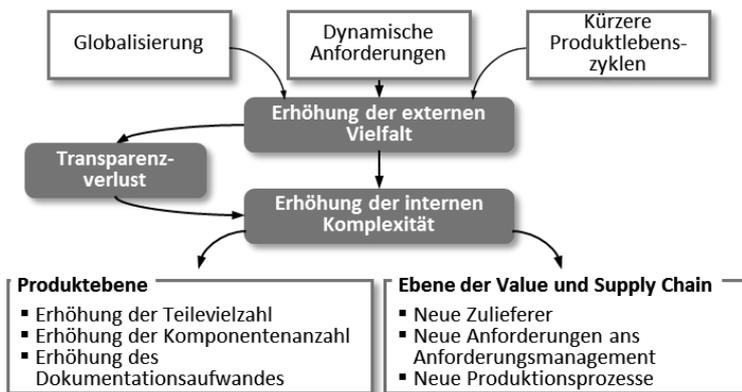


Bild 1: Ursachen und Auswirkungen der Produktvielfalt

Das Ziel des Design for Value Chain ist es daher, die unterschiedlichen Handlungsfelder eines ganzheitlichen Komplexitätsmanagements und ihre Wechselwirkungen zueinander zu identifizieren. Diese Handlungsfelder sollen dann methodisch in den Produktentwicklungsprozess eingebettet werden, um die Anforderungen der Wertschöpfungskette bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Zukünftig sollen dadurch Produktstrukturen geschaffen werden, die optimal auf die jeweils geeignete Strategie der Auftragsabwicklung abgestimmt sind. Hierbei stehen die folgenden Fragen im Vordergrund:

- Welche Komplexität existiert in der globalen Wertschöpfung und Warenverteilung und wodurch wird diese getrieben?
- Welche Handlungsfelder müssen im Rahmen eines ganzheitlichen Komplexitätsmanagements berücksichtigt werden?

---

## 2 Stand der Wissenschaft

Im Folgenden wird die Begrifflichkeit der Komplexität näher erläutert und unterschiedliche Handlungsfelder eines ganzheitlichen Komplexitätsmanagement vorgestellt.

### 2.1 Komplexität

Der Begriff der Komplexität ist in der heutigen Zeit ein häufig benutztes Schlagwort [1], welches sowohl in der Literatur als auch im Alltag oftmals verwendet wird, ohne seine Bedeutung zu reflektieren oder zu definieren [2]. Um den Begriff der Komplexität und die Bedeutung des Phänomens eindeutiger wiedergeben zu können ist eine Unterscheidung der Komplexitätssichten in konstruktive Eigenschaften, Erscheinungsformen, Bezugsobjekte und Wirkung der Komplexität nötig. Bei der Sicht der konstruktiven Eigenschaften baut die Definition auf den Eigenschaften der Vielzahl und der Vielfalt von Systemelementen, den Beziehungen zwischen diesen Elementen sowie der Veränderlichkeit der Elemente und Beziehungen auf [3]. Verschiedene Autoren definieren Komplexität als die Fähigkeit eines Systems eine Vielzahl an unterschiedlichen Zuständen annehmen zu können [3, 4]. Bei der Sicht der Erscheinungsform wird zwischen der objektiven Form der Komplexität, die auf die Menge und Heterogenität an Elementen des Systems sowie deren Interdependenzen und Veränderlichkeit zurückzuführen sind, und der subjektiven Komplexität, welche die von Personen wahrgenommene Komplexität widerspiegelt, die mit dem System interagieren, unterschieden [5, 6]. Bei der Sicht der Bezugsobjekte ist die Komplexität abhängig von der Gliederungstiefe der Betrachtung [7] und bei der Sicht der Wirkung wird die betriebswirtschaftliche Relevanz der Komplexität betrachtet [5]. Komplexität hat allerdings immer auch einen positiven Aspekt und entsprechende Chancen, wenn dadurch Alleinstellungsmerkmale generiert werden können. Komplexität ist daher, entgegen des populären Verständnisses, nicht ausschließlich negativ belegt [8]. In der Industrie wird Komplexität als ein Treiber für Probleme gesehen, welche zu zusätzlichen Anstrengungen, einer hohen Zahl von Korrekturen und zu einem erhöhten Risiko von Ausfällen in der Produktion führen [1].

Zusammenfassend kann Komplexität daher als eine konstruktive Eigenschaft verstanden werden, welche sowohl eine objektive als auch eine subjektive Erscheinungsform hat. Diese Komplexität ist der Grund für zusätzliche Anstrengungen, den Einsatz von zusätzlichen Ressourcen und einen erhöhten Informationsbedarf in global agierenden Unternehmen.

## 2.2 Handlungsfelder des Komplexitätsmanagements

Zur Beherrschung der Komplexität konnten in der Literatur verschiedene Handlungsfelder identifiziert werden (Tabelle 1). Eine Analyse der Handlungsfelder hat jedoch ergeben, dass sich jedes dieser Handlungsfelder lediglich mit einem bestimmten Aspekt der Komplexität beschäftigt.

Tabelle 1: Auszug unterschiedlicher Handlungsfelder des Komplexitätsmanagements

Design for Supply Chain [9, 10]	Optimierung der Produktstruktur für eine effiziente Auftragsabwicklung
Design of Supply Chain [11]	Optimierung der Gestaltung von Logistiknetzwerken und –prozessen
Anforderungsmanagement [12]	Aufnahme, Priorisierung und Dokumentation aller erforderlichen Anforderungen
Variantenmanagement [10, 13–16]	Reduzierung, Vermeidung und Beherrschung der internen Komplexität
Supply Chain Management [17]	Koordinierung der Zusammenarbeit aller an der Auftragsabwicklung beteiligten Organisationseinheiten
Produktprogrammplanung [18]	Marktorientierte und variantengerechte Strukturierung der Gesamtheit der zukünftig angebotenen Produkte
Auswahl der Sourcing Strategie [19]	Auswahl der zuzukaufenden Produkte, Module, Baugruppen, Komponenten oder Dienstleistungen
Wissensmanagement [20]	Systematische Identifikation, Erwerb, Bewahrung, Verteilung, Nutzung und Entwicklung von Wissen
Ideenmanagement [21]	Gezielte Aufnahme, Auswertung und Nutzung von Verbesserungsvorschlägen der Mitarbeiter
Klären der Unternehmensziele und –strategien [22]	Definieren und Kommunizieren der Unternehmensziele, um das globale Denken und Handeln zu fördern
Gezielte Produkteinführung [23]	Optimierung der Gestaltung des Serienanlaufes, sowie des Launchprozesses
Auswahl der Wettbewerbsstrategie [24]	Produktspezifische Auswahl der geeigneten Wettbewerbsstrategie (z.B. Kostenführerschaft)
Auswahl der Absatzpreis- und Marketingstrategie [14]	Produktspezifische Auswahl und Klärung der Vermarktungsstrategie, der Absatzmärkte und -preise
Anpassen des Rechnungswesen an Unternehmensziele [25]	Festlegung von internen Verrechnungspreisen zur Unterstützung einer ganzheitlichen Optimierung
Personalentwicklung (Anreizsysteme) [26]	Sensibilisierung der Mitarbeiter für die Unternehmensziele (Anreizsysteme, Mitarbeiterschulung)
Prozessoptimierung [11]	Gestaltung der unternehmensinternen Prozesse zur effizienten Auftragsabwicklung

Zur ganzheitlichen Komplexitätsbeherrschung ist daher die Zuordnung der unternehmensspezifischen Komplexität zu den in der Literatur und Praxis gängigen Handlungsfeldern der Komplexitätsbeherrschung nötig, um ein angepasstes Maßnahmenpaket abzuleiten (Kapitel 3).

### 3 Methodisches Vorgehen zur Verknüpfung von unternehmensspezifischen Komplexitätstreibern und generischen Handlungsfeldern

Zur methodischen Verknüpfung von unternehmensspezifischen Komplexitätstreibern und generischen Handlungsfeldern wird strukturiert in drei Schritten vorgegangen (Bild 2). Im ersten Schritt erfolgt eine Aufnahme und Analyse der Prozesse der Auftragsabwicklung. Auf dieser Basis können im zweiten Schritt die Komplexität in den Prozessen und deren Entstehungsgründe, die im weiteren als Komplexitätstreiber bezeichnet werden, identifiziert und visualisiert werden. Im dritten Schritt werden die identifizierten Komplexitätstreiber der untersuchten Unternehmensprozesse den allgemeinen Handlungsfeldern des Komplexitätsmanagements (Kapitel 2.2) zugeordnet. Die Verknüpfung bekannter Handlungsfelder des Komplexitätsmanagements mit der Komplexitätssituation im Unternehmen erlaubt es abschließend, ein an das Unternehmen angepasstes Maßnahmenpaket zur Reduzierung, Vermeidung und Beherrschung der Komplexität abzuleiten.

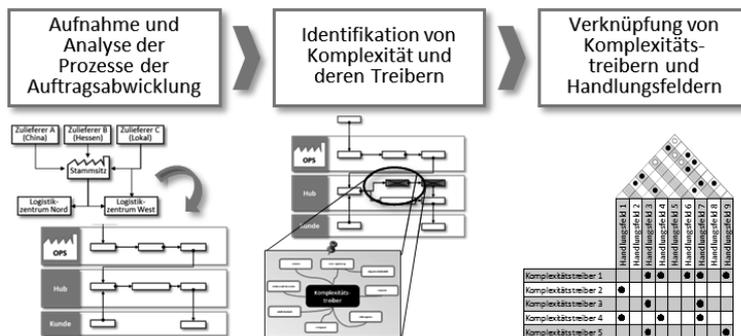


Bild 2: Vorgehen zur Verknüpfung von unternehmensspezifischen Komplexitätstreibern und generischen Handlungsfeldern

#### 3.1 Aufnahme und Analyse der Prozesse der Auftragsabwicklung

Die Aufnahme und Analyse der Prozesse kann sowohl durch die Einsicht bestehender Dokumente, Interviewgespräche mit Experten als auch durch die Beobachtung der Prozesse erfolgen. Der zu wählende Detaillierungsgrad der

Prozessaufnahmen hängt von den Rahmenbedingungen und der generellen Zielsetzung der Modellierung ab. Er muss zur Ermittlung von Komplexitätstreibern in der Auftragsabwicklung, so gewählt werden, dass einerseits die Komplexität erkannt werden kann, andererseits der Gesamtüberblick erhalten bleibt und der Aufwand zur Aufnahme in Relation zum Nutzen steht. In der Anwendung hat sich bisher jedoch eine Detaillierung bewährt, die beispielsweise den Prozessschritt *Platine montieren* enthält, jedoch nicht die Teilschritte wie *Platine einlegen*, *Schraube A anziehen*.

Die Anwendung des Vorgehens macht deutlich, dass die Prozesse sowohl global als auch lokal betrachtet werden müssen. Zur Verdeutlichung der globalen Warenverteilungswege eines weltweit agierenden Unternehmens bietet sich eine strukturelle Supply Chain Darstellung an. Diese bietet einen schnellen Überblick über die vorhandenen Supply Chain Stationen, deren Anzahl und geografische Lage sowie der vorhandenen Warenströme [27]. Auf diesem Detaillierungsgrad können jedoch keine, von Komplexität betroffenen, Prozesse der Wertschöpfungskette abgebildet werden. Aus diesem Grund werden die lokalen Prozesse der Value und Supply Chain Stationen mithilfe einer Swimlane-Darstellung visualisiert (Bild 3) [10].

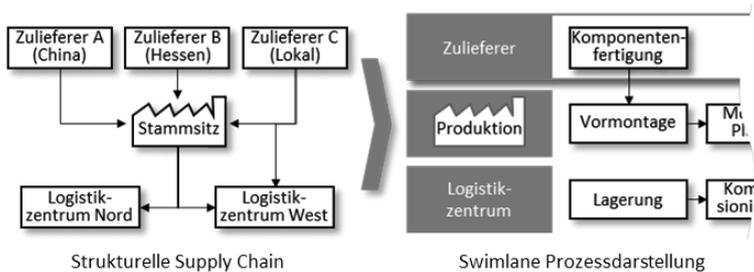


Bild 3: Strukturelle Supply Chain und Swimlane-Prozess-Diagramm

Die Aufnahme und Visualisierung der Prozesse in Swimlane-Diagramm wird anhand eines repräsentativen Produktbeispiels durchgeführt (siehe Kapitel 4). Aufgenommen werden die Prozesse, die für die Value und Supply Chain Station zum jetzigen Zeitpunkt vorgesehen sind und in dieser Arbeit als Soll-Ist-Prozesse bezeichnet werden. Für dieses Produktbeispiel werden neben der Prozessaufnahme auch ein, vom Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik entwickelter, Variantenbaum und Module Interface Graph (MIG) erstellt [16], welche die Produkt- und Variantenstruktur visualisieren. Diese Darstellungen erleichtern es im nächsten Schritt, die produktinduzierte Komplexität im Auftragsabwicklungsprozess zu durchdringen.

### 3.2 Identifikation von Komplexität und deren Treibern

Ergebnis dieses Analyseschrittes ist eine strukturierte Sammlung der Komplexitätstreiber. Erzeugen die Komplexitätstreiber zusätzliche ungeplante Prozesse oder müssen geplante Prozessschritte ungeplant mehrfach durchlaufen werden, werden diese in einem weiteren Swimlane-Diagramm dargestellt und als Komplexitäts-Ist-Prozesse bezeichnet. Ein fiktives Beispiel hierfür ist die erforderliche Kennzeichnung der oben genannten Platine auf unplanmäßigen Kundenwunsch mit einem Zulassungsaufkleber. Diese nachträglich aufgetretene Anforderung, erfordert eine neue Produktvariante die nicht mit dem bestehenden Soll-Ist-Prozess abgewickelt werden kann. Zusätzlich erforderliche Prozesse sind hier das externe Drucken des Aufklebers (die Hardware hierfür ist am Montageplatz nicht vorhanden) und das Kleben des Aufklebers. Diese zusätzliche, nicht geplante Wertschöpfung wird im Swimlane-Diagramm mit einem Viereck markiert (Bild 4). Da der vom Kunden geforderte Aufkleber nicht in der automatischen Produktion integriert werden kann, muss ein Monteur das Gehäuse nach der automatischen Montage öffnen und später erneut montieren. Diese Wiederholung von Wertschöpfung wird ebenfalls markiert (Kreis, Bild 4) [10].

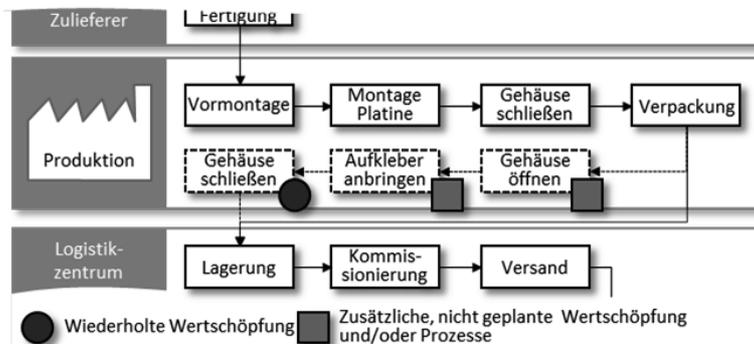


Bild 4: Aufgenommene Komplexität (Komplexitäts-Ist-Prozess)

Die Ursachen dieser Komplexitäts-Ist-Prozesse sowie weitere im Unternehmen auftretende Komplexitätstreiber werden mithilfe von Listen oder Mindmaps strukturiert. Beispiele für weitere Komplexitätstreiber sind beschränkte Fähigkeiten von EDV-Systemen oder auch sich dynamisch ändernde Anforderungen des Kunden.

### 3.3 Verknüpfung von Komplexitätstreibern und Handlungsfeldern

Im dritten Schritt wird eine Zuordnungsmatrix zwischen Komplexitätstreibern und Handlungsfeldern entwickelt, welche die Identifikation der unternehmensrelevanten Handlungsfelder methodisch unterstützt. Dazu werden die zuvor ermittelten Komplexitätstreiber nach Gruppen sortiert und in die Zeilen der Matrix eingetragen. Die Spalten enthalten die aus der Literatur abgeleiteten und die unternehmensspezifischen Handlungsfelder (Kapitel 2.2). Die Verknüpfung von Handlungsfeldern und Komplexitätstreibern erfolgt durch eine binäre Bewertung, ob die Handlungsfelder zur Reduzierung der durch den Komplexitätstreiber erzeugten Komplexität beitragen. Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeldern werden durch eine Dachmatrix aufgezeigt. Diese enthält die dreistufige Bewertung, ob die Handlungsfelder unabhängig voneinander zum Komplexitätsmanagement beitragen können (leere Matrix), ob die Handlungsfelder durch Eingaben aus der Bearbeitung des anderen Handlungsfeldes unterstützt werden (leerer Kreis) oder ob die Handlungsfelder im Rahmen eines ganzheitlichen Komplexitätsmanagements nur gemeinsam bearbeitet werden sollten (gefüllter Kreis).

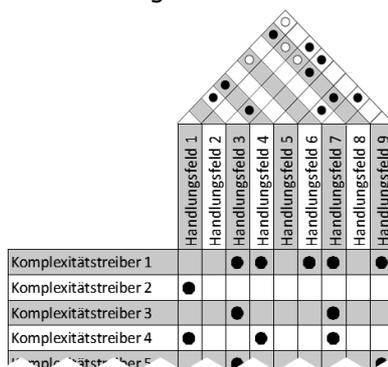


Bild 5: Zuordnungsmatrix

Nach einer Priorisierung der Komplexitätstreiber erlaubt die Analyse der erstellten Matrix, die für das jeweilige Unternehmen relevanten Handlungsfelder zu identifizieren und ein unternehmensspezifisches ganzheitliches Maßnahmenpaket des Komplexitätsmanagements abzuleiten.

## 4 Erkenntnisse durch die Anwendung des Vorgehens bei Dräger

Die Firma Dräger Safety AG & Co. KGaA bietet weltweit innovative Produkte der Sicherheitstechnik an und stellt sich bereits heute erfolgreich der Herausforderung, Kundenwünsche markt- und länderspezifisch zu erfüllen. Um diese zukünftig noch effektiver und effizienter umzusetzen, wurden Handlungsfelder eines ganzheitlichen Komplexitätsmanagements identifiziert. Im Folgenden wird die Anwendung des beschriebenen Vorgehens bei Dräger vorgestellt.

Die Aufnahme und Analyse der Prozesse der Auftragsabwicklung wurde bei Dräger am Beispiel eines tragbaren Mehrgasmessgerätes durchgeführt. Es misst brennbare Gase und Dämpfte (Ex-Sensor), sowie wahlweise drei weitere Gase. Dadurch ergeben sich rechnerisch acht Produktvarianten, die mithilfe eines Variantenbaumes (Bild 6, linke Seite) visualisiert wurden. Auf die Prozesse der Auftragsabwicklung dieser acht Varianten wird an dieser Stelle aus Geheimhaltungsgründen nicht weiter eingegangen.

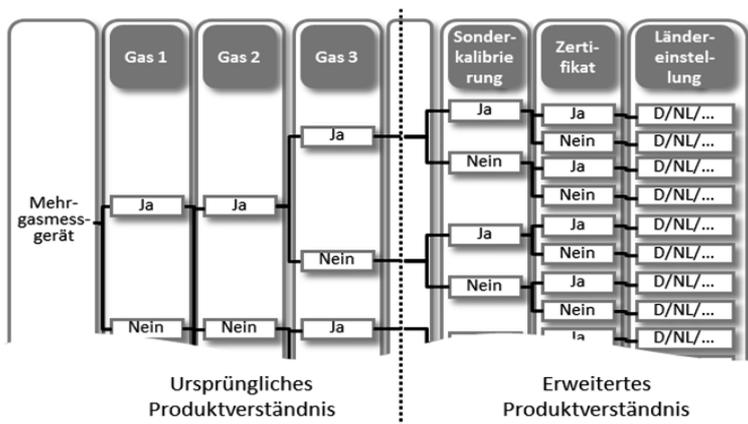


Bild 6: Variantenbaum des Mehrgasmessgerätes

Die Identifikation von Komplexität hat Komplexitätstreiber in den unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. Marketing, Vertrieb, Konstruktion, Produktplanung und die Einführung von Produkten am Markt ergeben. Diese unternehmensspezifischen Komplexitätstreiber wurden dann den generischen Handlungsfeldern gegenübergestellt und zugeordnet.

Dieses Vorgehen hat deutlich gemacht, dass das übliche Produktverständnis erweitert werden muss. Kotler bezeichnet z.B. alles als Produkt, das einer Person angeboten werden kann, um einen Wunsch oder ein Bedürfnis zu befriedigen [28]. Um eine effektive und effiziente Auftragsabwicklung zu gewährleisten, ist diese Definition jedoch nicht umfassend genug. Im Rahmen der Auftragsabwicklung kann es z.B. auch als Wiederholung von Wertschöpfung angesehen werden, wenn zur Erfüllung eines Kundenwunsches die Verpackung des Produktes geöffnet und wieder geschlossen werden muss. Daher gehört im Sinne der Auftragsabwicklung die Verpackung zum Produkt dazu. Die Erweiterung des Produktverständnisses beinhaltet jedoch auch andere periphere Erzeugnisse, wie z.B. das Kalibrierzertifikat, welches zu jedem Mehrgasmessgerät dazu bestellt werden kann oder die interne und externe Dokumentation zur lückenlosen Rückverfolgbarkeit der verkaufsfähigen Pro-

dukte und deren Einzelteile. Daher muss diese Produktdefinition noch ausgeweitet werden. Ein Produkt umfasst nicht nur alles, was einer Person direkt angeboten werden kann, um einen Wunsch oder ein Bedürfnis zu befriedigen, sondern auch die Produktperipherie, welche von Nöten ist, um den Wunsch oder das Bedürfnis zu erfüllen. Das ursprüngliche und das erweiterte Produktverständnis des Mehrgasmessgerätes sind in Bild 7 mithilfe des MIG dargestellt. Durch die Erweiterung des Produktverständnisses hat sich der Variantenbaum verändert. Der Variantenbaum hat noch weitere Unterscheidungsmerkmale erhalten, wodurch die in der Auftragsabwicklung zu betrachtende Produktvielfalt extrem ansteigt (Bild 6, rechte Seite).

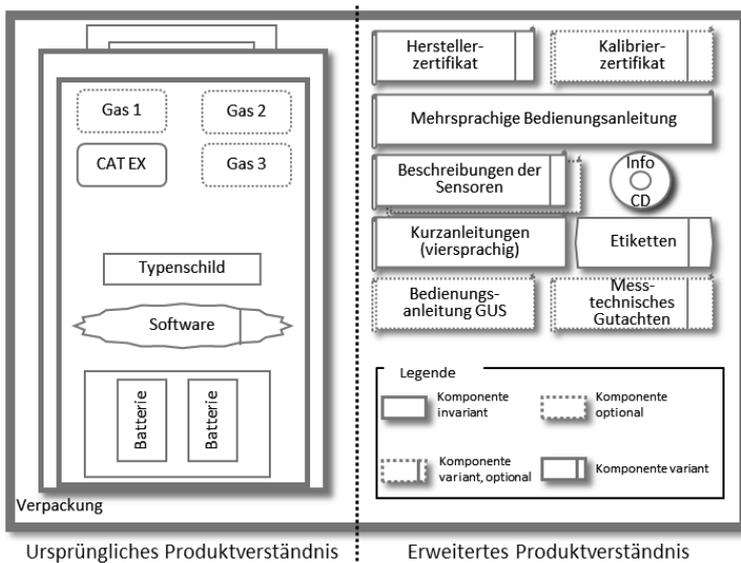


Bild 7: Module Interface Graph des Mehrgasmessgerätes

## 5 Ausblick auf einen ganzheitlichen Ansatz

Der dargestellte Ansatz beschreibt ein methodisches Vorgehen zur Verknüpfung von unternehmensspezifischen Komplexitätstreibern und generischen Handlungsfeldern. Derzeit ist der Ansatz darauf fokussiert die unterschiedlichen Handlungsfelder in der Breite zu identifizieren und den unternehmensspezifischen Komplexitätstreibern zuzuordnen. Die dadurch identifizierten Maßnahmenpakete müssen in Zukunft detailliert betrachtet und bearbeitet werden. Das Ziel des Design for Value Chain ist es hierbei, eine Methode, zur Integration der Anforderungen der globalen Wertschöpfungskette in die frühen Phasen der Produktentwicklung zu entwickeln. Hierzu sind die zu

---

bearbeitenden Handlungsfelder weiter zu analysieren. Aus dieser Wissensbasis können dann Methodenbausteine zum unternehmensspezifischen Komplexitätsmanagement entwickelt werden.

## Literatur

- [1] Andreasen, M. M.: "Complexity of Industrial Practice and Design Research Contributions – We Need Consolidation", in Design for X Beiträge, Erlangen, 2009, S. 1–9.
- [2] Grochla, E.: "Handwörterbuch der Organisation", 2nd ed. Stuttgart: C.E. Poeschel, 1980.
- [3] Ulrich, H.;Probst, G. J. B.: "Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: Ein Brevier für Führungskräfte", 3rd ed. Bern, Stuttgart: Haupt, 1991.
- [4] Schwenk-Willi, U.: "Integriertes Komplexitätsmanagement: Anleitungen und Methodiken für die produzierende Industrie auf Basis einer typologischen Untersuchung". Dissertation, Universität St. Gallen, St. Gallen, 2001.
- [5] Wildemann, H.: "Produkte und Services entwickeln und managen: Strategien, Konzepte, Methoden", 2nd ed. München: TCW, Transfer-Centrum, 2009.
- [6] Kirchhof, R.: "Ganzheitliches Komplexitätsmanagement: Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen", 1st ed. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl, 2003.
- [7] Gell-Mann, M.: "Das Quark und der Jaguar: Vom Einfachen zum Komplexen - die Suche nach einer neuen Erklärung der Welt", München: Piper, 1994.
- [8] Dalhöfer, J.: "Komplexitätsbewertung indirekter Geschäftsprozesse", Dissertation, TU Hamburg Harburg, Hamburg, 2009.
- [9] Lee, H. L.: "Design for Supply Chain Management: Concepts and Examples", in Perspectives in operations management: Kluwer Acad. Publ, 1993, S. 45–66.
- [10] Brosch, M.;Krause, D.: "Design for Supply Chain Requirements: An approach to detect the capabilities to postpone", in International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference: IDETC/CIE 2011.
- [11] Becker, T.: "Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren", 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [12] Versteegen, G.;Heßeler, A.: "Anforderungsmanagement: Formale Prozesse, Praxiserfahrungen, Einführungsstrategien und Toolauswahl", Berlin: Springer, 2004.

- 
- [13] Franke, H.-J.;Firschau, N. L.;Steinebrunner, E.: "Methodische Unterstützung für das Variantenmanagement", in *wt Werkstattstechnik online* vol. 2001, no. 6, S. 301–303.
- [14] Heina, J.: "Variantenmanagement: Kosten-Nutzen-Bewertung zur Optimierung der Variantenvielfalt",. Dissertation, Wiesbaden, 1999.
- [15] Schuh, G.;Becker, T.;Caesar, C.: "Integrierte Beherrschung der Variantenvielfalt. Varianten vorbeugen vermeiden statt nachträglich abbauen", in *Inustrie-Anzeiger*, no. 26, 1989, S. 84–90.
- [16] Bleses, C, et al.: "Development of Modular Product Families: Integration of Design for Variety and Modularization", in *Proceedings of norddesign 2010*, 2010, S. 159 - 168. .
- [17] Wildemann, H.: "Supply Chain Management: Leitfaden für unternehmensübergreifendes Wertschöpfungsmanagement",, 12th ed. München: TCW-Verl, 2011.
- [18] Jonas, H.;Krause, D.: "Produktfamilienentwicklung im Rahmen des Variantenmanagements", in *Design for X Beiträge*, Hamburg, 2010, S. 169–180.
- [19] Appelfeller, W.;Buchholz, W.: "Supplier Relationship Management: Strategie, Organisation und IT des modernen Beschaffungsmanagements",, 2nd ed. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011.
- [20] Probst, G.;Raub, S.;Romhardt, K.: "Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen",, 6th ed. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010.
- [21] Krug, R.: "Aufbau eines Ideenmanagements: [Mitarbeiterbeteiligung am Veränderungsprozess]",, 1st ed. Kassel: Ande, 2002.
- [22] Macharzina, K.;Wolf, J.: "Unternehmensführung: Das internationale Managementwissen; Konzepte, Methoden, Praxis", 7th ed. Wiesbaden: Gabler, 2010.
- [23] Wangenheim, S.: "Planung und Steuerung des Serienanlaufs komplexer Produkte", Univ, Frankfurt am Main, Stuttgart, 1998.
- [24] Porter, M. E.: "Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten", 11th ed. Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH, 2008.
- [25] Möller, P.;Hüfner, B.;Ketteniß, H.: "Internes Rechnungswesen",, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [26] Haubrock, A.;Öhlschlegel-Haubrock, S.: "Personalmanagement",: Kohlhammer, 2009.
- [27] Beckmann, H.: "Supply Chain Management: Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen",. Berlin: Springer, 2004.
- [28] Kotler, P.;Keller, K. L.;Bliemel, F.: "Marketing-Management: Strategien für wertschaffendes Handeln",, 12th ed. München: Pearson Studium, 2008.

## Evaluation of linear drives with different fuzzy methods

Attila Piros und Tibor Bercsey  
*Department of Machine and Product Design  
Budapest University of Technology and Economics*

This paper focuses on the selection of the mechanical components of a linear drive system. The system itself is installed in a high capacity tool magazine. The high variety of the possible components makes the selection procedure complicated because of the large number of the possible variations. The manual handling of this procedure, like managing the data with spreadsheets, is nearly impossible. Using fuzzy membership functions to evaluate the mechanical properties of these components gives an opportunity to automatically find the best combination of the components. There are many fuzzy evaluating methods available, but this paper compares the conventional fuzzy evaluation ( $R_G$ ,  $R_{FZ}$ ) with using corrected fuzzy mean (CFZ).

### 1 Setting up the basic fuzzy membership functions

The fuzzy method itself is based on the evaluation of the calculated properties of the selected set using fuzzy logic [1]. This method uses fuzzy membership functions to describe the properties of the components. The fuzzy logic gives an opportunity both for handling the human point of view and the ambiguous cases of the evaluation of variations [2]. This way the kind of notions like temporal over load of the servo motor can be interpreted.

In the selection procedure the following components are varied in case of three robot motion axes [3]: linear guide with drive mechanism (5 types), gearbox (25 types), coupling (9 types), servo motor (11 types). Because of

the large number of possible combinations compatibility functions were applied to validate the combinations at the first stage. These compatibility functions pre-filter the selected sets of components. For example if a specific combination of the motor/gearbox has incompatible axes diameters then this variation is dropped before the further calculations. After the application of the compatibility functions only 1519 are left from 37125 variations for further process. The software generates all possible combinations among the components and also calculates the following compatibility values listed in Table 1.

Table 1: List of compatibility functions

ID	Compatibility test between these values:
CP01	Motor/Coupling shaft diameter.
CP02	Motor/Coupling torque in case of acceleration.
CP03	Motor/Gearbox torque value.
CP04	Coupling/Gearbox type.
CP05	Gearbox/Load torque value.
CP06	Gearbox/Guide ratio.
CP07	Guide/Axis type.

Some mechanical properties of the kinematic chain must be calculated and evaluated to find the appropriate combination of the selected components. First the required torque value ( $T_{CL}$ ) is calculated at the load side then this value is recalculated to the servo motor side ( $T_{CM}$ ) with the following functions:

$$T_{CL} = m_L \cdot g$$

$$T_{CM} = \frac{T_{CL}}{i_{GB} \cdot \eta} + T_{frM}$$

*m<sub>L</sub>*: mass of load  
*g*: gravity const.  
*i<sub>GB</sub>*: gearbox ratio  
*η<sub>GB</sub>*: gearbox efficiency  
*T<sub>frM</sub>*: friction torque of motor

Knowing the kinematic properties the reflected load inertia ( $I_{RL}$ ) and the inertia ratio at the motor side ( $R_{IL}$ ) have to be calculated:

$$I_{RL} = \frac{m_L \cdot DPR_G^2}{2 \cdot \pi} + I_{GB} + I_C$$

$$R_{IL} = \frac{I_{RL}}{I_M}$$

*DPR<sub>G</sub>*: guide ratio  
*I<sub>GB</sub>*: gearbox inertia  
*I<sub>C</sub>*: coupling inertia  
*I<sub>M</sub>*: motor inertia

Concerning the required acceleration torque at the load side ( $T_{aL}$ ) and the gearbox ratio the total acceleration torque at the motor side ( $T_{aM}$ ) can be calculated with these functions:

$$T_{aL} = v_M \cdot \frac{2 \cdot \pi}{t_a} \cdot I_M + \frac{I_{RL}}{\eta_{GB} \cdot \eta_G} \quad \begin{array}{l} v_M: \text{motor speed} \\ t_a: \text{acceleration time} \\ \eta_G: \text{guide efficiency} \end{array}$$

$$T_{aM} = T_{CL} + \frac{T_{aL}}{i_{GB}}$$

The final results of these calculations are listed in Table 2. These values are the base of the Fuzzy evaluation.

Table 2: The variant properties in the design process

<b>Name</b>	<b>Description</b>
speed (SP)	Speed of the moving load at the end of the kinematic chain.
inertia ratio (IR)	Ratio between the reflected load inertia and the motor inertia.
maximum torque (TM)	The required torque at the motor shaft in case of acceleration.
stall torque (TS)	The required torque at the motor shaft in case of constant velocity.
utilization ratio (UR)	Ratio between the motor maximum torque and the required acceleration torque.

In this stage all of the possible configurations are automatically generated to cover the whole design space. Generating means that the components are only paired without any tests. However, this generation procedure is quite fast, further evaluation requires many more related calculations. Using compatibility functions the number of possible valid sets are significantly decreased.

The values of the mechanical properties are the base of the Fuzzy evaluation. Figure 1 shows the fuzzy membership functions for these properties.

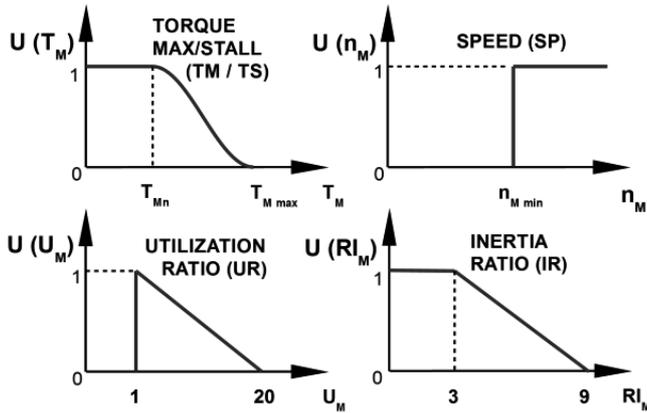


Figure 1: Fuzzy membership functions of the variant properties

The results are organized into a 6 dimensional matrix. By fixing 3 coordinates there is a good opportunity to visualize a 3-dimensional subset from this matrix. Figure 2 shows the selected portion of the matrix with the different fuzzy values and the incompatible combinations in colour yellow. Here the robot axis (X), the linear guide type (THK GP8-20C) and the coupling (ATEK GS24 KN) are fixed. The servo motor type and the gearbox are the varying components. The different mechanical properties are displayed on the vertical axis.

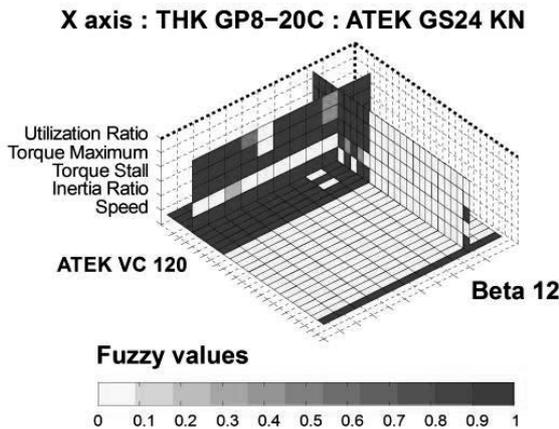


Figure 2: 3-dimensional subset of the 6 dimensional solution space

## 2 Conventional fuzzy evaluation of the results

The conventional fuzzy evaluation is based on the fuzzy logic. This logic can handle inaccurate data and it can also model nonlinear functions of arbitrary complexity. With Fuzzy Inference Systems (FIS) the mapping of input data onto the output space can be made in a very convenient way. In the current case, on one side the FIS contains the parameters' fuzzy membership functions for evaluating the input data (the mechanical properties of the given set of components). On the other side this system also includes the output fuzzy membership functions of the quality (Q) of the components' set.

The working of FIS must meet two fundamental criteria (C1 C2). The first criteria says that if any fuzzy value is equal to 0 the quality value must be 0. In this case this variation is out of the range because of the failure of one of its parameters. The second criteria concerns the ideal case. If all of the parameter values are equal to 1 the calculated quality must also be 1 (1 marks the optimal value).

$$C1: 0 \in U_i \rightarrow Q_i = 0$$

$$C2: \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} = 1 \rightarrow Q_i = 1$$

The working of FIS is based on fuzzy if-then rules, simply, fuzzy rules. In this case two rules are required to fulfil the two basic criteria (

1:  $\neg input1 \vee \neg input2 \rightarrow output = bad$  2:  $input1 \wedge input2 \rightarrow output = good$

On the next illustration the inertia ratio (IR) and the maximum torque (TM) are displayed as the input functions. As the output function the Quality is pictured in Figure 3. This image shows the case of criteria C1, when one of the input parameters (TM) fails therefore the value of the output function is also 0.

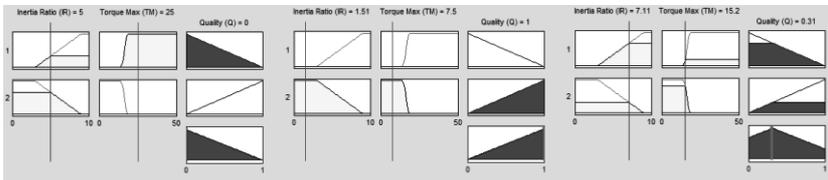


Figure 3: The worst, the optimal and the intermediate case of the parameters

This figure also shows case two (C2), when all of the parameters are ideal and the output value is also 1.

In an intermediate case the output function results a value between 0 and 1 as Figure 3 shows it. As this picture well displays the week value of one input (Inertia Ratio) significantly decreases the output (Quality) value. This feature of the conventional fuzzy evaluation will be quite important in the interpreting the results of the comparison.

On all of the images the negated input functions (in yellow colour) are displayed in the top row together with the "bad" output function of quality (in blue colour). The direct input functions (from left the Inertia Ratio (IR) followed by the Torque Max (TM) function) are in the middle row together with the "good" output function. The unified output function is displayed at the bottom-right corner of the images.

In the evaluation of a specific set of components all pairing of the mechanical properties are studied with the concerning FIS (see in Table 3.).

Table 3: The properties and the paired (FIS) functions

		1	2	3	4	5
		SP	IR	TS	TM	UR
1	SP	1	(SP,IR)	(SP,TS)	(SP,TM)	(SP,UR)
2	IR	1	1	(IR,TS)	(IR,TM)	(IR,UR)
3	TS	1	1	1	(TS,TM)	(TS,UR)
4	TM	1	1	1	1	(TM,UR)
5	UR	1	1	1	1	1

The bracketed FIS functions, like the previously described Inertia Ratio - Maximum Torque (IR,TM), are weighted with the following formula.

$$(FIS) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n} \quad w_i: \text{weight of the property}$$

Table 3 shows the structure of the output matrix. Initially this matrix is filled with 1 values. During the evaluating procedure the (FIS) output values are calculated in each pairing. Because these values are between 0 and 1 the minimum value of the matrix is easy to find and it is also very significant. The minimum characterizes the whole combination of this drive chain, which is not better than its weakest property.

---

### 3 The corrected fuzzy mean

Based on the independently calculated fuzzy values the corrected fuzzy mean ( $R_{FZ}$ ) is an average to compare the different configurations. This average is similar to the geometric mean ( $R_G$ ). The weighted formulas of these averages are the following:

$$R_{FZ} = \frac{U_1^{w_1} \cdot U_2^{w_2} \cdot \dots \cdot U_n^{w_n}}{\frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}}$$
$$R_G = \sqrt[\sum_{i=1}^n w_i]{U_1^{w_1} \cdot U_2^{w_2} \cdot \dots \cdot U_n^{w_n}}$$

Both means meet the two fundamental criteria (C1 C2). The main difference between these means is the distribution of the mean values. The values of the geometric mean are distributed on a narrower range than the values of the corrected fuzzy mean. The broader distribution range of the calculated mean values makes the evaluation much easier in case of corrected fuzzy mean. This range is more than two times wider in the corrected fuzzy mean than the geometric mean which is a big advantage in the software algorithm. Figure 4 shows that the corrected fuzzy mean separates the design variations better than the geometric mean.

### 4 Comparison of the fuzzy evaluations

The two main strategies, the conventional fuzzy evaluation and averaging the independent fuzzy values have numerous differences. As Figure 4 clearly displays the conventional fuzzy evaluation (CFZ in green) distributes the values as wider than the corrected fuzzy mean ( $R_{FZ}$  in magenta) and the characteristics of the three diagrams (together with the geometric mean ( $R_G$  in blue) are very similar. But the CFZ values (plotted with green dots) are originally ordered in a different way than the two means. Generally it would be problematic, but the aim of the selection procedure is to find best solutions. In the current case the first 20% of the best solution is in the same order in all of the evaluating methods.

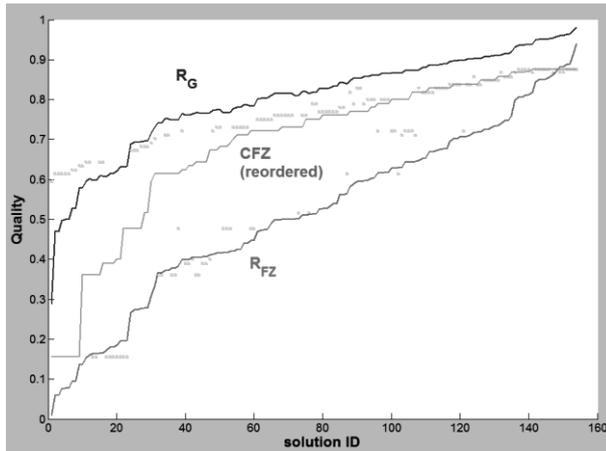


Figure 4: Results of the 3 evaluating methods

## 5 Conclusions

This paper clearly shows that the fuzzy based evaluation makes the selection procedure faster and more perspicuous. Unlike the manually executed calculations the software covers the entire solution space. It is also quite obvious that the calculation of the corrected fuzzy mean is much faster than generating and using high number of the Fuzzy Inference Systems. In the software algorithms the application of the corrected fuzzy mean has a notable advantage in the evaluation of the results. This method distributes the results in the broadest range.

## References

- [1] Deciu, E. R. , Ostrosi, E. , Ferney, M. and Gheorghe, M. "Configurable product design using multiple fuzzy models", Journal of Engineering Design, Vol. 16 No: 2 (2005), pp 209 - 233
- [2] Dombi, J., Gera, Zs., "Rule based fuzzy classification using squashing functions", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, Vol. 19 , No: 1 (2008), pp 3-8
- [3] Piros, A. "Fuzzy Evaluation in Configurable Product Design", The 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN ENGINEERING AND SCIENCE, Tokyo, JAPAN, November 17-19, 2010

# Application of Design Models in Mechatronic Product Development and Building Design – Reflections of Researchers and Practitioners

Boris Eisenbart und Luciënne Blessing  
*Engineering Design and Methodology Lab*  
*Luxembourg University*

Design models are an essential means for abstract representation and visualisation of information in the design process. Comprehension of design models in interdisciplinary engineering design teams is often hindered by different terminology and different discipline-specific modelling approaches. This paper presents the results of an interview study conducted with practitioners and researchers from engineering design and building design. The study elaborates the different ways of collaboration and use of design models in building design as compared to engineering design, in order to derive the potentials for cross-fertilisation between both areas of product development.

Keywords: interdisciplinary product development, design models

## 1 Introduction

The aim of design research is to provide industry with methods, tools, recommendations, and approaches to meet the challenges arising from worldwide competition and increasing consumer-awareness, resulting in more complex, rapidly changing requirements and user-expectations [1]. The increasing product functionality expected by the user more often requires interdisciplinary collaboration of different experts to develop integrative solutions [2, 3]. In order to optimally co-ordinate individual design activities in (inter-

---

disciplinary) product development projects and to ensure each designer to be working towards a common goal, Valkenburg [4] stresses the importance of establishing what she refers to as “a shared understanding” of both the addressed problem and the design objective among collaborating designers. This includes e.g. the product requirements, the required functionality, and alternative (interdisciplinary) principle solutions. However, while no physical object has been produced, the product in development only exists in the designers’ minds and is externalised, stored, and elaborated through using design models (after [5]) – such as sketches, drawings, physical or functional models [6–8].

### 1.1 New challenges

In general, so far, existing modelling approaches are essentially discipline-specific and use of design models *across* disciplines, hence, is often hindered by different terminology, different modelling approaches, and lack of knowledge about other disciplines [9]. This research focuses on engineering design of mechatronic products (as the combination of mechanical engineering design, electrical engineering design, and software development) as the most common interdisciplinary product development in industry. Although Buur [10] strongly emphasizes “*that in fact [...] (mechatronic product development) must be regarded [...] not just as a combination of traditional engineering fields, in order to exploit the full potential of [...] (their) symbiosis [...]*” the *integration* of all the essential discipline-specific perspectives (in modelling and designing) is not sufficiently supported in literature and has not sufficiently been addressed in research [11]. As will be discussed in more detail later on, even the development of large complex products, e.g. in robotics or aerospace industry, shows essentially separate discipline-specific design strands. To overcome this situation, the establishment of a “shared understanding” and the integration of discipline-specific perspectives among involved designers, needs to be supported by design research, e.g. through linking discipline-specific modelling approaches.

### 1.2 Integrative perspective on design

Another area of interdisciplinary product development is building design, as the combination of architectural design, civil (or structural) engineering design, and building services engineering design. Looking into building design may be used to apprehend inspiration from another area of product development to support modelling across classical engineering design disciplines. Albeit building design is not solely focused on the development of technical products – other than engineering design – the comparability of both areas is

---

frequently discussed in literature. Roozenburg and Cross [12] state, that models of the development process – especially in the nineteen-sixties – showed significant similarities in both areas, but have grown apart starting from the early nineteen-seventies. In their view, process models in engineering design now put a stronger emphasis onto the “vertical” – linear, procedural – dimension of design projects, while “in [...] (building design<sup>1</sup>) *the attention [...] has shifted [...] to the horizontal – iterative, problem-solving dimension*” [13, p.217]. It is their belief that both dimensions need to be converged, as they are merely two different perspectives onto the same thing and both dimensions are needed within product development: “[...] *it is obvious that all designers need to progress their projects in a sequence of stages [...]; it is also obvious that designers must employ varying cognitive procedures during the design process*” [12, p.218]. Daly [14] and Goel and Pirolli [15] share this line of thought. Focusing on the problem-solving character of product development Goel and Pirolli argue, that disciplines like architecture and mechanical engineering show “*significant commonalities in the structure of design problems and tasks across the various design disciplines [...]*” and that therefore design needs to be studied “*as a subject matter in its own right, independent of specific tasks or disciplines*” [15, p.398]. Eckert and Clarkson [16] similarly argue that design in different disciplines may differ in their emphasis put onto specific aspects, but show essential similarities across disciplines on an abstract level.

Regarding the similarities on a high level of abstraction across disciplines, Gericke and Blessing [17] come to a similar conclusion. However, they propose that a generic consensus model of product development not only needs to integrate the two dimensions of design projects, discussed by Roozenburg and Cross [12], but also needs to be sufficiently adaptable to different product development contexts and tasks. A recent example from research, to suggest that building design and engineering design are indeed very similar, is the 2-dimensional process model by Zeiler and Savanovic [18]: the “general systems theory based integral design method”. Albeit the method is based on various product development approaches in German and Anglo-American literature from engineering design and general systems engineering, it has successfully been taught and applied in an architectural environment [19].

---

<sup>1</sup> Roozenburg and Cross [12] generally refer to it as „architectural design“, while in fact addressing the entire process of designing a building.

### 1.3 Collaboration in design

Besides these more general considerations regarding the comparability of building design and mechatronic product development, Eisenbart et al. [20] discuss various generic design states<sup>2</sup> across disciplines based on a detailed analysis of the design models proposed in literature from mechatronic product development (including the involved engineering design disciplines) and building design. Within a generic design state, the proposed design models address similar information across disciplines. However, literature [22-24] suggests that the way different experts collaborate with each other within the product development process differs essentially between both areas, as shown in Figure 1. [22, 23] propose that different (discipline-specific) sub-systems of the overall mechatronic product are typically developed in parallel by separate groups of designers. In building design, different phases of the design process usually involve different people: concept development is usually carried out by architects, while structural engineers and building services engineers are typically more focused on embodiment and detail design [24].

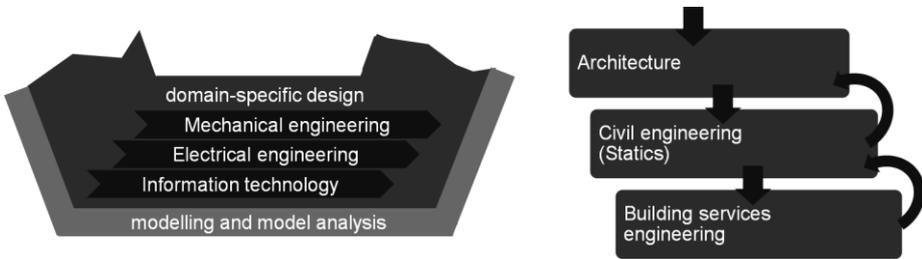


Figure 1: different collaboration in mechatronic product development (left, after [23]) compared to building design (right, after [24])

### 1.4 Research need

As discussed above, in engineering design integrative modelling approaches to support communication within a joint development project have not sufficiently been established. This may be due to the fact that the involved sub-disciplines have originally evolved as autonomous design disciplines and discipline-specific sub-systems of a mechatronic product are often

---

<sup>2</sup> The term *design state* (after [21]) denotes the incorporation of all information about a product – which is stored within the sequentially developed design models 6 – as it evolves.

---

developed widely separated from one another. Since individual designers in building design operate sequentially, communication between experts is *essential*, requiring the exchange of all the relevant information at handover. Considering these different ways of collaborating, it can be assumed that the use of design models to support communication will also differ significantly between both areas. Moreover, as the different experts in building design have always been obliged to collaborate in order to develop a building in its entirety, it can further be assumed that modelling approaches in building design facilitate the integration of discipline-specific perspectives. Based on these assumptions it is expected to be beneficial to investigate:

- What are the implications of the different uses of design models regarding the problems of integrating discipline-specific perspectives in mechatronic product development?
- What are the potentials for cross-fertilisation between both areas of product development?

## 2 Reflection of Researchers and Practitioners – an interview study

The presented explorative interview study has been conducted with experts from engineering design and building design, in order to contribute to a deeper understanding of the commonalities and differences between both areas. The findings are used to elaborate the potentials for cross-fertilisation between both areas of product development regarding integrative modelling approaches.

### 2.1 Study design

The interviews have been conducted with 16 researchers and practitioners from classical engineering design, including interdisciplinary (mechatronic) product development and building design. Table 1 illustrates the individual backgrounds and experiences of each interviewed expert in more detail. Participants have been interviewed once (in some cases twice) with each session lasting between one half and one hour. Focus was put onto

- Process of product development  
The interviewees were asked about the particular approaches to product development they experienced in practice or knew from literature (e.g. from research or education).

- **Communication across disciplines**  
The questions focused on the participants' experience with communicating across disciplines, regarding problems or successes and their opinion about the particular reasons behind success or failure of communication.
- **Use of design models to support communication**  
The participants were asked about specific design models which are typically applied within the development process, focusing on those used to communicate with others.

Table 1: Individual background and experience of each interviewee

Experts	Educational background	Industrial experience	Business size	Research experience
Mechanical engineering design	Mechanical engineering	Hydraulic system designer in Aerospace industry	Large	Model-driven hydraulic system development
	Mechanical engineering			Engineering design research
Electrical engineering design	Electrical engineering	Microchip development for measurement equipment	Small	
Software development	Computer Science			Computer tool integration
	Computer Science			Computer tool integration
	Computer Science	Program development	Medium	Model-driven engineering
Mechatronic product development	Mechanical engineering			Model-based mechatronic system development
	Electrical engineering, automation technology	Robotics development	Medium	Automation technology
	Space systems engineering	Systems integration in satellite design	Large	Design methodology research
	Production engineering	Conceptualisation of manufacturing machines	Large	Production engineering
Building design	Civil engineering	Structural engineering, bridge design	Small	Structural engineering
	Architecture	Bridge design	Small	Design research
	Civil engineering	Public construction project management	Small	
	Civil engineering	Residence construction project management	Small	Structural engineering
	Civil engineering			Structural engineering
	Civil engineering			Structural engineering

## 2.2 findings

Regarding the development process, engineering designers agreed with what has been suggested in [23]: it is generally an important endeavour in mechatronic product development projects to be working in parallel on different (discipline-specific) sub-systems. The classical sequential approach to building design described in [24] is still very common, but being challenged

by two aspects of product development which – according to the interviewed construction project managers – have become more relevant in the recent past:

- More demanding climate requirements (legislation) – concerning both indoor climate as well as energy efficiency of buildings – impact strongly on concept development, thus requiring the collaboration of architects and building services engineers; but also – especially regarding façade design – structural engineers. Other examples are buildings with a strong linkage between shape and statics (e.g. bridges – demanding collaboration between architects and structural engineers) or with high spatial and functional demands (e.g. hospitals – requiring collaboration of architects, structural engineers, and building services engineers) as space, room equipment and indoor climate management need to meet specific requirements.
- Project managers stated to be making an effort themselves to involve structural engineers and building services engineers earlier in the process. Leading concept development in “the right direction” regarding e.g. dimensions and position of pillars or the position of breaks through walls for pipes and cables, has often helped reducing the number of iterations and development time in the overall process considerably.

Table 2: Comparison of the development process

		<b>Building design</b>	<b>Engineering design</b>
development process	development strategy	sequential	parallel, widely integrated approach
		product-oriented approach in practice	mostly product-oriented approach, depending on corporate culture
		<i>some</i> approaches to spacial decomposition	decomposition essential, important tool of interdisciplinary product development
	experts involved in concept phase	most of the time one/ few architect(s)	experts from various disciplines involved
	application of design methodologies (or systematic approaches to design) in practice	few; various adaptations from project management	few but increasing, depending on the particular corporate culture
	production quantities	always a "one-piece production"	(mostly) great number of units to mass production
	estimated product life time	very long	(mostly) short to medium
	influences on the product development process	strongly influenced by cost estimates, aesthetics; product design very often artistically driven	costs, functionality, corporate culture

Each interviewed designer with a background in industry independently stated industrial product development to be characterised by severe shortage of time and far-reaching financial restraints. Most engineering designers stated to know about systematic, methodical approaches to product development from literature, but rarely recalled them being applied in industry. However, one of them described that in one company he has been working at, it has regularly been attempted to introduce more methodical approaches to product design. To his knowledge – so far – without success. In building design with only one exception none of the interviewees could recall to have heard about methodical approaches or literature on systematic product development. Only the interviewed architect knew about these approaches, but only seldom applied them in his daily work in industry. Further findings regarding the development process have been summarised in Table 2.

Communication across disciplines differs considerably between engineering design and building design. While interviewees from engineering design generally stated to have essential problems understanding design models and terminology used by collaborating designers with a different engineering background, participants from building design did not report about having these problems. The only problems that were mentioned result from what is here referred to as "social factors": One construction project manager described the collaboration on large construction sites occasionally to be characterised by conceit of some architects towards the involved technicians, including reluctance to discuss specific details of their concept or to accept suggested changes. Engineering designers themselves see the reasons for the communication problems mostly originating from the lack of knowledge about the design models used within the other involved disciplines. Table 3 summarises the discussed findings.

Table 3: Comparison of communication within the development process

		<b>Building design</b>	<b>Engineering design</b>
communication	Communication problems	few	yes
	Communication problems caused by different ways of modelling	no	yes, partly leading to fundamental misunderstandings or termination of discussions
	Other reasons for communication problems	overall-view versus detail-view; "social" factors	different terminology, lack of knowledge from the other discipline, different perspectives (dimensions, stresses versus signal flows versus procedures)
	Reasons for understanding/ misunderstanding	use of common "pictograms"	no/ few common modelling approaches
	exchange with collaborators	in project/ design meetings	in design meetings; short, frequent tête-à-têtes with colleagues

In building design the designers often seem to use specific, what is here referred to as, "handover documents" as well as legal documents (e.g. to apply for permits) to support the exchange of information. The interviewed building designers stated that the architect(s) will have to create a particular set of drawings and sketches – with a specific level of detail – as well as textual descriptions to hand over to the structural engineer(s). The building services engineer(s) receives another set of particular documents from the structural engineer – on a more detailed level – to work with. According to the two construction project managers these documents also typically mark the end of one main development step and contain all the relevant information. Taken from the description of the participants it seems that the diversity of documents used in engineering design generally is much higher than in building design, which mostly seem to rely on 2-dimensional representations.

Table 4 gives a brief overview of the gathered findings.

Table 4: Comparing the use of design models within the development process

		<b>Building design</b>	<b>Engineering design</b>
design modelling	Specific design models for communication purposes	sketches, drawings, specific "handover"-documents, with a specific level of detail	great diversity, strongly dependent on design project
	type of models used	essentially 2-dimensional visualisations, 3-dimensional visualisations or physical models only for presentation to customer	great diversity, for customer, colleagues, for oneself etc.
	essential design models for the different phases of product development	process typically moves from one handover document to the next, which also marks individual phases <sup>3</sup>	models are used to generate, evaluate, simulate etc. every new piece of information gained is thus stored in design models

### 3 Discussion

Literature discussed in the introductory chapter suggests that from an abstract point of view building design and engineering design can be regarded as very similar. The conducted interviews indicate that numerous differences exist on a more concrete level regarding the particular way product development is carried out. Most importantly, however, the conducted interviewees confirmed the communication processes supported through design modelling to differ substantially between both areas. As assumed, the different ways of collaborating – in building design as compared to engineering design – have an essential influence on communication and the use of design models to support the exchange of information. Parallel discipline-specific design, as it is common practice in mechatronic product development, requires continuous communication of relevant changes made within each sub-system. However, comprehension of discipline-specific design models – and therefore communi-

---

cation across disciplines – is often hindered. In contrast, building designers do not seem to have any problems. This supports the assumption, that design models in building design are able to integrate the different discipline-specific perspectives onto the product in development.

According to the reflections of the participants, the classical sequential approach in building design derived specific handover documents to support the exchange of all information relevant to the other experts. These seem to be generally understandable across disciplines. The interviewed engineering designers did not describe anything similar. However, apparently, it is not only due to these specific handover documents, that communication is successful in building design, as even in a parallel development project, there seem to be no problems understanding the used design models across disciplines. This may be due to the shared pictograms as well as the low diversity of the used design models within the development process, as compared to engineering design. Moreover, from the used design models mentioned by building designers, it seems that the *shape* of the product represents a shared aspect in their individual perspectives onto product design. It remains unclear if such a shared view exists across all involved engineering design disciplines in mechatronic product development. The interviewed engineering designers did not recall something similar from their experience.

## 4 Conclusions

The use of design models to support the exchange of information between engineering designers is essential. The integration of discipline-specific perspectives in a mechatronic product development project, however, is often hindered, due to a lack of shared terminology and integrative modelling approaches. Building designers, in contrast to engineering designers, have always been obliged to handover all the relevant information to other experts within the development process. It could therefore assumed, that the use of design models differs between both areas and that design models used in building design are more suitable for facilitating the integration of discipline-specific perspectives than those from engineering design. Based on these assumptions, the study aimed at investigating the implications of the different use of design models regarding the potentials for cross-fertilisation between both areas.

The reported findings strongly support the assumptions and it is expected that a more detailed analysis of modelling approaches in building design may help develop recommendations or modelling approaches to support interdisciplinary product development in engineering design. It seems, two key factors

---

for successful communication in building design are the lower diversity of design models used to support the exchange of information and use of shared coding (pictograms). However, even though building designers use shared coding and modelling approaches to support the exchange of information, it is clear that this is not easily transferable onto engineering design. Shared coding and shared representations (i.e. visualisations) of mutually relevant information – so far – have not been established in engineering design. Future work needs to elaborate in detail, how the representation of relevant information is facilitated in modelling approaches from building design and to which extent these can be adopted to engineering design.

## Literature

- [1] Blessing, L.T.M.: Comparison of Design Models Proposed in Prescriptive Literature, Social Sciences Series (1996).
- [2] Shi, B.: Design for Multi-technology Systems, Dissertation (2003).
- [3] Redenius, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für Fortgeschrittene Mechatronische Systeme, Dissertation (2006).
- [4] Valkenburg, R.C.: The Reflective Practice in Product Design Teams, Dissertation (2000).
- [5] Buur, J.; Andreasen, M.M.: Design Models in Mechatronic Product Development, Design Studies (1989).
- [6] Roth, K.: Modellbildung für das Methodische Konstruieren ohne und mit Rechnerunterstützung, VDI Z 128 (1986).
- [7] Andreasen, M.M.: Modelling - the Language of the Designer, Journal of Engineering Design 5 (1994).
- [8] Henderson, K.: On Line and On Paper. Visual Representations, Visual Culture, and Computer Graphics in Design Engineering, The MIT Press, 1999.
- [9] Goel, V.: Sketches of Thought (1995).
- [10] Buur, J.: A Theoretical Approach to Mechatronics Design, Dissertation (1990).
- [11] Andreasen, M.M.: 45 Years with Design Methodology, Journal of Engineering Design 22 (2011) 1–40.

- 
- [12] Roozenburg, N.F.M.; Cross, N.: Models of the design process: integrating across the disciplines, *Design Studies* 12 (1991) 215–220.
  - [13] Roozenburg, N.F.M.; Eekels, J.: *Product Design: Fundamentals and Methods* (1995).
  - [14] Daly, S.R.: *Design Across Disciplines*, 2088.
  - [15] Goel, V.; Pirolli, P.: The Structure of Design Problem Spaces, *Cognitive Science* 16 (1992) 395–429.
  - [16] Eckert, C.; Clarkson, J.: The Reality of Design, *Design Process Improvement A review of current practice* (2005) 1–29.
  - [17] Gericke, K.; Blessing, L.T.M.: Comparison of Design Methodologies and Process Models Across Disciplines: A Literature Review, *International Conference on Engineering Design* (2011).
  - [18] Zeiler, W.; Savanovic, P.: General Systems Theory Based Integral Design Method, *Proceedings of International Conference on Engineering Design, ICED, Stanford* (2009).
  - [19] W. Zeiler, Tools as a Systematic Intervention: Integral Design, *International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE* (2008) 679–686.
  - [20] Eisenbart, B.; Gericke, K.; Blessing, L.: A Framework for Comparing Design Modelling Approaches Across Disciplines, *International Conference on Engineering Design* (2011).
  - [21] Dym, C.L.: *Engineering design. A Synthesis of Views* (1994).
  - [22] VDI 2221 - *Systematic Approach for the Design of Technical Systems and Products* (1993).
  - [23] VDI 2206 - *Design methodology for mechatronic systems* (2004).
  - [24] Dalziel, B.: *Architect's Job Book*.

## Acknowledgements

The authors would like to thank the *Fonds Nationale de la Recherche* Luxembourg which has been funding this research (AFR PhD-09-186).

# Modulare Strukturen methodisch in Unternehmen umsetzen – Entwicklung von Standardumfängen und Integration von Erfahrungswissen

Sandra Eilmus, Gregor Beckmann und Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

The integrated PKT-approach for developing modular product families aims at the methodical development of maximum external product variety using the lowest possible internal process and component variety. This contribution proposes two approaches how to establish modular structures derived by using the PKT-approach within a company in order to capitalize from the benefits modular structures offer. The first approach deals with the methodical development of standardized hardware for use throughout the corporate product program in order to gain lot size effects. How to make use of the expected benefits of modular structures in all product life phases by using knowledge management tools is topic of the second proposed approach.

## 1 Einleitung

Um individualisierte Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen anbieten zu können, sind Unternehmen vor die Herausforderung gestellt, dem Kunden eine möglichst große externe Angebotsvielfalt anzubieten und diese aus einer möglichst kleinen internen technischen Produkt- und Prozessvielfalt zu erzeugen. Zur Reduktion der internen Vielfalt haben sich verschiedene Ansätze entwickelt, wie z.B. die Entwicklung modularer Produktfamilien [1]. In vielen Firmen beobachten wir, wie dieser methodische Ansatz und andere Ansätze

---

zur Reduktion der internen Vielfalt durch modulare Strukturen innerhalb einzelner Projekte erfolgreich angewendet werden.

Für einen Schritt über einzelne Projekte hinaus zur Etablierung und kontinuierlichen Umsetzung dieses Vorgehens in den Unternehmenskontext fehlen bisher allerdings methodische Vorgehensweisen. Eine Perspektive ist hier der Blick über eine Produktfamilie hinaus in das Produktprogramm: Wie können Standardumfänge nicht nur innerhalb einzelner Produktfamilien, sondern darüber hinaus aus modularen Strukturen abgeleitet werden? Welche Möglichkeiten gibt es, Bedarfe nach Individualisierung und Standardisierung produktprogrammweit abzuwägen oder durch konstruktive Lösungen gleichermaßen ausreichend zu erfüllen? Zum anderen wird die kontinuierliche Umsetzung über die Lebensphasen des Produktes betrachtet: Wie kann sichergestellt werden, dass die Vorteile, die man in der Produktentwicklung durch modulare Strukturen erreichen wollte, in allen Lebensphasen umgesetzt und genutzt werden? Wie kann die Erfahrung in diesen Lebensphasen kontinuierlich in die Entwicklung von Nachfolgeprodukten einfließen? Für beide Perspektiven werden zurzeit Lösungskonzepte entwickelt, die den bestehenden Ansatz des Instituts zukünftig erweitern werden. Nach einer kurzen Beschreibung des bestehenden Ansatzes wird zunächst die Methodenerweiterung auf das Produktprogramm und anschließend die Erweiterung auf die Lebensphasen vorgestellt.

## **2 Der integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien**

Der integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien besteht aus einem methodischen Baustein zur Variantengerechten Produktgestaltung [2] und einem Baustein zur Lebensphasenmodularisierung [3] und wird derzeit durch weitere in der Entwicklung stehende Bausteine erweitert [1]. Die beiden bestehenden Bausteine wurden im Rahmen der Promotionsprojekte von Thomas Kipp und Christoph Blees entwickelt und in diversen Projekten angewendet. Das Ziel der variantengerechten Produktgestaltung ist es, Produktfamilien dem Idealbild variantengerechter Produkte anzunähern, z.B. indem Standard- und variante Anteile voneinander entkoppelt werden und eine 1:1-Zurodnung von differenzierenden Eigenschaften und Komponenten erzielt wird. Durch die Lebensphasenmodularisierung werden modulare Strukturen entwickelt, die das Nutzen von Vorteilen modularer Eigenschaften in allen Lebensphasen unterstützen sollen. Hier steht es nicht im Vordergrund eine modulare Struktur zu definieren, sondern mehrere den Lebensphasen entsprechende und diese aufeinander abzustimmen. Hintereinander ausgeführt beinhalten diese beiden Bausteine die Schritte der Zieldefinition, Ist-

---

Aufnahme, Variantengerechten Produktgestaltung, Technisch-funktionale und produktstrategische Modularisierung, Zusammenführung, Konzeptbewertung und –auswahl und Ableitung der Baustruktur. An der Durchführung dieses Vorgehens orientieren sich beide in Abschnitt 3 und 4 vorgestellten Ansätze.

### **3 Umsetzung modularer Strukturen im Produktprogramm durch Standardumfänge**

In verschiedenen Unternehmen werden Ansätze zur Entwicklung modularer Strukturen in Produktfamilien verfolgt, um zunehmender externer Varianz mit geringerer interner Varianz als bisher begegnen zu können. Zusätzlich zu diesen produktfamilieninternen Aktivitäten werden produktfamilienübergreifende Strategien verfolgt, um produktprogrammweit die interne Varianz durch das Umsetzen von Standardumfängen auf Basis modularer Strukturen zu reduzieren. Diese produktfamilieninternen und produktprogrammweiten Aktivitäten finden zumeist in unterschiedlichen organisatorischen Einheiten der Unternehmen statt. Bei einem Hersteller von Flurförderzeugen gibt es beispielsweise Bemühungen, das Ableiten von Varianten kostenoptimiert und in kürzerer Zeit als bisher durch die Entwicklung von Plattformen in den verschiedenen Produktfamilien zu ermöglichen. Gleichzeitig wurde außerhalb der Entwicklungsabteilungen dieser Produktfamilien eine zentrale Abteilung geschaffen, die Standardumfänge in Form sogenannter Konzernkomponenten entwickeln und in Verwendung innerhalb der Produktfamilien bringen soll. Die Identifikation entsprechender Umfänge mit Standardisierungspotenzial fällt allerdings schwer, weil große Teile der möglichen Umfänge innerhalb der Produktfamilien produktfamilienspezifisch optimal in die eigene Plattform integriert werden sollen. Eine Standardisierung über die Produktfamilien hinaus wird als störend bei der Entwicklung der eigenen Plattform empfunden. Um diesem Problem begegnen zu können, wurde in dem beschriebenen Unternehmen eine erste Fallstudie durchgeführt. Diese Fallstudie hatte zum Ziel

- ein Verständnis für Herausforderungen und Probleme bei der Entwicklung von Standardumfängen zu entwickeln (3.1),
- Möglichkeiten zur Nutzung des integrierten PKT-Ansatzes zu prüfen, um dem Unternehmen mit bekannten Werkzeugen begegnen zu können (3.2) und
- Bedarfe für weitere Literaturrecherche und zukünftige Forschungsaufgaben zu verstehen (3.3).

---

### 3.1 Komponenten im Spannungsfeld von Standardisierung und Differenzierung

Bevor in diesem Abschnitt beschrieben wird, warum die Entwicklung von Standardumfängen industrielle Unternehmen noch immer bzw. zunehmend herausfordert und wie die Produktentwicklung dem begegnen kann, werden zuerst begriffliche Grundlagen dargelegt.

#### 3.1.1 Begriffliche Grundlagen und Bezug zur Fachliteratur

Die Nutzung von Standardumfängen findet in der Literatur verschiedene Bezeichnungen. Während bei Erixon in [4] „Common units“ Bauteile, Komponenten oder Module beschreiben, die im gesamten Produktprogramm verwendet werden, wird von Hansen, Andreasen et al. in [5] „Reuse“ von Komponenten und Strukturen als Vorteil der Modularisierung aufgezeigt. Diese Wiederverwendung von Komponenten bezeichnet Dellanoi in [6] als Komponentenkommunalität. Der Begriff Kommunalität wird in diesen Quellen unterschiedlich verwendet. Während bei Dellanoi [6] Kommunalität zwar im Sinne einer „Schaffung sinnvoller Ähnlichkeiten der Produkte innerhalb einer Familie“ verstanden wird, bezieht sich die Komponentenkommunalität auf eine reine Gleichteileverwendung. Andreasen et al. [7] verwenden den Begriff Kommunalität für technische Lösungen, die Varianten für ein spezifisches System identisch wirken lassen. Ein solches System kann z.B. das Produktionssystem sein. Da es in diesen betrachteten Quellen hauptsächlich um die Entwicklung variantenreicher Produktfamilien und modularer Strukturen geht und die Nutzung standardisierter Umfänge einer von mehreren Aspekten darin ist, finden sich in diesen Quellen keine Methoden, die explizit bei der Entwicklung von Standardumfängen unterstützen. Da diese beschriebene erste Fallstudie dazu beitragen soll, ein Verständnis der Situation zu entwickeln, das dazu beiträgt, sich in bestehende Begrifflichkeiten und Methoden einordnen zu können, wurde zu Beginn darauf verzichtet sich für eines der oben geschilderten Begrifflichkeitskonzepte zu entscheiden. Stattdessen wird in diesem Beitrag der Begriff Standardumfang verwendet. Im integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien werden Standardkomponenten als solche Komponenten bezeichnet, die in allen betrachteten Varianten Verwendung finden. Angelehnt an diesen Begriff bezeichnet der Begriff Standardumfänge Bauteile, Komponenten oder Module, die in allen betrachteten Varianten Verwendung finden.

### 3.1.2 Unternehmensspezifische Standardisierungs- und Differenzierungsbedarfe

Die Entscheidung, ob eine Komponente standardisiert oder differenziert innerhalb einzelner Produktfamilien entwickelt wird, hängt von verschiedenen unternehmens- und produktspezifischen Faktoren ab. So weisen Argumente, die auf Stückzahleffekte und geringe Komplexität unternehmensinterner Prozesse verweisen, auf die Standardisierung einer Komponente als optimale Lösung. Zur Differenzierung bewegen Argumente, die eine optimale Anpassung an das Einzelprodukt sowohl aus Kosten- als auch aus Nutzersicht verweisen. Am Beispiel einer Komponente im Bedienfeld von Flurförderzeugen sind diese verschiedenen Argumente, die häufig in scheinbar widersprüchliche Richtungen weisen in Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Beispiele für unternehmensspezifische zum Teil scheinbar widersprüchliche Bedarfe

Diese Argumente sind auf verschiedene Bedarfe und ihre Ausprägung im Unternehmen zurückzuführen, die mit der Unternehmens- bzw. Produktstrategie zusammenhängen. So wird für ein Produkt im Premiumsegment, dessen Kunden Wert auf exklusives Produktdesign legen, das Argument für ein differenziertes Komponentendesign besonderes Gewicht haben. Für ein Unternehmen, das besonders Produkte für den Massenmarkt anbietet, haben Stückzahleffekte einen besonderen Wert, um möglichst viele Kunden durch konkurrenzfähige Preise anziehen zu können.

Für die Entwicklung von Standardumfängen sind diese Argumente, die in Bild 1 als ziehende Kräfte dargestellt sind, Faktoren, die verstanden werden müssen, um bedarfsgerecht zu standardisieren. Es muss ein Verständnis dafür gewonnen werden, welche dieser Faktoren wie wichtig im Zusammenhang des Unternehmens sind und welche produkt- und marktstrategischen Begrün-

dungen hinter diesen Faktoren stehen. Warum würde bei manchen Produkten eine Überdimensionierung von Komponenten zu große Nachteile im Pricing bedeuten? Welche Produktionsprozesse sind es genau, in denen eine Differenzierung nicht verträglich abgefangen werden kann? Auf Basis dieser Faktoren eine Entscheidung zu treffen, dass standardisiert oder nach Belieben differenziert wird, würde dazu führen, dass verschiedene dieser ziehenden Kräfte nicht beachtet werden sondern zu Gunsten stärkerer ziehender Kräfte nachgeben müssen. Da aber alle dieser Faktoren einen berechtigten Hintergrund im Unternehmen haben, würde das bedeuten verschiedene Unternehmensinteressen auszuklammern und nicht zu verfolgen. Eine bedarfsgerechte Standardisierung hingegen zielt auf eine Lösung ab, in der alle dieser Faktoren Berücksichtigung im Maße ihrer „Zugkraft“ im Unternehmen finden.

### 3.1.3 Mögliche bedarfsgerechte Lösungen der Produktentwicklung

Ist ein Verständnis für die unternehmensspezifisch bedarfsgerechte Ausrichtung zwischen Standardisierung und Differenzierung entwickelt worden, so können entsprechende Lösungsstrategien verfolgt werden. Mögliche Strategien sind in Bild 2 beispielhaft aufgeführt. Sie beinhalten, dass, sofern man sich für keine komplette Standardisierung der Komponente entscheidet, Varianten zugelassen werden, die aber durch ihre Gestaltung Standardisierung in unterschiedlich großem Umfang ermöglichen (vgl. Kommunalität nach Andreasen [7]). Bei einem hohen Differenzierungsbedarf (Bild 2, links) ist es beispielweise möglich durch eine vorteilhafte Gestaltung der Komponentenvarianten kommunale Prozesse zu ermöglichen, so dass standardisierte (Teil-) Prozesse die Aufwände in der Herstellung der Variante reduzieren. Eine weitere Lösung wäre, Schnittstellen zum Produkt, im Fall des Beispiels zum Flurförderzeug, zu standardisieren. So werden Stückzahleffekte bei den Bauteilen, die die Schnittstellen bilden, erzeugt und Lernkurveneffekte bei der Montage und im Service ausgenutzt. Ein größerer Umfang an Standardteilen ist möglich, wenn die Komponentenvarianten aus einem Baukasten konfiguriert werden können. Eine weitere Lösung unter Nutzung eines größeren Standardumfangs wäre eine Basiskomponente zu entwickeln und diese mit entsprechenden Elementen zum Upgrade für umfangreichere Varianten zu versehen. Diese Lösung würde es z.B. ermöglichen, die Differenzierung im Produktionsprozess möglichst nach hinten zu verlagern (Postponement).

Im Rahmen des Projektes zur Standardisierung einer Bedienfeldkomponente für Flurförderzeuge wurde die Lösungsstrategie gewählt, Komponenten zu konfigurieren. Dies beinhaltet die Entwicklung eines entsprechenden Baukastens, der im Weiteren als Komponentenfamilie bezeichnet wird.



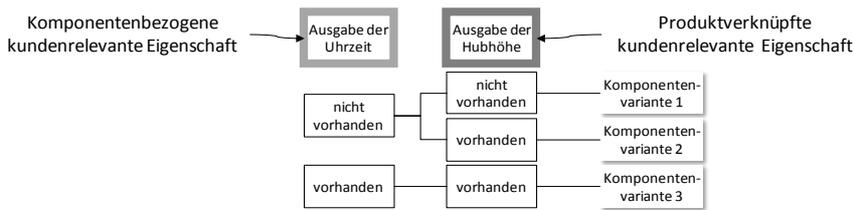


Bild 3: Aufnahme der externen Vielfalt mit Beispielen komponentenbezogener und produktverknüpfter Eigenschaften

Nach der Analyse der externen Vielfalt wird die interne Vielfalt auf Ebene der Funktionen, Wirkprinzipien und Bauteile der Komponente analysiert. Diese werden im Variety Allocation Modell (VAM) dargestellt, um sie dann dem Idealbild variantengerechter Produkte anzunähern.

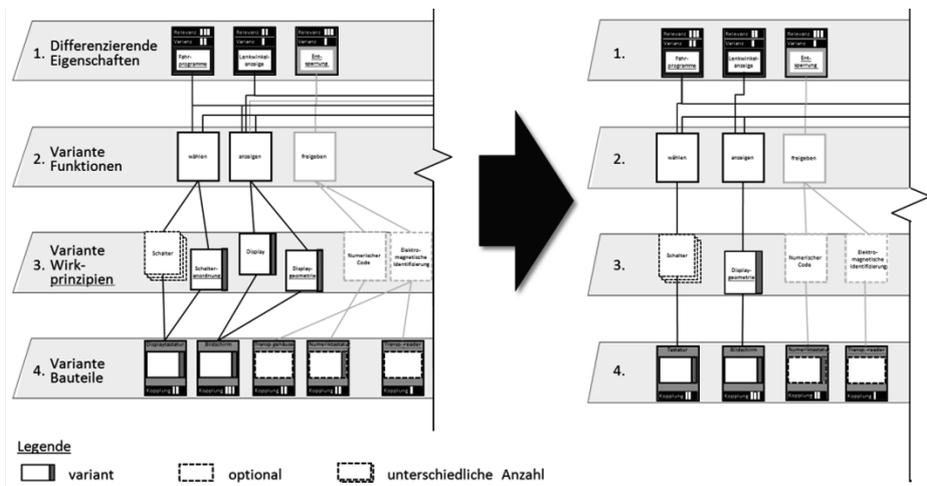


Bild 4: VAM vor (rechts) und nach (links) der variantengerechten Gestaltung

In Bild 4 erkennt man, dass es nicht vollständig gelungen ist, eine 1:1-Zuordnung von der 1. Ebene der Eigenschaften zur 4. Ebene der Bauteile zu erreichen, da besonders zwischen der 1. und 2. Ebene noch multiple Verknüpfungen vorliegen. Dies ist unter anderem darin begründet, dass viele produktverknüpfte Eigenschaften die Komponenten beeinflussen. Diese produktverknüpften Eigenschaften weisen durch die Betrachtung mehrerer Produktfamilien eine sehr große Vielfalt auf. Um hier einen Überblick über die geforderte externe Varianz und mögliche Standardisierungspotenziale zu be-

kommen, werden die Eigenschaften und ihre Ausprägungen in eine tabellarische Darstellung übertragen, die das Erkennen gleicher geforderter Ausprägungskombinationen ermöglicht. Auf diese Weise kann eine erste Standardisierung erfolgen, indem geforderte Eigenschaftsausprägungen gleicher oder ähnlicher Kombination zu Konfigurationsstufen zusammengefasst werden (Bild 5).

Im nächsten Schritt werden im Carry-over Chart die Eigenschaftsausprägungen durch Pfeile verbunden, die über die Konfigurationen hinweg gleich sind. Hier sieht man, wo Standardisierungspotenzial zwischen den Konfigurationen besteht, da gleiche Eigenschaften gefordert werden (Bild 6, links).

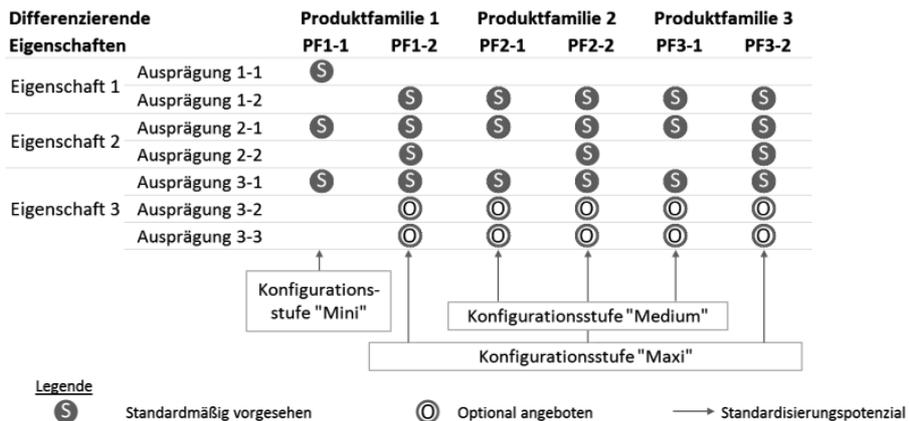


Bild 5: Erkennen möglicher Konfigurationsstufen im Carry-over Chart

Diese Betrachtung im Carry-over Chart ergänzt die Betrachtung im VAM an den Stellen, wo durch den großen Einfluss produktverknüpfter Eigenschaften keine komplette Entkopplung von Standardanteilen möglich ist. Hier kann man analysieren, wo ähnliche Konfigurationen oder zumindest einige gemeinsame Eigenschaften Potenzial zur Standardisierung über einige Konfigurationsstufen bieten. Das Carry-over Chart kann während der Lösungsfindung am VAM begleitend ebenfalls für die Ebenen der Funktionen Wirkprinzipien und Komponenten aufgestellt werden, um bei der Lösungsfindung zu verfolgen, welche Lösungen eine Verwirklichung des Standardisierungspotenzials ermöglichen. Bild 6 (rechts) zeigt das Carry-over Chart auf Ebene der Bauteile. Im betrachteten Beispiel war eine Überführung der Bauteile 1-3 nicht zweckmäßig, da diese Bauteile von besonders vielen produktbezogene Eigenschaften beeinflusst wurden, die große Unterschiede zur Maxi-Stufe aufwiesen.

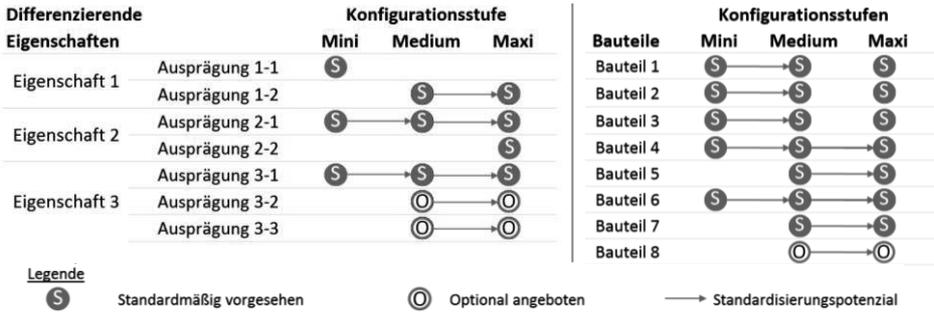


Bild 6: Standardisierungspotenzial zwischen den Konfigurationsstufen auf Ebene der kundenrelevanten Eigenschaften (links) und der Bauteile (rechts)

Analog zur Entwicklung modularer Produktfamilien wird auch bei der Entwicklung von Komponentenfamilien eine Lebensphasenmodularisierung durchgeführt, um Bauteile angepasst an die Lebensphasen der Komponenten zu Modulen zusammenzufassen. Dies ist im Module Process Chart (MPC) in Bild 7 dargestellt. Da auch diese Darstellung bisher nicht die Möglichkeit bietet, die einzelnen Konfigurationen über die Lebensphasen nachzuverfolgen, kann an dieser Stelle das Carry-over Chart der Bauteile hinzugezogen werden.

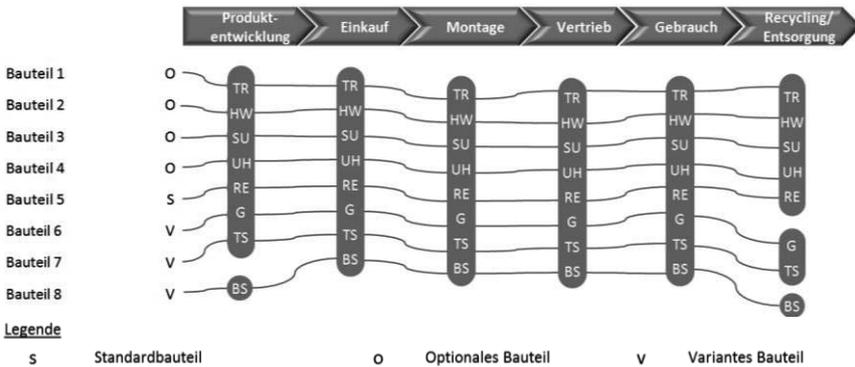


Bild 7: MPC der betrachteten Komponentenfamilie

Das beschriebene erstmalig angewendete Vorgehen zur Entwicklung modularer Komponentenfamilien führt auf eine Komponentenfamilie, in der die erforderlichen Komponenten zum Einsatz in 5 Produktfamilien mit diversen Flurförderzeugvarianten konfiguriert werden können (Bild 8). Dazu stehen die drei beschriebenen Konfigurationsstufen als Komponentenvarianten zur Verfügung sowie eine zusätzliche kombinierbare optionale Komponente. An die-

sem Beispiel ist zu erkennen, dass Standardisierung im gesamten Produktprogramm nicht durch bloße Gleichteilennutzung zu erzeugen ist.

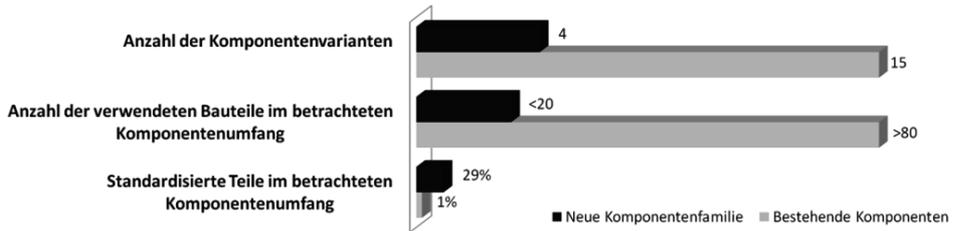


Bild 8: Vergleich einer neuen Komponentenfamilie gegenüber den betrachteten bestehenden Komponenten

Nur 29% der Teile sind in jedem der betrachteten Flurförderzeuge verbaut. Dennoch werden statt zuvor 15 nur noch 4 Komponenten verbaut, die aus weniger als 20 statt bisher mehr als 80 Bauteilen bestehen. Die Ziele höhere Stückzahlereffekte zu erzielen und weniger Sachnummern zu pflegen wurden auf diese Weise erreicht ohne die Anpassung anwendungsspezifischen Anforderungen oder Erwartungen von Premiumkunden zu vernachlässigen.

### 3.3 Zukünftige Forschungsaufgaben

Die Ergebnisse der Anwendung des integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien zeigen, dass dieser Ansatz dem Ziel höherer Stückzahlen durch das Nutzen von Standardumfängen genügt. Dennoch besteht Bedarf zur weiteren Evaluierung und Weiterentwicklung. Um parallel zur Arbeit mit VAM und MPC einen Überblick über Konfigurationen zu haben, wurde das Carry-over Chart entwickelt. Ein Ziel bei der Weiterentwicklung des Ansatzes soll es sein, die Informationen aus VAM und MPC jeweils um die des Carry-over Chart zu erweitern. Dabei ist besonders beim VAM eine Vereinfachung der bisherigen Darstellung zu erzielen, um die Übersichtlichkeit zu wahren. Eine Fortsetzung der Literaturrecherche im Bereich Gleichteile und Standardisierung soll helfen, den Ansatz auf Schwächen zu prüfen und durch Integration von Elementen bestehender Ansätze auszubauen. Im Besonderen soll recherchiert werden, wie in anderen Methoden die Information, die hier im Carry-over Chart dargestellt wurde, behandelt wird.

Die in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten möglichen Lösungen werden in der Fachliteratur teilweise als verschiedene Formen von Kommunalität bezeichnet. Das Lösungsfeld zur Ausbalancierung von Standardisierung und Differenzier-

Die Forschung soll zukünftig tiefgreifender recherchiert werden und in den methodischen Ansatz integriert werden. Da es sich hier nicht nur um die Nutzung von Standardumfängen handelt, sondern z.B. auch um die Vorbereitung des Produktes für Prozesskommunalität, wird für die zukünftige Forschung der Begriff Standardumfänge auf Kommunalität ausgeweitet.

Zu Beginn des Abschnitt 3 wurde beschrieben, dass es in einigen Unternehmen Produktstrukturansätze wie die Plattformentwicklung sind, die das flächige Definieren und Umsetzen von Standardumfängen erschweren. Hier stellt sich die Frage, ob sich verschiedene Aktivitäten zur Reduktion interner Varianz über das gesamte Produktprogramm betrachtet stören können. Ein Beispiel hierfür ist schematisch dargestellt. Hier wird angenommen, dass bestimmte Produktstrukturen gewisse Vorteile modularer Strukturen ermöglichen und andere Vorteile schlechter zur Geltung bringen. Kann dieser Zusammenhang nachgewiesen werden? Wie sähe in dem Fall eine anhand der Unternehmensziele abgestimmte Produktstrukturstrategie aus, durch die man die im Unternehmenskontext wichtigen Vorteile adäquat erzielt? Wie kann diese umgesetzt werden? Diese Fragen sollen Inhalt weiterer Forschungsaktivitäten sein.

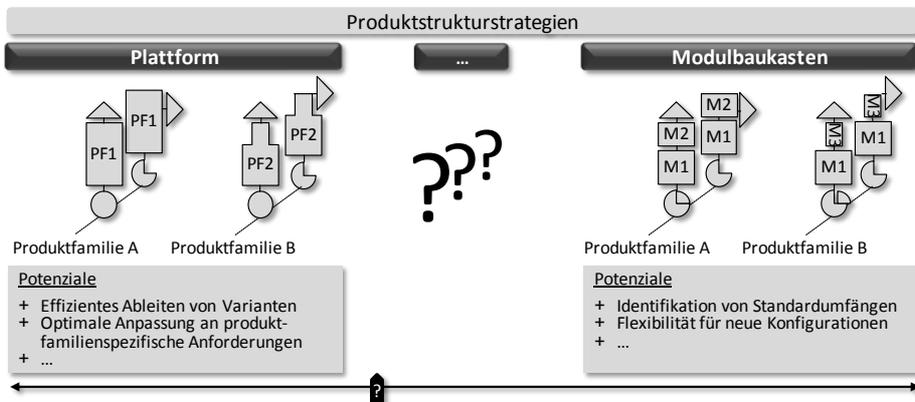


Bild 9: Mögliche Zusammenhänge, die eine Ausbalancierung der Produktstruktur anhand der Unternehmensziele erfordern

## 4 Rückführung von Erfahrungswissen aus den Produktlebensphasen

Dieser Teil des Beitrags untersucht, wie Erfahrungen produktlebensbegleitend methodisch aufgenommen und in Form von Anforderungen in die Produktfamilienentwicklung eingebracht werden können. Außerdem sollen die Annahmen und Entscheidungen, die während der Entwicklung getroffen wurden und die modulare Produktstruktur beeinflusst haben, im Produktleben überprüft werden. Dies bedeutet bildlich gesprochen, dass die Produktentwicklung nicht mehr allein als Steuerung fungiert, sondern mittels Erfahrungsrückführung sowie Überprüfung von Anforderungen und Entscheidungen zur Regelung erweitert wird (Bild 10). Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Fragestellung, welche Hilfsmittel die Disziplin des Wissensmanagement bietet, um Wissen gezielt aufzunehmen und zurückzuführen sowie welches Wissen im Produktleben aufgenommen werden muss, da es als Eingangsinformation für die Produktentwicklungsmethoden dient? Dazu werden bestehende Konzepte des Wissensmanagements betrachtet, der Wissensbedarf des bestehenden Ansatzes untersucht und hieraus ein konzeptionelles Rahmenwerk zur Erweiterung des PKT-Ansatzes abgeleitet.

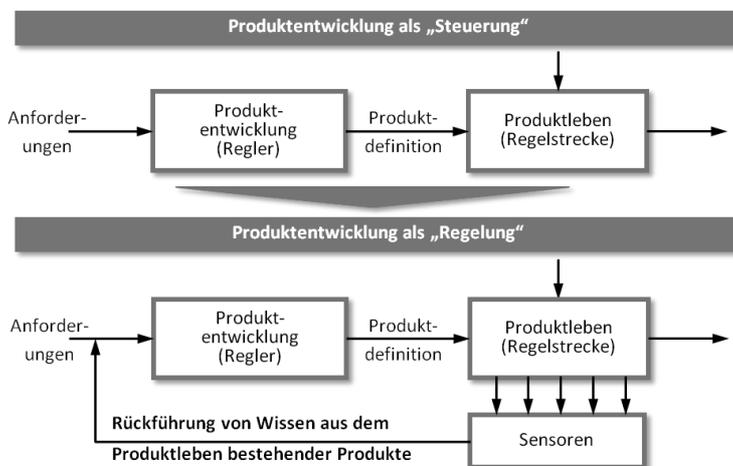


Bild 10: Rückführung von im Produktleben gewonnenen Erfahrungen

### 4.1 Bestehende Methoden zur Aufnahme von Wissen

Die Ressource Wissen wird für Unternehmen immer entscheidender, um im globalen Wettbewerb bestehen zu können. Zudem vollzieht sich ein Wandel von der Industriegesellschaft hin zur Wissens-(Informations-)gesellschaft

[8]. Das Wissensmanagement hat deshalb das Ziel, ein Unternehmensumfeld zu schaffen, das die Nutzung von Unternehmenswissen fördert und zur Entwicklung erfolgreicher Produkte beiträgt. Es stellt ebenfalls konkrete methodische Werkzeuge zum operativen Umgang mit Wissen bereit, auf die nach der Definition von Wissen eingegangen wird.

„Wissen bezeichnet die Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden“ [9]. In einen Kontext gestellte Daten werden zu Informationen, vernetzte Informationen bilden Wissen. Dieser Prozess ist jedoch stetig, sodass eine scharfe Abgrenzung nicht möglich ist, wie Bild 11 verdeutlicht. Zusätzlich unterscheidet die Literatur explizites und implizites Wissen. Explizites Wissen ist z.B. nach Bullinger [8] beschreibbares, formalisierbares, zeitlich stabiles Wissen, welches z.B. schriftlich oder in Datenbanken gespeichert werden kann. Hingegen ist implizites Wissen schwer zu formalisieren und nur in den Köpfen der Mitarbeiter vorhanden. Die Fähigkeit eines erfahrenen Konstrukteurs, intuitiv die Dimensionen einer Neukonstruktion grob der Lastsituation anzupassen, ist beispielsweise implizites Wissen.

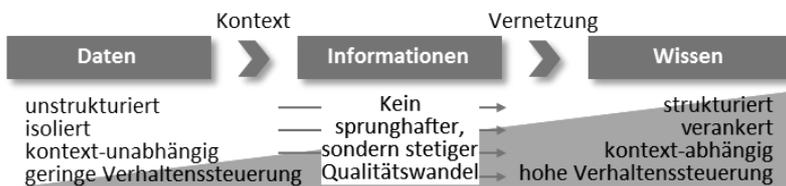


Bild 11: Abgrenzung von Daten, Informationen und Wissen vgl. [9]

Probst [9] unterteilt das Wissensmanagement in die Kernprozesse Wissensidentifikation, Wissenserwerb, Wissensentwicklung, Wissens-(ver)teilung, Wissensnutzung und Wissensbewahrung. Ergänzt um die Definition von Wissenszielen und Wissensbewertung beschreiben diese Bausteine des Wissensmanagements einen Managementkreislauf (Bild 12).

Jedem der Bausteine können methodische Werkzeuge zugeordnet werden, die teilweise zur Rückführung von Wissen aus den Produktlebensphasen betrachtet werden sollten. Lessons learned ist z.B. ein Werkzeug mit dem Projektteams zum Projektabschluss die positiven und negativen Erfahrungen reflektieren und dieses Wissen für die Verbesserung zukünftiger Projekte sichern können [10]. Lessons learned kann so unter anderem den Bausteinen Wissensverteilung und –bewahrung zugeordnet werden. In Wissenslandkar-

ten sind Träger von Spezialwissen strukturiert, auf deren Wissen so in der Entwicklung gezielt zugegriffen werden kann (Wissensbausteine Wissensidentifikation und –verteilung). Für eine ausführliche Aufstellung von Werkzeugen sowie Zuordnungen zu den Bausteinen sei z.B. auf Völker [11] verwiesen.

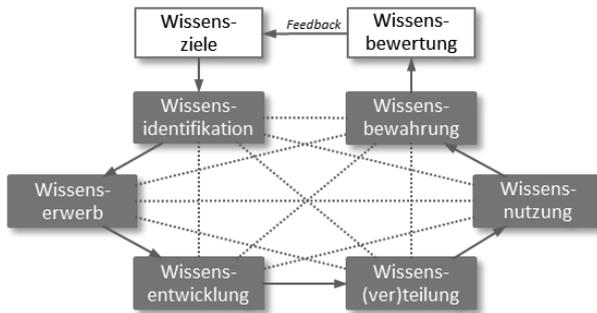


Bild 12: Bausteine des Wissensmanagements. [9]

Neben der hier vorgestellten Grundlagenliteratur des Wissensmanagements, gibt es in der Forschung der Produktentwicklung Bestrebungen, das bestehende Wissen in den Entwicklungsprozess einzubinden. Beispiele hierfür sind Ansätze der wissensbasierten Konstruktion [12] oder Arbeiten über die Wissensbereitstellung in der lebenszyklusorientierten Produktentwicklung [13]. Bei einer weiteren Verfolgung des erweiterten Ansatzes bedürfen diese Werke einer ausführlichen Betrachtung.

## 4.2 Analyse des zur Produktstrukturierung benötigten Wissens

Zur gezielten Nutzung von Wissen aus dem Produktleben und zur Reflexion der während der Produktstrukturierung getroffenen Entscheidungen wird ein Überblick über den Wissensbedarf und das erzeugte Wissen des bestehenden Ansatzes benötigt. Tabelle 1 gibt eine vereinfachte Übersicht über die durchgeführte Analyse des Ansatzes nach [3]. Es wird dabei unterschieden, ob „überwiegend explizites Wissen / Information“, „überwiegend implizites und verborgenes explizites Wissen“ oder „teilweise explizites und teilweise implizites Wissen“ vom Projektteam benötigt bzw. generiert wird. Dabei gilt es zu beachten, dass die Abgrenzung der Wissensarten immer unscharf ist (vgl. 4.3) und zusätzlich vom Anwendungsumfeld abhängt, sodass hier nur Tendenzen aufgezeigt werden können. Das Team benötigt z.B. während aller Schritte Wissen über die Anwendung der Methode. Dieses ist überwiegend explizit in Form der Methodenbeschreibung vorhanden. Gleichzeitig können die Teammitglieder jedoch auch durch implizites Wissen (Erfahrungen im

Umgang mit der Methode) die Anwendung effektivieren und benötigen die grundlegende Denkweise eines Entwicklers (implizit), auf die sich die Methode stützt. Durch die Anwendung der Methode vertiefen die Teammitglieder wiederum ihr Methodenwissen, welches deshalb in Tabelle 1 als generiertes Wissen aufgeführt ist und als überwiegend implizit klassifiziert wurde.

Tabelle 1: Wissensbedarf und generiertes Wissen des Ansatzes nach [3]

Schritt	Wissensbedarf des Produktstrukturierungsteams	Generiertes Wissen
alle	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ / 🗨 Wissen über die Methode</li> <li>☞ / 🗨 Ergebnisse vorheriger Schritte</li> <li>🗨 Unternehmenskultur/-ziele/-struktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>🗨 Vertieftes Wissen über Methode und Produkt im Projektteam</li> </ul>
Zieldefinition	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Anforderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Transparentes Zielsystem</li> </ul>
Ist-Aufnahme	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Arbeitsergebnisse der Konzept und Entwurfsphase</li> <li>☞ Kosten der Komponenten</li> <li>☞ Konstruktive Merkmale</li> <li>☞ / 🗨 Variantenvielfalt</li> <li>☞ / 🗨 Unterscheidungsmerkmale und Ausprägungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Gestaltung/Flüsse</li> <li>☞ Varianz in den differenzierenden Eigenschaften</li> <li>☞ Funktionen/ Wirkprinzipien/ Komponenten</li> <li>☞ ABC-Kosten-Clusterung der Komponenten</li> </ul>
Variantengerechte Produktgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ / 🗨 Lösungsprinzipien</li> <li>🗨 Abstraktionsvermögen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Konzept der variantengerechten Gestaltung</li> </ul>
Technisch-funktionale Modularisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>🗨 Technisches (Produkt-) Verständnis zur Ableitung der Module</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Konzept technisch-funktionale Modularisierung</li> </ul>
Produktstrategische Modularisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ / 🗨 Lebensphasenanforderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Modularisierungskonzepte aus Sicht einzelnen Lebensphasen</li> </ul>
Zusammenführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>🗨 Fähigkeit zum gegenseitigen Abwägen der Sichten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Modularisierungskonzepte aus Sicht aller Lebensphasen</li> </ul>
Konzeptbewertung und -auswahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>🗨 Kritisches Hinterfragen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Ausgewähltes Konzept</li> </ul>
Ableitung der Baustruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ / 🗨 Technisches Wissen Schnittstellengestaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Modulares Konzept und Schnittstellengestaltung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ überwiegend explizites Wissen / Information</li> <li>🗨 überwiegend implizites und verborgenes explizites Wissen</li> <li>☞ / 🗨 teilweise explizites und teilweise implizites Wissen</li> </ul>		

Es wird weiterhin deutlich, dass im Schritt Ist-Aufnahme ein hoher Bedarf an explizitem Wissen als Eingabe für die Methode benötigt wird. Dieses Wissen kann zum Teil bereits strukturiert im Unternehmen vorliegen, sodass hier die vornehmliche Aufgabe des Wissensmanagements in der schnellen Bereitstellung dieser bestehenden Wissens liegen sollte (Wissens-(ver)teilung, Wissensnutzung). Zum anderen wurde in der Anwendung des Ansatzes jedoch

---

auch deutlich, dass in Unternehmen z.B. Transparenz über die Varianz der Produkte fehlt, hier also kein strukturiertes speicherbares Wissen vorliegt. An dieser Stelle schafft die bestehende Methode Transparenz und Struktur, deckt also das als verborgen gekennzeichnete Wissen auf und überführt es in explizites Wissen. Hier könnte Wissensmanagement z.B. unterstützen die relevanten Träger des Wissens aufzuzeigen (Wissensidentifikation). Weiterhin bestehen noch keine Ansätze, wie die erzeugte Transparenz in diesem Schritt aber auch weitere Zwischenergebnisse außerhalb des Projektteams weiter im Unternehmen verteilt und genutzt werden können (Wissens-(ver)teilung, Wissensnutzung, Wissensbewahrung).

Der Schritt Produktstrategische Modularisierung benötigt explizites und implizites Wissen aus den Produktlebensphasen, an welche die Modularisierung angepasst werden muss. Hierfür werden Workshops unter Beteiligung von Experten aus den Fachabteilungen durchgeführt. Die Qualität der Berücksichtigung der Lebensphasen hängt somit von der Auswahl der Wissensträger ab, woraus sich wiederum ein Ansatzpunkt für die Unterstützung durch Methoden des Wissensmanagements z.B. aus dem Wissensbaustein Wissensidentifikation ergibt. Außerdem werden diese Daten nur zu einem Zeitpunkt in einer kleinen Gruppe erhoben. Dies hat zur Folge, dass das Erfahrungswissen der Mitarbeiter der jeweiligen Lebensphasen nur begrenzt zur Verbesserung der Produktstrukturen genutzt werden kann. Auf diese Weise erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass entscheidende Anforderungen an die Produktstruktur übersehen werden. Während der Schritte Zusammenführung sowie Konzeptbewertung und -auswahl bedarf es einer intensiven Kommunikation, um finale aufeinander abgestimmte Produktstrukturierungen festzulegen. Die aktuelle Methode dokumentiert den Entscheidungsfindungsprozess und schafft so Transparenz. Sie sieht jedoch nicht vor, dass die getroffenen Entscheidungen und deren Auswirkungen im Produktleben methodisch hinterfragt werden, um daraus Schlüsse zur Verbesserung der zukünftigen Entscheidungsfindung und der Produktstrukturierung neuer Produkte zu ziehen. Außerdem wird nicht beschrieben, wie das gefundene Produktstrukturierungskonzept den an den Lebensphasen beteiligten Abteilungen vermittelt wird, damit diese es umsetzen und die erwünschten Verbesserungen voll zum Tragen kommen.

### **4.3 Konzept eines Methodenbausteins zur Rückführung von Wissen aus den Produktlebensphasen**

Aus der vorherigen Analyse werden Handlungsschwerpunkte zur verstärkten Nutzung von Wissen aufgegriffen und in ein Rahmenwerk (Bild 13) zur Entwicklung des Methodenbausteins überführt. Die produktleben-begleitende Aufnahme von Anforderungen aus den Lebensphasen soll es ermöglichen,



---

dem Projektteam einfach zugänglich zu machen. Auf der anderen Seite wird durch die Anwendung der Methode expliziertes Wissen generiert, das Transparenz über die Varianz und Strukturierung der Produktfamilie liefert und deshalb gezielt mithilfe des Wissensmanagements im Unternehmen genutzt werden sollte.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung des bestehenden integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien wurde bisher erfolgreich in verschiedenen Unternehmen eingesetzt. Für eine kontinuierliche Umsetzung im Unternehmen bedarf es der Ausweitung auf das Produktprogramm. Um die Vorteile modularer Strukturen nutzen zu können, ist eine Umsetzung von Standardumfängen im Produktprogramm ein wichtiger Aspekt. Diese wird oft durch verschiedene scheinbar widersprüchliche Bedarfe verhindert. Daher wird ein Ansatz aufgezeigt, der Produktentwickler unterstützen soll, durch die Entwicklung von Komponentenfamilien bedarfsgerecht zu standardisieren und benötigte Differenzierung zuzulassen. Dieser Ansatz wird zukünftig weiterentwickelt. Zusätzlich soll untersucht werden, wie Produktstrukturstrategien so gewählt werden, dass scheinbar widersprüchliche Bedarfe produktfamilienübergreifend ausbalanciert werden können, so dass modulare Strukturen die strategischen Ziele des Unternehmens besser unterstützen.

Auch der zweite vorgestellte Ansatz beschäftigt sich mit dem Nutzen modularer Strukturen für das Unternehmen. Die durchgeführte Untersuchung des Wissensbedarfs des bestehenden Ansatzes zeigte potentielle Einsatzgebiete der Wissensmanagementbausteine bzw. der zugehörigen methodischen Werkzeuge. Hieraus wurde ein methodisches Rahmenwerk abgeleitet, dass als Entwicklungsgrundlage eines Methodenbausteins des PKT-Ansatzes dienen wird. Dieser Baustein soll in der Zukunft den gezielten Einsatz von Wissen im Produktstrukturierungsprozess fokussieren, um in der Produktentwicklung angestrebten Vorteile der Modularisierung in ihrer Umsetzung zu optimieren. Zukünftig wird die Literaturanalyse bestehender Konzepte des gezielten Wissensensatzes in der Produktentwicklung ausgeweitet, um das aufgezeigte Grundkonzept soweit zu detaillieren, dass ein erster Praxistest des Methodenbaustein in der Praxis ermöglicht werden kann.

## Literatur

- [1] Krause, D.; Eilmus, S.: "Methodical Support for the Development of Modular Product Families", in: *The Future of Design Methodology*, Springer, Berlin, 2011.

- 
- [2] Kipp, T.; Bles, C.; Krause, D.: "Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien", in Design for X: Beiträge zum 21. DfX-Symposium, Hamburg, 2010.
- [3] Bles, C.: "Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien", TuTech Verlag, Hamburg, 2011.
- [4] Erixon G.: "Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation", Stockholm: Royal Institute of Technology, 1998.
- [5] Hansen, P. K. et al.: "Understanding the Phenomenon of Modularization", in Design 2002: Proceedings of the 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002.
- [6] Dellanoi, R.: "Kommunalitäten bei der Entwicklung variantenreicher Produktfamilien", Difo-Druck GmbH, Bamberg, 2006.
- [7] Andreasen, M. M.; Mortensen N. H.; Harlou, U.: "Multi Product Development: New models and concepts", in Design for X: 15. Symposium, Neukirchen, 2004.
- [8] Bullinger, H.-J.; Wörner, K.; Prieto, J.: "Wissensmanagement heute: Daten, Fakten, Trends", Fraunhofer IAO, Stuttgart, 1997.
- [9] Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: "Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen", Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [10] North, K.: "Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen", Gabler, Wiesbaden, 2011.
- [11] Völker, R.; Sauer, S.; Simon, M.: "Wissensmanagement Im Innovationsprozess": Physica, Heidelberg, 2007.
- [12] Vajna, S.: "Approaches of Knowledge-Based Design" in Design 2002: Proceedings of the 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002.
- [13] Mansour, M.: "Informations- und Wissensbereitstellung für die lebenszyklusorientierte Produktentwicklung", Vulkan-Verlag, Braunschweig, 2006.

## Erweiterung der MID-Produktentwicklung um ein optisches Partialmodell

Christian Fischer und Jörg Franke

*Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

In this paper, the typical product development process for spatial Molded Interconnect Devices (3D-MID), the underlying product model as well as the addition of an optical partial model are presented. The methodology of integrating mechanical and electronic layout design will be discussed. At this juncture, it will be shown which specific steps are necessary for the development of products made in MID technology. This is followed by a description of the extension of electromechanical CAD data by an optical data model. The methodology of data collection for the optical partial model is also explained.

### 1 Einleitung

Ein Großteil der derzeit umgesetzten Innovationen in technischen Fachdisziplinen wie dem Maschinenbau wird durch mechatronische Produkte dargestellt. Dies führt dazu, dass eine stetig wachsende Zahl mechanischer Produkte zusätzlich mit Elektronik bestückt werden muss. Auf Grund der räumlichen Enge in den daraus resultierenden komplexen Systemen wird zunehmend eine räumliche Integration mechanischer und elektrischer bzw. elektronischer Funktionen in einer einzigen Baugruppe angestrebt. Dies betrifft Bereiche wie die Kommunikations- und Medizintechnik ebenso wie die Automobilindustrie. Durch die Reduzierung der Einzelteile im Vergleich zum klassischen Ansatz wird einerseits die Produktion kostengünstiger und andererseits die Gestaltungsfreiheit dieser speziellen Klasse mechatronischer Produkte erhöht. Zahl-

---

reiche Serienprodukte werden bereits als sogenannte Molded Interconnect Devices (3D-MID) gefertigt. [2]

In der universitären Forschung wird stetig über eine Erweiterung der MID-Technologie nachgedacht. Da die aktuelle Entwicklung der Elektronik in Richtung Optoelektronik tendiert, ist die Übertragung der Ansätze auf räumliche elektronische Baugruppen zu prüfen. Am Lehrstuhl FAPS wird deshalb die Integration optoelektronischer Bauelemente, verbunden durch polymere Lichtwellenleiter, in 3D-MID angestrebt. Die Vorteile dieser Kombination aus elektronischer Datenverarbeitung und optischer Signalübertragung liegen in der Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern, in einer überlegenen Bandbreite verglichen mit Leiterbahnen aus Kupfer [9] sowie in dem, in Zukunft an Bedeutung gewinnenden, niedrigeren Energieverbrauch. Durch die Integration der Optik als weitere Fachdisziplin in die Produktentwicklung von 3D-MID entsteht die Notwendigkeit, die Methodik entsprechend anzupassen bzw. zu erweitern. In diesem Beitrag wird zunächst die interdisziplinäre Produktentwicklung von 3D-MID in den einzelnen Vorgehensweisen und in der softwaretechnischen Umsetzung vorgestellt und im Anschluss auf die ersten Schritte zur Erweiterung um die neue Fachdisziplin Optik eingegangen.

## **2 Rahmenbedingungen und Lösungsansätze für die Produktentwicklung von 3D-MID**

Die Produktentwicklung von 3D-MID erfordert neue Ansätze, um die erforderliche domänenübergreifende Rolle annehmen zu können. Da für die MID-Technologie noch kein einheitliches systematisches Vorgehen existierte, wurden die klassischen Vorgehensweisen zur mechanischen und elektronischen Produktentwicklung analysiert, die für 3D-MID relevanten Entwicklungsprozesse identifiziert und in einer integrierten Entwicklungsumgebung zusammenfasst. Bei den folgenden Erläuterungen liegt das Modell von Pahl/Beitz [7] zur Produktentwicklung zu Grunde.

### **2.1 Fertigungstechnische Anforderungen an 3D-MID**

Die Planungsphase mit der Erstellung von Lasten- und Pflichtenheft bleibt durch den Einsatz der MID-Technologie unberührt. Jedoch wirkt sich deren Verwendung bei der Lösungsfindung in der Konzeptphase aus, da gezielt die Integration von Mechanik und Elektronik in einem Produkt betrachtet werden muss. Das Rationalisierungspotential der MID-Technologie entfaltet sich nur, wenn das Produkt von Beginn an als 3D-MID konzipiert wird. Ein Redesign auf

---

Basis der klassischen Aufteilung Mechanik/Elektronik führt selten zum Erfolg [6].

In der Entwurfsphase ist auf die fertigungsgerechte Auslegung des Produkts zu achten, bedingt durch die enge Verzahnung von Produkt und Produktionsverfahren bei der MID-Technologie [4]. Die Manufacturing Rule Checks (MRC) hängen stark von den verwendeten Strukturierungs- und Metallisierungsverfahren sowie von der Aufbau- und Verbindungstechnik, z. B. in Form der 3D-Bestückung, ab. Als anschauliches Beispiel dienen die Laser-Direkt-Strukturierung (LDS) [5] und das 2K-Spritzgussverfahren [2]. Beim LDS findet während des Spritzgusses eine Dotierung des flüssigen Kunststoffes mit Metallatomen statt. Auf der Oberfläche des ausgehärteten thermoplastischen Grundkörpers wird per Laser der Leiterbahnverlauf strukturiert. Der Laserstrahl fokussiert durch eine aufwändige Optik innerhalb eines quaderförmigen Volumens auf der Bauteiloberfläche und raut diese auf. Mittels der Dotierung werden die oben erwähnten Metallatome ebenfalls an den rauen Stellen freigelegt, so dass sich bei der anschließenden Galvanisierung Kupfer abscheidet. Die Fertigungsvorbereitung für das LDS liegt in der virtuellen Abtastung des räumlichen Leiterbahnverlaufs mit der Laserstrahlbreite unter Berücksichtigung potentieller Abschattungen durch die Bauteilgestalt. Beim 2K-Spritzguss dagegen handelt es sich um eine Abwandlung des Kunststoffspritzgusses, der die Leiterbahnstruktur im Spritzgusswerkzeug abbildet. Beim ersten Schuss wird der räumliche Schaltungsträger erzeugt und beim zweiten ein stromleitender Kunststoff in den zuvor freigelassenen Leiterbahnverläufen eingeleitet. Für diesen Prozess ist die Eignung zur Fertigung durch die Anbindung an eine Spritzgussimulation, also an ein FEM-Tool, zu prüfen. Diese beiden Beispiele zeigen, dass die Herstellungsverfahren sowohl Auswirkungen auf das 3D-Modell des Schaltungsträgers und die Leiterbahnrepräsentation als auch auf die Ableitung von Fertigungsinformationen und damit die bereitzustellenden CAD-Daten haben.

Schon frühzeitig im Entwicklungsprozess muss neben den Produktionsverfahren auch die Materialwahl für das Substrat des thermoplastischen Grundkörpers in die Überlegungen miteinbezogen werden. Das Material muss einerseits für den jeweiligen Herstellungsprozess geeignet sein (Design for Manufacturing), wie am Beispiel des LDS gut nachzuvollziehen ist, und andererseits eine ausreichende Haftfestigkeit für Lot und Metalle aufweisen, so dass diese den geplanten Produktlebenszyklus unbeschadet überstehen. [4]

---

## 2.2 Adaption von CAD-Systemen für die integrierte Entwicklung von MID-Produkten

Die bisherige klassische Aufteilung zwischen mechanischer Konstruktion und elektronischem Layout, repräsentiert durch MCAD-Systeme und Tools für die Electronic Design Automation (EDA), scheitert an der Layoutgestaltung räumlicher elektronischer Baugruppen [3]. Der Grund liegt in den Unterschieden der Entwicklungsumgebungen und deren Datenmodellen. In der Konstruktion können zwar 3D-Modelle des räumlichen Schaltungsträgers sowie der elektronischen Bauelemente erzeugt werden, jedoch fehlt die Angabe der elektrischen Belegung der Pins an den Bauelementen. Dementsprechend er mangelt es MCAD-Systemen an der Erkennung der elektrischen Verbindungen. Diese können nur aufwändig in manuellem Vorgehen als Volumenmodelle konstruiert werden, jedoch werden Änderungen in den elektrischen Netzen nicht registriert und übernommen. Vergleichbar ist die Situation im elektronischem Layout, dessen 2D-Entwicklungsumgebung sich auf das Layout flacher Leiterplatten (Printed Circuit Boards, PCB) bzw. mehrlagiger Boards beschränkt und dem es an einer Unterstützung für räumliche Schaltungsträger fehlt. Dies verhindert sowohl die Platzierung elektronischer Bauelemente und die Entflechtung der Leiterbahnen zwischen diesen als auch die Design Rule Checks (DRC).

Am Lehrstuhl FAPS wurde dem erkannten Handlungsbedarf mit der schwerpunktmäßigen Betrachtung der Ausarbeitungsphase bezüglich Konstruktion und Layoutgestaltung begegnet. Dabei hat sich die im Folgenden dargestellte Systematik herauskristallisiert (vgl. Bild 1). Der räumliche thermoplastische Grundkörper wird in einem 3D-MCAD-System unter Einbeziehung einer fertigungsgerechten Auslegung durch die Spritzgusssimulation konstruiert. Ebenso erfolgt die 3D-Modellierung der elektronischen Bauelemente. Da diese ähnlich wie Normteile als Standardbauteile regelmäßig Verwendung finden, bietet sich die Speicherung in einer datenbankbasierten Bauteilbibliothek an. Hierbei wird die Querverbindung zur Elektronik hergestellt, indem die elektrischen Belegungen der Pins und die Bauteilbezeichnungen aus der entsprechenden ECAD-Bibliothek zusätzlich hinterlegt werden. Dies erfordert eine Erweiterung der typischen MCAD-Datenstruktur um ein elektrisches Partialmodell (vgl. Bild 3). Weiterhin werden das Importieren von Netzlisten aus der klassischen Schaltungssynthese und das Laden der elektronischen Bauelemente aus der Bauteilbibliothek ermöglicht.

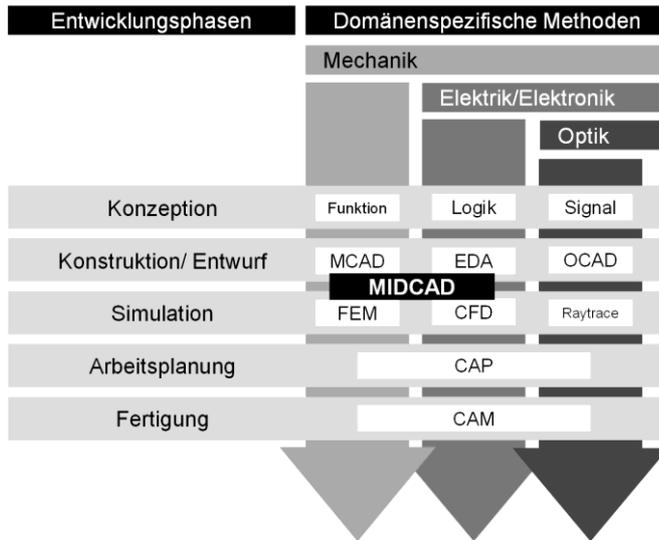


Bild 1: Einordnung von MIDCAD in die Produktentwicklung von 3D-MID als spezielle mechatronische Produkte

Da die elektrischen Verbindungen zwischen den Bauelementen bereits aus der Netzliste entnommen werden, können die Bauelemente unter Berücksichtigung möglichst kurzer und überschneidungsfreier Leiterbahnen platziert werden. Somit wird die Entflechtung erleichtert, wobei für diese spezielle Routingfunktionen aus ECAD nach MCAD übernommen wurden. Diese Routingfunktionen bilden einerseits die Pin-zu-Pin-Verbindungen graphisch ab und assistieren dem Konstrukteur basierend auf einem Oberflächengitter bei der Verlegung der Leiterbahnen. In diesem Zusammenhang sind MID-spezifische DRC und MRC einzusetzen, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten. [1]

### 2.3 Software-Demonstrator MIDCAD

Die Basis eines Tools für die Konstruktion von 3D-MID muss technologiebedingt eine 3D-Entwicklungsumgebung bieten. Deshalb wurde am Lehrstuhl FAPS das Plug-In MIDCAD für das CAD-System Pro/Engineer Wildfire konzipiert und implementiert (vgl. Bild 2). In der MID-spezifisch erweiterten Entwicklungsumgebung stehen Funktionen für die 3D-Modellierung des Schaltungsträgers, für den Import von Netzlisten aus der Schaltungssynthese, für die Platzierung elektronischer Bauelemente, für das Routing der Leiterbahnen, für Design-Rule-Checks (DRC) sowie für die Fertigungsanbindung zur Verfü-

gung. Ebenso ist die direkte Integration der Spritzgussimulation und die Anbindung der thermischen Simulation in Form von Computational Fluid Dynamics (CFD) realisiert. [8]

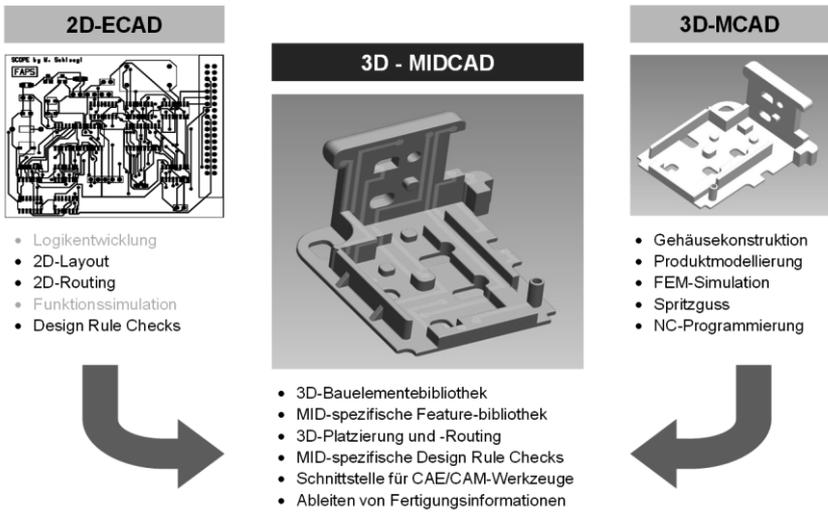


Bild 2: MIDCAD integriert die erforderlichen Funktionen aus ECAD und MCAD in das CAD-System Pro/Engineer Wildfire

### 3 Bedarf für die Ergänzung MID-spezifischer Partialmodelle um die Optik

Nach der erfolgreichen Demonstration der integrierten Entwicklung für Mechanik und Elektrik in MIDCAD wird im Folgenden die Ausrichtung der MID-Technologie auf die Optoelektronik dargelegt. Die gesteigerten Anforderungen für die Produktentwicklung optoelektronischer 3D-MID bezüglich der optischen Signalübertragung sowie der Unterstützung entsprechend neuer bzw. adaptierter Fertigungsverfahren erfordern das Einbeziehen fachspezifischer Vorgehensweisen aus der Optik. Den bereits vorhandenen Layouttools für optoelektronische Baugruppen auf flachen Leiterplatten fehlt, genauso wie den klassischen EDA-Systemen, jedoch die Voraussetzung zur Gestaltung von 3D-MID. Da eine Erweiterung der genannten Werkzeuge bezüglich räumlicher Schaltungsträger auf Grund der Ermangelung einer 3D-Entwicklungs-umgebung nicht möglich ist, verbleibt die Integration eines optischen Partialmodells in die oben beschriebene Methodik zur Konstruktion von 3D-MID und insbesondere in MIDCAD als Lösungsansatz (vgl. Bild 3).



Bild 3: Die Partialmodelle enthalten domänenspezifische Informationen für MID-Produkte

#### 4 Konzeption und Erstellung eines optischen Partialmodells

Etlche, in der MID-Konstruktionsmethodik bereits vorliegende Daten können auch zur Beschreibung optischer Elemente und Signalleitung dienen. Dazu zählt z. B. die Angabe von Materialien sowie deren Eigenschaften. Die Herausforderung liegt darin, die fehlenden Informationen zu identifizieren und eine geeignete Struktur zu deren Speicherung und Verwendung zu finden. Bei Betrachtung der Unterschiede zwischen elektronischen und optoelektronischen Baugruppen werden entscheidende Erkenntnisse gewonnen. Die optische Signalleitung in Wellenleitern hängt enorm von deren Gestalt in Form von Querschnitt und Verlauf entlang der Substratoberfläche ab, bedingt durch physikalische Phänomene wie Reflexion oder Brechung. Somit ist die Gestalt besonders für das funktionsgerechte Design zu berücksichtigen. Elektrische Leiterbahnen hingegen gewährleisten bei ununterbrochener Oberflächenführung stets einen Signalfluss. Gemeinsam ist beiden Signalleitern die Abhängigkeit vom eingesetzten Material und dessen Einfluss auf die Signaldämpfung bezüglich der Leiterlänge. Bei Lichtwellenleitern (LWL) unterscheiden sich allerdings Singlemode- und Multimodeleiter im Material und insbesondere in den zu Grunde liegenden physikalischen Gesetzen. Entscheidend ist zudem, ob die Lichtausbreitung mit dem Modell der Strahlen- oder Wellenoptik beschrieben und berechnet werden kann. Haben die Multimode-Lichtwellenleiter Ausmaße im zweistelligen Mikrometerbereich, genügt die strahlenoptische Betrachtung. Nähern sich die Maße der Wellenleiter jedoch dem einstelligen Mikrometerbereich und damit der Lichtwellenlänge an, müssen wellenoptische Phänomene wie die Beugung berücksichtigt werden. Auch hinsichtlich der

---

Kopplung an Signalquellen und -empfänger sind LWL diffiziler handzuhaben. Speziell die Lichtausbreitungsrichtung sowie die Kopplungseffizienz zu angrenzenden optischen Bausteinen müssen berücksichtigt werden. [9]

#### 4.1 Grundlagen für die Inhalte des optischen Partialmodells

Als Quellen zur Ermittlung notwendiger Daten für das optische Partialmodell stehen u. a. Fertigungsverfahren zur Verfügung. Aktuell wird die Herstellung optoelektronischer Printed Circuit Boards (EOPCB) weitestgehend beherrscht, da es sich um Prozesse handelt, die sich an die Herstellung flacher elektronischer Leiterplatten anlehnen. Um LWL auch auf räumlichen Schaltungsträgern applizieren zu können, werden am Lehrstuhl FAPS bewährte Metallisierungsverfahren aus dem MID-Bereich wie das Aerosol Jetting adaptiert. Auch in Bezug auf die Bestückung optoelektronischer Bauelemente stehen modifizierte Montageprozesse aus der Elektronikproduktion zur Verfügung. Die genannten Verfahren und deren Fertigungssteuerung erfordern als Grundlage geeignete 3D-CAD-Daten unter Berücksichtigung von fertigungsspezifischen Grenzen wie minimale Lichtwellenleiterbreiten oder Justagetoleranzen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind im optischen Partialmodell als Datenquelle für MRC zu hinterlegen.

Neben dem fertigungsgerechten optischen Design muss auch die Funktion der Signalübertragung gewährleistet werden. Die Anforderungen an geeignete DRC müssen sowohl von den Ingenieurwissenschaften als auch von den Naturwissenschaften, allen voran dem Forschungsfeld Optik in der Physik, abgeleitet werden. Dies begründet sich in der Notwendigkeit des Aufbaus einer fundierten wissenschaftlichen Grundlage für die Betrachtung der optischen Elemente. Durch optische Modelle des optoelektronischen Layouts können die Gesetze der Physik einbezogen und die davon abhängenden Phänomene berechnet werden. Besonders das funktionsgerechte Design wird durch die optische Simulation des Signalgangs ermittelt. Bisher wurden im Vergleich zu räumlichen Baugruppen relativ einfache Designs für LWL auf bzw. in flachen Leiterplatten umgesetzt. Ein Beispiel für die Sicherstellung ihrer optischen Funktion ist die Simulation der optischen Signale mittels der beim Cooperative Computing & Communication Laboratory (C-LAB) in Paderborn entwickelten speziellen Simulations- und Entwurfsumgebung „OptoBoard Designer“ für leiterplattenbasierte optische Multimode-Wellenleiter-Verbindungen. Diese Software wurde am Lehrstuhl FAPS getestet und für die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten in Verbindung mit MIDCAD evaluiert. Zur Auslegung räumlich angeordneter LWL ist allerdings eine Strategie bzw. Funktionserweiterung für die Anwendung in einer 3D-Entwicklungsumgebung zu ergänzen.

---

Durch das funktionsgerechte Design erweitert sich die Struktur des optischen Partialmodells um Design Rules und Simulationsmodelle.

## 4.2 Konzept zur Integration des optischen Partialmodells in das MID-Produktmodell

Der Identifizierung der relevanten Aspekte für ein optisches Partialmodell folgen die Überlegungen zu deren Integration in das bereits bestehende MID-Datenmodell. Analog zu den elektronischen Bauelementen müssen elektrooptische Wandlerbausteine samt Angabe der Lichtausbreitungs- bzw. Lichtempfangsrichtung und der Koppelleffizienz in die Bauteilbibliothek aufgenommen werden. Bei deren Platzierung sind strenge Vorgaben für die Verbindung mit LWL einzuhalten, um das anschließende Routing zu unterstützen bzw. nicht durch kreuzende Verbindungen zu verhindern. Ebenso ist auf eine niedrige Justagetoleranz zu achten, um die Ein- und Auskopplung zu den LWL zu gewährleisten, was eine erhöhte Positionsgenauigkeit in 3D-CAD erfordert.

Neben den Wandlerbausteinen sind auch die LWL in Gestalt und Funktion in das Modul für elektrische Leiterbahnen zu integrieren. Das Entflechten von LWL erfordert die Überprüfung der oben erwähnten Design Rules, die zusätzlich zu den bereits vorhandenen elektronischen gespeichert werden und als Input für die DRC dienen. Hierbei ist auch die bidirektionale datentechnische Einbindung optischer Simulationsprogramme vorzusehen, die abhängig von den Querschnitten der LWL entweder strahlenoptische oder wellenoptische Modelle verwenden, um Abweichung von bereits verifizierten Designs absichern zu können. Daneben werden auch MRC für optische Verfahren aufgenommen, so dass die Volumenmodellierung der LWL prozessspezifische Querschnitte der Lichtleiter berücksichtigt.

## 5 Ausblick

Geplant ist neben der Erweiterung der Designs von Lichtwellenleitern in große Flächen durch räumlich angeordnete optomechatronische Baugruppen auch die Simulation funktionsgerechter Designelemente mit einem anwendungsspezifisch adaptierten Raytracing-Tool. Die Beschränkung auf eine strahlenoptische Simulationsmethode genügt in diesem Fall, da lediglich Multimode-Lichtwellenleiter mit Ausmaßen im zweistelligen Mikrometerbereich zum Einsatz kommen.

Das fertigungsgerechte Design wird an Hand weiterer optischer Auftragsverfahren, deren Prozessparameter am Lehrstuhl FAPS untersucht werden, verfeinert. Zu den typischen Designelementen werden die jeweils relevanten

---

Prozesseinstellungen als auch die Materialkombinationen aus Auftragsmedium und Substrat in MIDCAD gespeichert.

## Literatur

- [1] Feldmann, K.; Alvarez, C.; Zhuo, Y.: "Horizontal and Vertical Integration of Product Data for the Design of Molded Interconnect Devices", in: Proceeding of the 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, Bath, 2007.
- [2] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID Technologien (Hrsg.): "3D-MID Technologie: Räumliche Elektronische Baugruppen; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte", Carl Hanser Verlag, München, 2004.
- [3] Franke, J.: "Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)", Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- [4] Franke, J.; Goth, C.; Fischer, C.; Pfeffer, M.: "Effiziente rechnergestützte Produktentwicklung für räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID)", in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 11, S. 925-930.
- [5] Heininger, N.: "LDS macht 2K-Spritzguss überflüssig", in: Sonderdruck aus der K-Zeitung, Giesel Verlag GmbH, Isernhagen, 2004.
- [6] Maier, R.: "Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)", Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002.
- [7] Pahl, G.; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [8] Zhuo, Y.: "Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)", Meisenbach Verlag, Bamberg, 2007.
- [9] Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P. E.; Daum, W.: "POF-Handbuch – Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme", Springer-Verlag, Berlin, 2007.

# Modellierung und Simulation im mechatronischen Produktentwicklungsprozess

Fabio Dohr und Michael Vielhaber  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik*  
*Universität des Saarlandes*

In recent years mechatronics has become a part of almost every technical product and the field is becoming increasingly relevant. Modeling and simulation have proven to be adequate tools to deal with complexity and to improve communication across domains – two of the main issues in mechatronics. However, there is currently no holistic methodology which exploits the potential of using modeling and simulation from the very beginning. In this paper established methodologies will be analyzed and requirements for a model- and simulation-based development process will be derived. Finally, an initial framework that will fulfill these requirements will be presented.

## 1 Einleitung

Mechatronik vereint Komponenten der klassischen Ingenieursdisziplinen Mechanik, Elektronik/Elektrotechnik und Regelungstechnik sowie Informatik in einem Produkt. Die daraus resultierende Heterogenität führt zu einer deutlich höheren Komplexität als bei klassischen Produkten. Zudem beschränken sich die Entwicklungstätigkeiten nicht nur auf eine Domäne, sodass Kooperation und Kommunikation zwischen Domänen ein elementarer Bestandteil mechatronischer Entwicklungsprozesse sind. Eine getrennte Entwicklung in den einzelnen Domänen ist daher nicht mehr möglich, vielmehr bedarf es einer ganzheitlichen, interdisziplinären Betrachtung [1]. Die Anzahl der in den letzten Jahren zu diesem Thema veröffentlichten Arbeiten zeigt

den großen Bedarf an neuen, mechatronischen Vorgehensweisen. Einen Überblick hierzu gibt [2].

Der Markt für technische – und insbesondere für mechatronische – Erzeugnisse erfährt seit einigen Jahren eine stetige Verkürzung der Produktlebenszyklen sowie ein Ansteigen des Wettbewerbes. Hieraus resultiert für Unternehmen der Zwang, die Entwicklungszeiten und -kosten zu senken, ohne die Qualität zu vernachlässigen. Mechatronische Produkte erhöhen hierbei aufgrund ihrer Komplexität und Heterogenität die Anforderungen zusätzlich, sodass klassische Entwicklungstechniken nicht mehr ausreichend sind. Abbildung 1 verdeutlicht, dass ein modell- und simulationsbasierter Ansatz hier Abhilfe leisten kann.

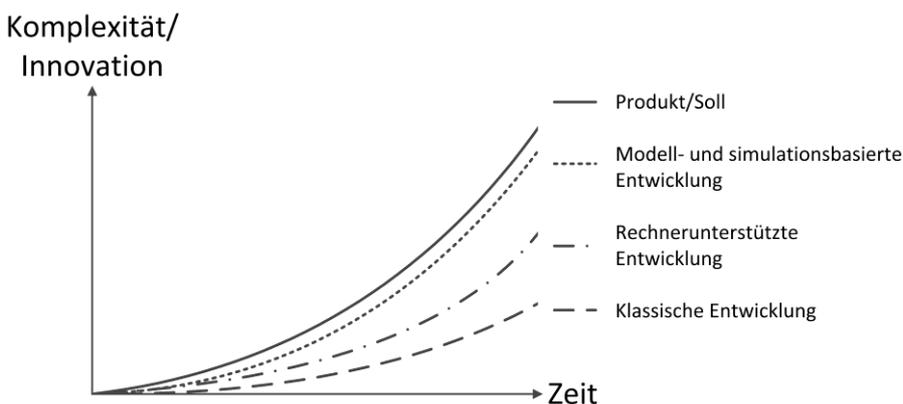


Abbildung 1: Komplexitätsschere (nach [3])

Eine späte Eigenschaftsabsicherung, wie es bisher meist anhand von Prototypen und Test der Fall ist, führt bei mechatronischen Produkten aufgrund der Vielzahl von vernetzten Komponenten zu einem sehr hohen Änderungsaufwand mit entsprechenden Kosten. Dies wird durch einen simulationsbasierten Ansatz vermieden, der die Lernkurve in frühe Phasen vorzieht, sodass Entscheidungen fundierter getroffen werden können. Weiterhin ersetzen Simulationen – zumindest teilweise – physische Prototypen, sodass die ersten physischen Versuchsträger bereits einen wesentlich höheren Reifegrad besitzen. Somit werden bei der Entwicklung Zeit und Kosten eingespart.

Trotz der zahlreichen Vorgehensmodelle existiert derzeit keine Methodik, die den mechatronischen Produktentwicklungsprozess von Beginn an simulationsbasiert betrachtet. Daher werden im Folgenden diesbezügliche Schwachstellen existierender Methoden analysiert, Anforderungen an eine simulati-

---

onsbasierte Entwicklung erarbeitet und Vorschläge für ein Vorgehen beschrieben.

## 2 Analyse bestehender Vorgehensmodelle

In diesem Abschnitt werden die beiden Richtlinien VDI 2221 und VDI 2206 bezüglich des Einsatzes von Modellierungs- und Simulationstechniken analysiert. Da diese Richtlinien sich im Bereich der Konstruktionstechnik und der mechatronischen Produktentwicklung – zumindest in Forschung und Lehre – etabliert haben, sollen sie hier als beispielhafte Grundlage dienen, um die heutigen Probleme darzustellen. Es sei jedoch auch auf die Literatur zu den zahlreichen weiteren Vorgehensmodellen verwiesen, z.B. [2] und [4].

### 2.1 Modellierung und Simulation in der VDI 2221

Die Richtlinie VDI 2221 behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens [5]. Das grundsätzliche Vorgehen der Richtlinie teilt sich in sieben Arbeitsschritte, welche in Abbildung 3 unten dargestellt sind. Entsprechend dem Alter der Norm – die aktuelle Version entstand 1993 – basiert das generelle Vorgehen auf rein manuellen Methoden. Zwar wird darauf verwiesen, dass die Methodik auch für eine rechnerunterstützte Entwicklung geeignet ist, jedoch beschränkt sich die Richtlinie hierbei auf die Techniken des Digital Mock-Ups (DMU), also die gestalt- bzw. geometrieorientierten Tools, hauptsächlich CAD. Insbesondere bei mechatronischen Systemen rückt aber immer mehr das Digital Functional Mock-Up (FMU) in den Vordergrund, welches auch die funktionale Komponente berücksichtigt. Zudem fehlen konkrete Anweisungen, welche Techniken in welcher Phase eingesetzt werden können. Eine durchgängige, intensive Nutzung von Modellierungs- und Simulationsverfahren ist nicht Teil des Vorgehens.

Die Eigenschaftsabsicherung erfolgt in der Richtlinie vollständig über Versuchs-/Labormuster und physische Prototypen. Zur Einordnung im Prozess wird dabei keine genauere Angabe gemacht, die Prototypenphase wird somit in den Schritt „weitere Realisierung“ verschoben. Die Rückflüsse der hier erlangten Erkenntnisse in vorangegangene Phasen der Entwicklung werden nicht weiter behandelt. Die in Abbildung 2 dargestellte Lernkurve zeigt, dass durch dieses Vorgehen in späten Phasen wieder mit einem erhöhten Aufwand zu rechnen ist, da Fehler erst dort erkannt und entsprechende Änderungen notwendig werden. Verstärkt wird dieses Problem dadurch, dass bereits sehr früh – vor dem ersten Aufwandsmaximum – ein Konzept ausgewählt wird, wodurch die Gefahr einer Fehlentscheidung erhöht wird. Die dargestellte vor-

gezogene Lernkurve zieht das Aufwandsmaximum in frühe Phasen vor, wodurch fundiertere Entscheidungen möglich sind und die Eigenschaftsabsicherung sehr früh erfolgt. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 3 genauer eingegangen.

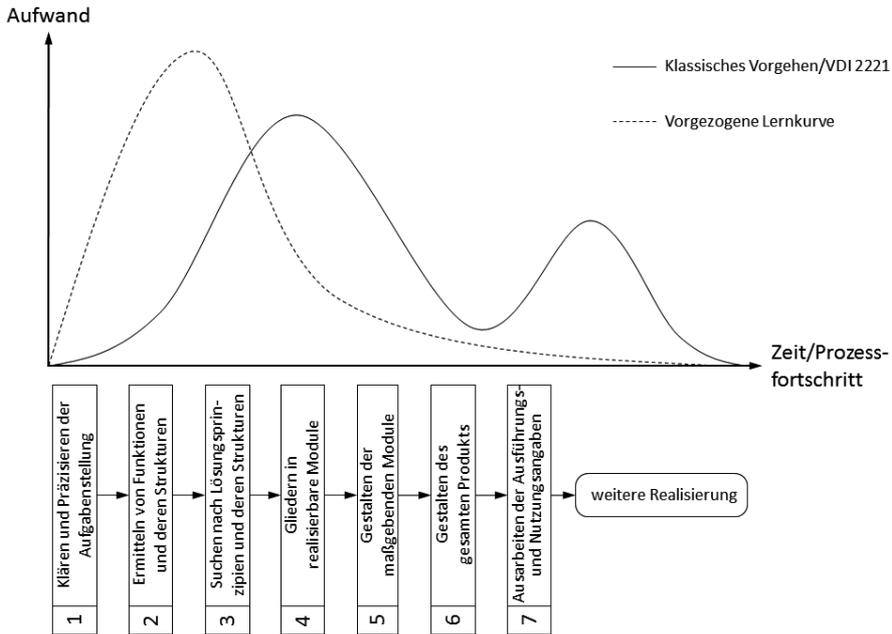


Abbildung 2: Lernkurve in der VDI 2221 (oben nach [6], unten nach [5])

Die Entwicklung mechatronischer Produkte ist geprägt von interdisziplinärer Zusammenarbeit. Dieses Kriterium wird im Vorgehen nach VDI 2221 jedoch nur unzureichend berücksichtigt. Zwar wird auf parallele Entwicklungen eingegangen, jedoch werden diese als hauptsächlich unabhängig betrachtet.

Ein häufiges Vorurteil bezüglich des Vorgehens in der VDI-Richtlinie ist die rein sequentielle Abarbeitung der Arbeitsschritte [7], obwohl der wichtige Aspekt der Iterationen zwischen den Schritten in der Richtlinie ausdrücklich erwähnt wird. Mangelnde Hinweise bezüglich der Adaption des linear dargestellten Vorgehens sind für diese Auffassung besonders bei Anwendern mit geringer Erfahrung verantwortlich [4].

---

## 2.2 Modellierung und Simulation in der VDI 2206

Die Richtlinie VDI 2206 gibt einen praxisorientierten Leitfaden für die systematische Entwicklung mechatronischer Produkte [8]. Sie führt die Methoden der einzelnen Domänen in einem Leitfaden zur Entwicklung mechatronischer Systeme zusammen, wobei ein besonderer Fokus auf der Kooperation und Kommunikation der einzelnen Fachdisziplinen liegt, welche als wesentliche Erfolgsfaktoren angesehen werden. Das Vorgehen teilt sich auf in einen Mikrozyklus, einen Makrozyklus sowie wiederkehrende Prozessbausteine. Der Makrozyklus wird durch das V-Modell repräsentiert, welches die drei Hauptphasen Systementwurf, Domänenentwurf und Systemintegration mit nachfolgender Eigenschaftsabsicherung beinhaltet. Dabei sieht die Richtlinie bereits von Beginn an eine begleitende Modellierung und Simulation des Systems vor, da Einigkeit darin besteht, dass Rechnerunterstützung bei der Entwicklung mechatronischer Produkte zwingend erforderlich ist [8, 9, 10]. Jedoch führt das bewusst flexibel gewählte Vorgehen der Richtlinie dazu, dass keine genaueren Angaben bezüglich des Einsatzes von Modellbildungs- und Simulationstechniken in und zwischen den einzelnen Phasen gemacht werden. Insbesondere im Hinblick auf unerfahrenere Benutzer besteht hier ein ähnliches Problem wie bei der Richtlinie VDI 2221.

Trotz des begleitenden Einsatzes von Simulationen sieht die Richtlinie vor, die Eigenschaftsabsicherung hauptsächlich am Ende einer Makrozyklus-Iteration durchzuführen. Direkte Rückflüsse von Informationen und Erkenntnissen aus einzelnen Phasen des Makrozyklus in vorangegangene sind nicht vorgesehen, obwohl gerade hierin ein großer Vorteil von virtuellen Absicherungsmethoden liegt. Weiterhin besteht noch Potential bei den Übergängen zwischen den Phasen, wobei insbesondere die Partitionierung und darauffolgende Einteilung in die Domänen von Interesse ist. Zudem wird Kommunikation und Kooperation der einzelnen Domänen als wesentlicher Faktor in der Richtlinie angesehen. Jedoch erfolgt die domänenspezifische Entwicklung noch unabhängig voneinander, obwohl auch hier Kooperation und Kommunikation erforderlich sind.

## 2.3 Abgeleitete Fragen

Die am Beispiel der beiden VDI-Richtlinien dargestellte Analyse zeigt, dass derzeit noch einige Potentiale bezüglich des Einsatzes von Modellierungs- und Simulationstechniken bestehen. Hieraus können die folgenden Fragen abgeleitet werden:

- Wie verändern sich Verantwortlichkeiten, Modelle, Simulationen und IT-Tools im Verlaufe des Entwicklungsprozesses? Wie können diese verknüpft werden?
- Können verschiedene Domänensichtweisen in einem Modell integriert werden, welches als Basis einer Gesamtsimulation dient?
- Wer ist für die Erstellung und Anpassung des Modells und wer für die Simulation verantwortlich? Gibt es hierfür eine alleinige Rolle?
- Wie kann Datenkonsistenz und -kompatibilität gewährleistet werden?
- Wie verändert der Einsatz von Modellierung und Simulation den Ablauf des Gesamtprozesses?

Ziel ist es, von einem modell- und simulationsunterstützten Entwicklungsprozess, wie er beispielsweise in der VDI 2206 beschrieben ist, zu einem modell- und simulationsbasierten Prozess zu gelangen. Hierzu werden im folgenden Kapitel Anforderungen an einen Entwicklungsprozess erstellt, die bei der Klärung der beschriebenen Fragen helfen sollen.

### 3 Anforderungen an ein modell- und simulationsbasiertes Vorgehen

Mechatronische Produkte sind hochintegrierte, komplexe Produkte. Im Hinblick auf Entwicklungskosten und -zeit sowie Produktqualität ist es daher nicht mehr ausreichend, einzelne Aspekte der Produktentwicklung getrennt zu betrachten. Vielmehr muss ein Vorgehensmodell eine integrierte Sichtweise auf alle Aspekte bieten, wie in Abbildung 3 verdeutlicht.

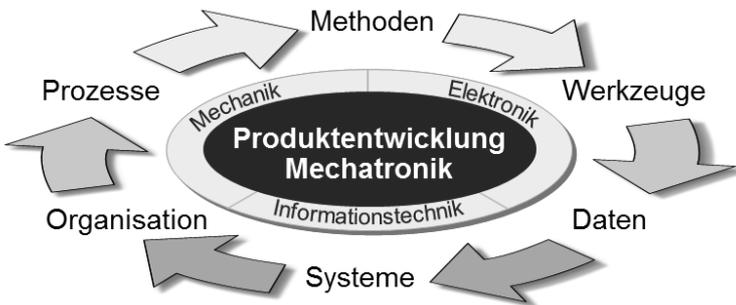


Abbildung 3: Ganzheitliche Betrachtung der Produktentwicklung (nach [11])

---

Nachfolgend werden die Anforderungen in den einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses bezüglich der in Abbildung 3 dargestellten Dimensionen untersucht.

### 3.1 Frühe Phasen / Systementwurf

Die frühen Phasen sind für den Erfolg eines Produktes ausschlaggebend [12]. Gemäß der Rule of Ten ist der zeitliche und finanzielle Aufwand für Änderungen hier am geringsten, wodurch eine fundierte Konzeptauswahl besonders wichtig ist, um später Fehlerentdeckung vorzubeugen. Insbesondere bei mechatronischen Systemen sollte der Entwicklungsaufwand aufgrund der Vielzahl involvierter Fachdisziplinen und dem damit verbundenen großen Lösungsraum vorgezogen werden, d.h. in den Systementwurf nach [8]. Dieses Vorziehen der Lernkurve, vgl. Abbildung 2, kann nur durch den durchgängigen Einsatz von Modellierung und darauf aufbauender Simulation erreicht werden [13].

Der Systementwurf erfolgt unter Beteiligung von Fachleuten aller involvierten Domänen. Hierbei besteht das Problem, dass jede Domäne ihre eigene Terminologie und Modellierungstechnik entwickelt hat. Besonders im Hinblick auf eine ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung entstehen dadurch Kommunikationsprobleme, die den Entwurfsprozess stören können. Während das Problem der Terminologie hauptsächlich durch Schulung von Mitarbeitern zu beheben ist, bedarf es bei den Modellierungstechniken weiterer Maßnahmen. Daher gibt es zahlreiche Bestrebungen, Modellierungssprachen zu entwickeln, die domänenübergreifende Phänomene beschreiben können und verschiedene Domänensichtweisen in einem Modell integrieren. Beispielfhaft seien hier Modelica [14], VHDL-AMS [15] und SysML [16] genannt. Auf der Basis dieser ausführbaren Modelle können Simulationen durchgeführt werden, wodurch bereits sehr früh Erkenntnisse über das Systemverhalten erlangt werden, die beim Vergleich und bei der Auswahl von Konzepten als objektive Kriterien dienen. Zwar erhöht sich dadurch der Aufwand in dieser Phase, jedoch führt die fundierte Konzeptauswahl dazu, dass im weiteren Entwicklungsverlauf weniger Konzeptfehler auftreten und damit die Anzahl der Iterationen reduziert werden kann.

Derzeitige Probleme bei den Multidomänensprachen bestehen in ihrer fehlenden Integration. Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit den Möglichkeiten und der Weiterentwicklung der Sprachen, jedoch fehlt eine organisatorische sowie methodische Integration in den Produktentwicklungsprozess. Diesem Aspekt muss in einem modell- und simulationsbasierten Prozess besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

---

Darüber hinaus existieren weitere Tools, die den Systementwurf unterstützen können. So ermöglicht beispielsweise die Simulation von Mehrkörpersystemen Machbarkeitsuntersuchungen und liefert grobe Auslegungswerte, wie etwa Beschleunigungen und Kräfte. Auch hierbei bedarf es methodischer Unterstützung, wie und wann solche Tools sinnvoll eingesetzt werden können.

Ist der Systementwurf erfolgt, beginnt in der Regel die Ausarbeitung in den Domänen. Beim Übergang zwischen diesen beiden Phasen bestehen derzeit jedoch noch Probleme. Voraussetzung für die Aufteilung der Entwicklungsaufgaben ist die Partitionierung mechatronischer Systeme. Hierbei stellen die Komplexität und die oftmals nicht einzelnen Domänen zuzuordnenden Komponenten Probleme dar. Arbeiten auf diesem Gebiet existieren bereits und sollten in eine Gesamtmethodik integriert werden. Zudem ist es sinnvoll, bereits erstellte Modelle aus dem Systementwurf auch im weiteren Verlauf der Entwicklung zu nutzen. Hierfür bestehen bereits teilweise Möglichkeiten, z.B. für die Nutzung von Modelica-Modellen in Matlab/Simulink [14]. Ein derartiger Austausch von Modellen bedarf zwangsweise einer Kooperation der Entwicklungsteams und eines Datenmanagementsystems, welches den Entwicklern den Zugriff auf die Modelle erlaubt und deren Konsistenz und Kompatibilität gewährleistet.

### 3.2 Domänen-Entwurf

Die einzelnen Domänen haben im Laufe der Zeit zahlreiche ausgereifte Softwaretools entwickelt, mit denen sich entwicklungsbegleitend eine virtuelle Eigenschaftsabsicherung durchführen lässt. Beispielhaft seien hier die Finite Elemente Methode in der Mechanik und die Schaltungssimulation in der Elektronik genannt. Bei diesen handelt es sich jedoch meist um Insellösungen, welche in der Regel nicht mit anderen Tools interagieren und somit den Prozessfluss unterbrechen [1]. Daher gibt es zahlreiche Entwicklungen von Konstruktionssystemen, welche die Tools in einem System – üblicherweise in CAD-Systemen – vereinen. Naturgemäß ist die Leistungsfähigkeit solcher Systeme nicht mit der von Einzellösungen vergleichbar, weshalb eine vollständige Substitution auf absehbare Zeit unwahrscheinlich ist. Daher müssen der Datenfluss und die Datenkompatibilität unter den Programmen verbessert werden.

Obwohl die endgültige Ausarbeitung in getrennten Disziplinen erfolgt, darf die Entwicklung nicht getrennt ablaufen. Die Kompatibilität zwischen Funktionen und Modulen eines mechatronischen Produktes muss fortlaufend überwacht werden, um eventuelle Iterationsschleifen möglichst klein zu halten. Daher müssen sowohl die Kommunikation als auch der Datenaustausch zwi-

---

schen den Fachdisziplinen systematisch gefördert werden. Nur so können Änderungen und Erkenntnisse zeitnah an andere Fachbereiche propagiert werden. Eine auch in dieser Phase weitergeführte Systemmodellierung hilft beim Abgleich von Daten und Schnittstellen.

### 3.3 Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung

Aufgrund des in vorangegangenen Phasen erfolgten durchgängigen simulatorischen Abgleichs der Eigenschaft mit der Spezifikation und dem Abgleich zwischen den Domänen ist bei der Zusammenführung der Komponenten und Module, d.h. bei der Systemintegration nach VDI 2206, der Aufwand deutlich geringer. Hauptsächlich geht es hierbei um Fein- und Abstimmungsarbeiten. Je nach Phase des Entwicklungsprozesses kommen hier verschiedene Hilfsmittel zum Einsatz, z.B. Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL). Dadurch ist es möglich, Teile des Systems zu testen, ohne dass der Rest des Systems bereits umgesetzt wurde. Hierfür werden jedoch Modelle des zu entwickelnden Systems selbst sowie der Systemumgebung benötigt, wodurch der Modellierungsaufwand und die Datenmenge stark ansteigen. Werden Modelldaten vom Systementwurf an kontinuierlich gepflegt und erweitert, kann in diesen späteren Phasen darauf zurückgegriffen werden.

### 3.4 Datenmanagement

Wie bereits in den letzten Kapiteln erwähnt, werden durch einen modell- und simulationsbasierten Entwurf große Mengen an Daten erzeugt, welche zudem unter den Entwicklungsbeteiligten verteilt werden müssen. Deshalb ergeben sich große Potentiale durch den Einsatz eines Datenmanagementsystems, welches für alle Fachdisziplinen gemeinsam zur Verfügung steht. Das Problem der Datenaktualität, -kompatibilität und -konsistenz muss zusätzlich berücksichtigt werden.

## 4 Ableitung eines Vorgehensmodells

Zahlreiche Vorgehensmodelle basieren auf linearen Vorgehensweisen, wodurch es dem Anwender leicht fällt, Schritte nachzuvollziehen und anzuwenden. Schwierig ist dabei jedoch, Iterationen so zu integrieren, dass auch unerfahrene Anwender diese anwenden (vgl. Kapitel 2.2). Chan und Leung [17] entwickeln beispielsweise eine Vorgehensweise basierend auf dem Spiralmodell, welches Iterationen wesentlich besser integriert, wodurch jedoch die Anschaulichkeit für den Anwender verringert wird. Eine Möglichkeit beide Vorteile – also die Anwendbarkeit und die Iterationen – zu kombinieren,

ist in Abbildung 4 dargestellt, indem ein sequentielles Vorgehen mit einem TOTE-Schema für die Iterationen zwischen den Phasen ergänzt wird. Darauf aufbauend werden in Zukunft die Anforderungen aus Kapitel 3 integriert, um einen modell- und simulationsbasierten Entwurf mechatronischer Systeme zu ermöglichen. Hierbei werden insbesondere der Systementwurf und die damit verknüpfte Systemmodellierung von Interesse sein, um möglichst früh eine abgesicherte Konzeptauswahl zu treffen und hohe Reifegrade vor dem ersten physischen Prototyp zu erzielen. Im Sinne des ganzheitlichen Entwurfes mechatronischer Produkte stehen neben methodischen auch organisatorische Aspekte und Werkzeuge im Mittelpunkt des Vorgehens.

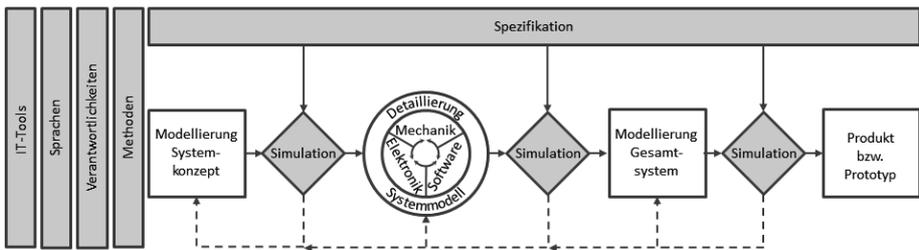


Abbildung 4: Vorgehen beim modell- und simulationsbasierten Entwurf

## 5 Zusammenfassung

Modellierung und Simulation sind Teil der Entwicklung mechatronischer Produkte. Neben den zahlreichen Insellösungen existieren bereits Software-Werkzeuge, mit denen mechatronische Produkte domänenübergreifend behandelt werden können. Dieser Beitrag zeigt beispielhaft an den Richtlinien VDI 2221 und VDI 2206, welche methodischen Mängel bei der Einbindung von Modellen und Simulation derzeit bestehen. Darauf aufbauend werden Anforderungen für einen modell- und simulationsbasierten Entwurf erarbeitet und daraus ein grober Rahmen für ein Vorgehensmodell entwickelt.

## Literatur

- [1] Pahl, G; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [2] Gausemeier, J.: „Domänenübergreifende Vorgehensmodelle“, <http://www.transmechatronic.de>, letzter Aufruf: 03.08.2011

- 
- [3] Weilkiens, T.: „Zukunftsdisziplin Modellbasiertes Systems Engineering“, in: 8. Paderborner Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme, Heinz-Nixdorf-Institut, Paderborn, 2011
- [4] Lindemann, U.: „Methodische Entwicklung technischer Produkte“, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [5] VDI Richtlinie 2221, „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [6] Albers, A.; Nowicki, L.: „Integration der Simulation in die Produktentwicklung“, in: Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [7] Reeßing, M.; Brix, T.: „Domänenübergreifende Entwurfswerkzeuge zur Modellierung und Berechnung heterogener Systeme“, in: 19. Symposium „Design for X“, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2008
- [8] VDI Richtlinie 2206, „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004
- [9] Isermann, R.: „Mechatronische Systeme“, Springer Verlag, Berlin, 1999
- [10] Ehrlenspiel, K.: „Integrierte Produktentwicklung“, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [11] Vielhaber, M.; Bergsjö, D.; Catic, A.: „Mechatronic Systems Engineering – Theory and Automotive Practice“, in: Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia, 2010
- [12] Krause, F.-L.; Franke, H.-J.; Gausemeier, J.: „Innovationspotenziale in der Produktentwicklung“, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [13] Commerell, W.; Mammen, H.-T.; Panreck, K.; Haase, J.: „Simulation technischer Systeme – Anforderungen und Perspektiven“, in: Advances in simulation for production and logistics applications, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008
- [14] <http://www.modelica.org>, letzter Aufruf: 04.08.2011

- 
- [15] <http://www.eda.org/analog>, letzter Aufruf: 04.08.2011
- [16] <http://www.sysml.org>, letzter Aufruf: 04.08.2011
- [17] Chan, L. W.; Leung, T. P.: "Spiral Design Model for Consumer Mechatronic Products", in: *Mechatronics*, Volume 6, No. 1, 1996

# Anforderungen an technische Oberflächen und die Herausforderungen für den Produktentwickler

Thomas Sander und Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg*

The surface of the component has a great impact on the functionality and has to be considered as a complex constructional element. It is hard to state an optimal time frame for the definition of surfaces during the product development process, since it is related to many parameters like selection of materials, manufacturing process, optical, decorative and haptic properties. In this approach the types of information are proposed with regard to the progress of the product development to support the developer at the definition of the surfaces. A simplified example of an agitator shaft for the food industry illustrates this approach.

## 1 Motivation

Die Festlegung der Anforderungen an Bauteiloberflächen hat oftmals weitreichende Konsequenzen auf den weiteren Produktentstehungsprozess, die entstehenden Kosten und auch auf den späteren Erfolg des Endproduktes. Zum einen wird durch Oberflächenanforderungen die Auswahl an Werkstoffen und Fertigungsverfahren eingeschränkt oder gar festgelegt, was wiederum Auswirkungen auf Produktionsabläufe, Bauteilauslegung bis hin zur Bauteilgeometrie hat und somit als kostensensitiv eingestuft werden muss. Zum anderen nehmen die Oberflächenanforderungen erheblichen Einfluss auf die Produktfunktionalität sowie optische und haptische Eigenschaften, welche maß-

geblich zur Wertigkeit des Produktes beitragen. Da die Oberflächen in nahezu allen Fällen der Praxis die höchstbeanspruchtesten Bauteilbereiche darstellen, sind nach [1] ca. 85 % aller Schadensfälle auf nicht an den Einsatzfall angepasste physikalische Eigenschaften der Bauteilrandzone in Verbindung mit hohen Beanspruchungen zurückzuführen.

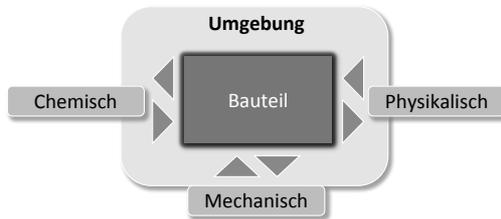


Bild 1: Das Bauteil steht über die Oberfläche in Wechselwirkung mit der Umgebung

## 2 Die technische Oberfläche als Konstruktionselement

Die Wechselwirkungen zwischen Bauteil und der Umgebung über die Oberfläche sind meist chemisch, mechanisch und/oder physikalisch (Bild 1), was bereits die Komplexität der zu beachtenden Eigenschaften andeutet.

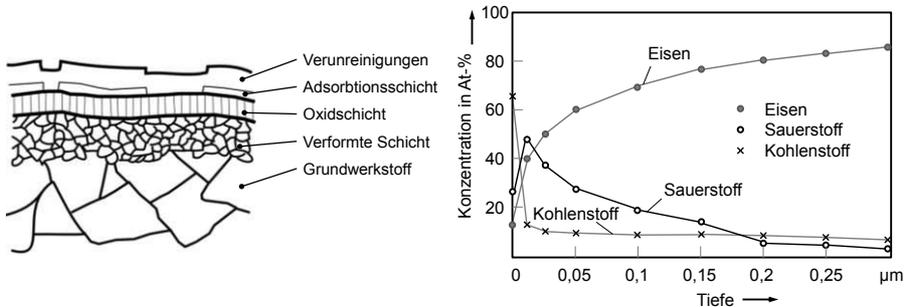


Bild 2: Die Inhomogenität metallischer Oberflächen nach [2]

Ein genauer Blick auf den Randbereich eines typischen metallischen Bauteils zeigt, dass sich hier bereits ohne besondere Oberflächenveredelung mehrere Schichtbereiche vom Grundgefüge des Werkstoffes abzeichnen (Bild 2). Durch gezielte Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung und der Mikrostruktur (überwiegend abhängig von der Werkstoffwahl und des Ferti-

gungsprozesses) können Eigenschaften der Bauteiloberfläche wie Härte, Festigkeit, Zähigkeit, Duktilität, Dauerfestigkeit, chemische Resistenz, thermische- und elektrische Leitfähigkeit eingestellt werden. Rauheit und Glanz werden wiederum durch die Feingestalt (Bauteilgestalt in Verbindung mit dem Fertigungsprozess) bestimmt. [3]

### 3 Einordnung der Oberflächendefinition in den Produktentwicklungsprozess

Trotz der geschilderten Relevanz erfolgt die Definition der Oberflächen-spezifikationen im Produktentwicklungsprozess oft erst sehr spät und teilweise ohne die notwendige Sorgfalt. Sollten Nachbesserungen notwendig sein, da beispielsweise die Produktfunktionalität nicht erfüllt werden kann, so ist der anschließende Aufwand für die Fehlerbehebung in den späten Phasen des Produktentwicklungsprozesses erfahrungsgemäß sehr hoch. Andererseits ist die Beurteilungsmöglichkeit bezüglich der Auswirkungen auf das Endresultat der zu treffenden Entscheidungen in den früheren Phasen erheblich geringer, wie es in der Zehnerregel illustriert wird (Bild 3).

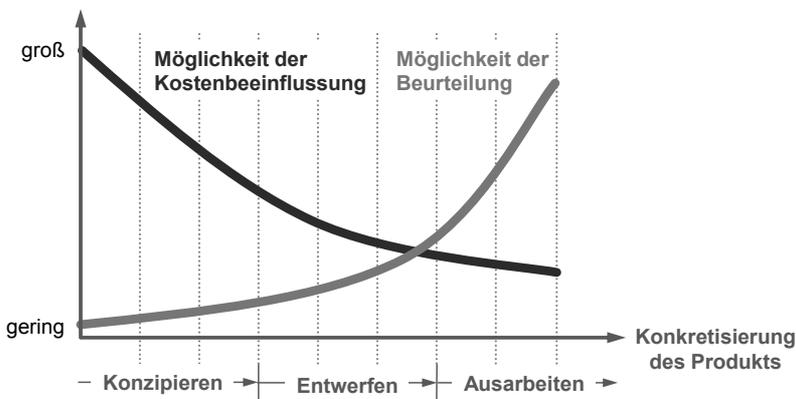


Bild 3: Zehnerregel modifiziert nach [4]

Nach Weber [5] verwendet der Produktentwickler Merkmale wie Struktur, Material, Gestalt oder Beschaffenheit als Stellschrauben um das Produkt festzulegen und direkt zu beeinflussen. Aus diesen Merkmalen resultieren wiederum die Produkteigenschaften, welche sowohl quantifizierbar wie etwa Masse, Steifigkeit oder Kosten, als auch qualitativ bewertbar wie etwa Sicherheit, Herstellbarkeit, Umweltfreundlichkeit oder dekorative Gesichtspunkte sein können [6]. Diese Eigenschaften können jedoch vom Produktentwickler nur

---

indirekt über die Merkmale gesteuert werden. Nach dieser Einteilung wird die technische Oberfläche in erster Linie durch die Wahl des Materials und die sogenannte Beschaffenheit definiert. Der Begriff der Beschaffenheit wird aber dem multidimensionalen Wirkzusammenhang aus den zahlreichen Merkmalen mit Auswirkung auf die Produkteigenschaften nicht gerecht. Auch die Tatsache, dass die Beschaffenheit von so vielen Faktoren abhängt, welche einzeln verändert werden können und unabhängig voneinander Einfluss auf die Beschaffenheit haben, ordnet sie nach oben genannter Definition klar den Eigenschaften zu.

Nach Hubka [7] werden anstatt der Merkmale sieben elementare Konstruktionseigenschaften definiert, mithilfe derer der Konstrukteur alle anderen Eigenschaften erzielt:

- Struktur
- Gestalt (Form)
- Abmessungen (Dimensionen)
- Werkstoff (Material)
- Oberfläche
- Toleranzen
- Herstellungsart

Die Stellschrauben des Produktentwicklers werden hier etwas feiner aufgliedert und weniger nach Merkmalen und Eigenschaften unterschieden. Auffällig sind die zusätzlichen Punkte Abmessungen, Oberfläche, Toleranzen und Herstellungsart, welchen hier ein großer Stellenwert zugesprochen wird.

Für die Entwicklung eines erfolgreichen Produkts ist somit ein breites Wissen über alle Bereiche der Konstruktionseigenschaften notwendig. Doch bei vielen dieser Eigenschaften (wie häufig auch bei der Oberflächendefinition) ist bereits Expertenwissen von Vorteil oder gar zwingende Voraussetzung, welches über die allgemeine Konstruktionslehre hinausgeht. Wögerbauer [8] zeigt in

Bild 4 den Einfluss des konstruktiven Könnens auf die Erfüllung der Anforderungen.

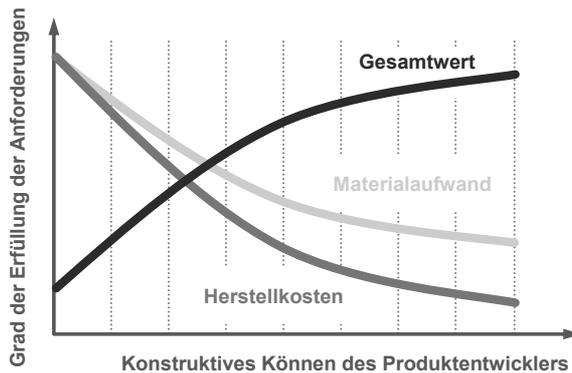


Bild 4: Einfluss des konstruktiven Könnens auf die Erfüllung der Anforderungen, modifiziert nach [8]

#### 4 Aussagekraft von Oberflächenspezifikationen

Hat der Produktentwickler Oberflächen genauer zu spezifizieren, so werden in den einschlägigen Werken der Konstruktions- und Fertigungstechnik zwar unterschiedliche Oberflächenkennwerte beschrieben, Zahlenwerte jedoch lediglich für Standardkennwerte wie Mittenrauwert  $R_a$  oder gemittelte Rautiefe  $R_z$  angegeben [9][10][11]. Doch genau diese beiden etablierten Standardkennwerte haben oft nur eine stark beschränkte Aussagekraft über die Funktionalität der Oberfläche, wie in Bild 5 illustriert.

Bei gleicher Rautiefe  $R_z$  und ähnlichem Mittenrauwert  $R_a$  ist die Verteilung der Materialanteile völlig unterschiedlich, was ein Vergleich der Abbott-Kurven zeigt. So würde die geschliffene Fläche im Gleitkontakt mit der großen reduzierten Spitzenhöhe  $R_{pk}$  im Einlauf einen großen Materialabtrag verursachen und durch die hohe Kernrautiefe  $R_k$  Neigung zu abrasivem Verschleiß aufweisen. Die gehonte Fläche zeigt dagegen mit kleinen Werten für Kernrautiefe  $R_k$  und reduzierter Spitzenhöhe  $R_{pk}$  gute Gleiteigenschaften und bietet mit hoher reduzierter Riefentiefe  $R_{vk}$  ein großes Rückhaltevolumen für Schmierstoff. Trotz der genannten Alternativen, welche für diesen Bedarfsfall die Oberfläche treffender spezifizieren, werden sie nach wie vor nur in Ausnahmefällen vergeben und weiterhin die Standardkennwerte  $R_a$  und  $R_z$  verwendet. Aus diesem Grund ist es notwendig, dem Produktentwickler geeignete Spezifikationen vorzuschlagen, welche nach der angestrebten Funktion der Produktoberfläche gewählt werden können. In schwierigen oder zweifelhaften Fällen ist die Konsultierung eines Oberflächenexperten neben der Auswahl über die vorgestellte Methode natürlich weiterhin dringend zu empfehlen.

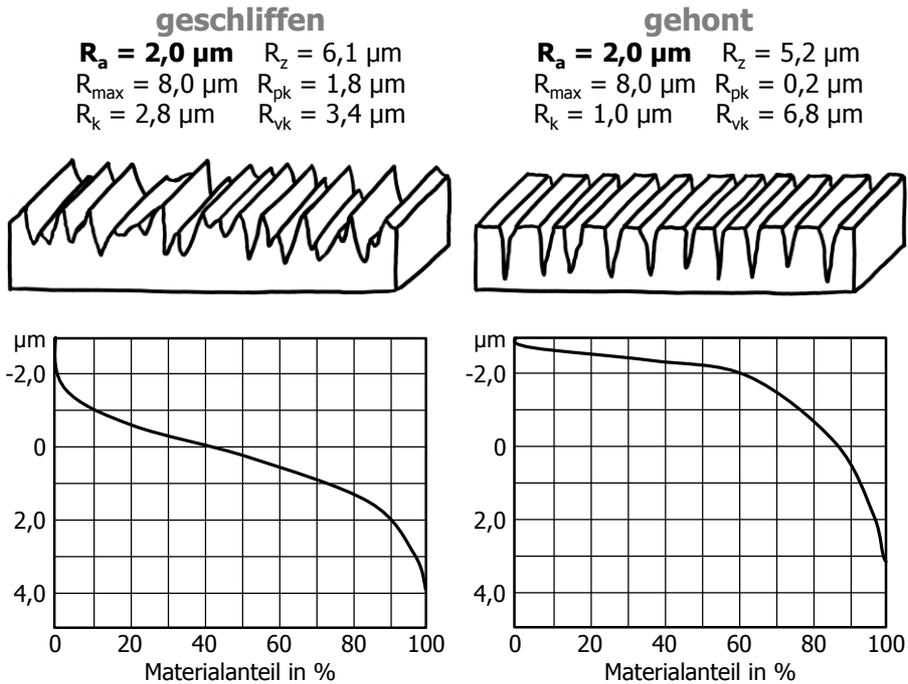


Bild 5: Oberflächentopographie und Abbott-Kurve von Oberflächenstrukturen mit identischem Mittenrauwert  $R_a$  aber unterschiedlicher Funktionalität

## 5 Vorgehensweise zur Vergabe von Oberflächenkennwerten in der Produktdokumentation

Für die Unterstützung des Produktentwicklers bei der Vergabe von Oberflächenkennwerten soll eine Vorgehensweise im Sinne einer DfX-Richtlinie entstehen [12], welche prinzipiell in Bild 6 dargestellt ist. Hierfür werden zunächst Produkte gemäß ihren Oberflächenanforderungen gruppiert und jeweils allgemein relevante, zu erfüllende Eigenschaften der technischen Oberflächen ausgewählt. Dieser Schritt dient dazu, bereits gesammelte Erfahrungen zu nutzen und Vergleichsmöglichkeiten aus bewährten Lösungen zur Verfügung zu stellen. Dieser erste allgemeine Eigenschaftskatalog kann zum einen die Produktplanung bei der Definition von Anforderungen unterstützen, sodass bereits frühzeitig die wichtigsten Eigenschaften berücksichtigt bleiben. In der Planungsphase können auch Vorgaben von Kundenseite, der strategischen Produktplanung oder ästhetische Attribute mit aufgenommen und berücksichtigt werden. Des Weiteren können Lösungsprinzipien, welche in der Konzeptphase festgelegt werden, zusätzliche Oberflächenfunktionen notwen-

dig machen und mit in den Katalog aufgenommen werden. Sofern Kennwerte und Prüfmethode existieren, welche die allgemeinen Oberflächeneigenschaften charakterisieren, können diese vorgeschlagen werden, um die Funktionalität auf möglichst hoher Ebene abzusichern.

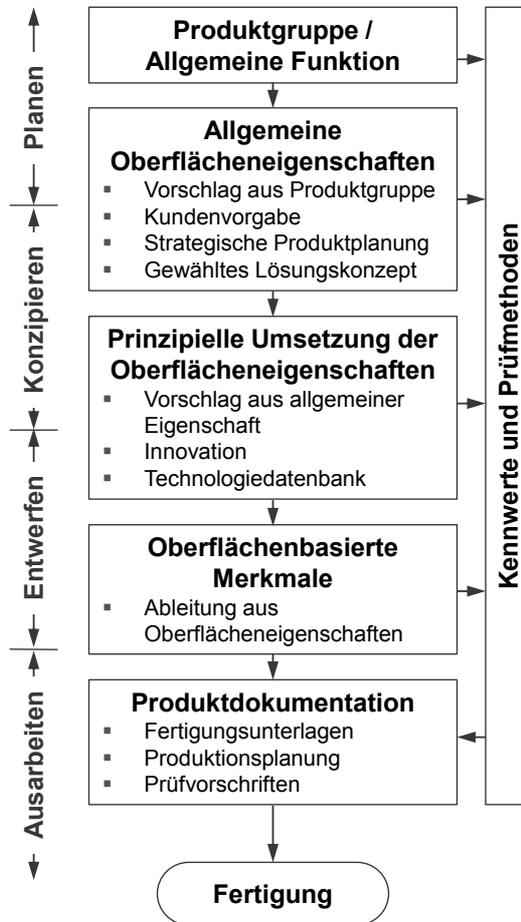


Bild 6: Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses durch oberflächen-spezifische Informationen

Auf Basis der allgemeinen Oberflächeneigenschaften gibt es oft vielfache Möglichkeiten, diese umzusetzen. Hier kann bereits in der Konzept- oder der frühen Entwurfsphase ein Lösungsprinzip ausgewählt und unterschiedliche Lösungsprinzipien wiederum durch weitere Kennwerte und Prüfmethode

---

spezifiziert werden. Unter Umständen ist ein mehrmaliger Durchlauf des Prozessschrittes sinnvoll, sofern die Eigenschaften feiner untergliedert werden können oder müssen. Ist die unterste Eigenschaftsebene erreicht, müssen Merkmale identifiziert und aufgezeigt werden, welche erfahrungsgemäß den größten Einfluss auf die gewählten Eigenschaften der Oberfläche haben. Für diese Merkmale können jeweils Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden, um bewährte, genormte oder typische Lösungen oder zumindest Tendenzen abzuleiten. Neben qualitativen Empfehlungen, zum Beispiel zur Werkstoffwahl (harter Grundkörper gegen weichen Gegenkörper), können auch Zahlenwerte mit den jeweiligen Oberflächenkennwerten und Prüfkriterien vorgeschlagen werden. Ist die Merkmalebene vollständig definiert, sind alle konstruktiven Stellgrößen und die Ausarbeitung der vollständigen Produktdokumentation kann beginnen.

## **6 Anwendung der Vorgehensweise am Beispiel einer Rührwelle in der Lebensmittelindustrie**

Die angedachte Vorgehensweise wird anhand einer auszugsweisen Oberflächendefinition einer Rührwelle für die Lebensmittelindustrie erläutert und in Bild 7 aufgezeigt. Ausgehend von den Rahmenbedingungen in der Produktplanung wird festgelegt, dass die Rührreinheit, welche in direkten Kontakt mit den zu verarbeitenden Lebensmitteln kommt, die entsprechend gültigen Auflagen erfüllen muss. Durch die grundsätzliche Einordnung in die Produktgruppe der Lebensmittelindustrie wird die generelle Durchführung der Produktplanung, Gefahrenanalyse und Verifizierungsplanung gemäß DIN EN ISO 22000 [13], mit Unterstützung durch Hinweise der DIN ISO/TS 22004 [14] und aufbauend auf ISO 9001 [15], empfohlen.

Als allgemeine Oberflächeneigenschaften können aus dieser Produktgruppe im Wesentlichen die chemische Inertheit der Oberfläche gegenüber den zu verarbeitenden Lebensmitteln, eine gute Reinigbarkeit und eine ausreichende mechanische Beständigkeit der Oberflächennahen Bereiche während der Produktion sowie der Verzicht von Schmierstoffen im Kontakt mit den Lebensmitteln definiert werden. Diese können auch als Hilfestellung in der Planungsphase zur Formulierung der Anforderungen verwendet werden. Im Weiteren soll lediglich die gute Reinigbarkeit behandelt werden, wobei im realen Produktentwicklungsprozess selbstverständlich mehrere relevante Eigenschaften weiterverfolgt würden. Auch für die gute Reinigbarkeit können Prüfmethoden wie die Fluoreszenzmikroskopie oder die EHEDG-Methode [16] vorgeschlagen werden, welche den Anteil der Restverschmutzung nach einem Reinigungsprozess quantifizieren [17].

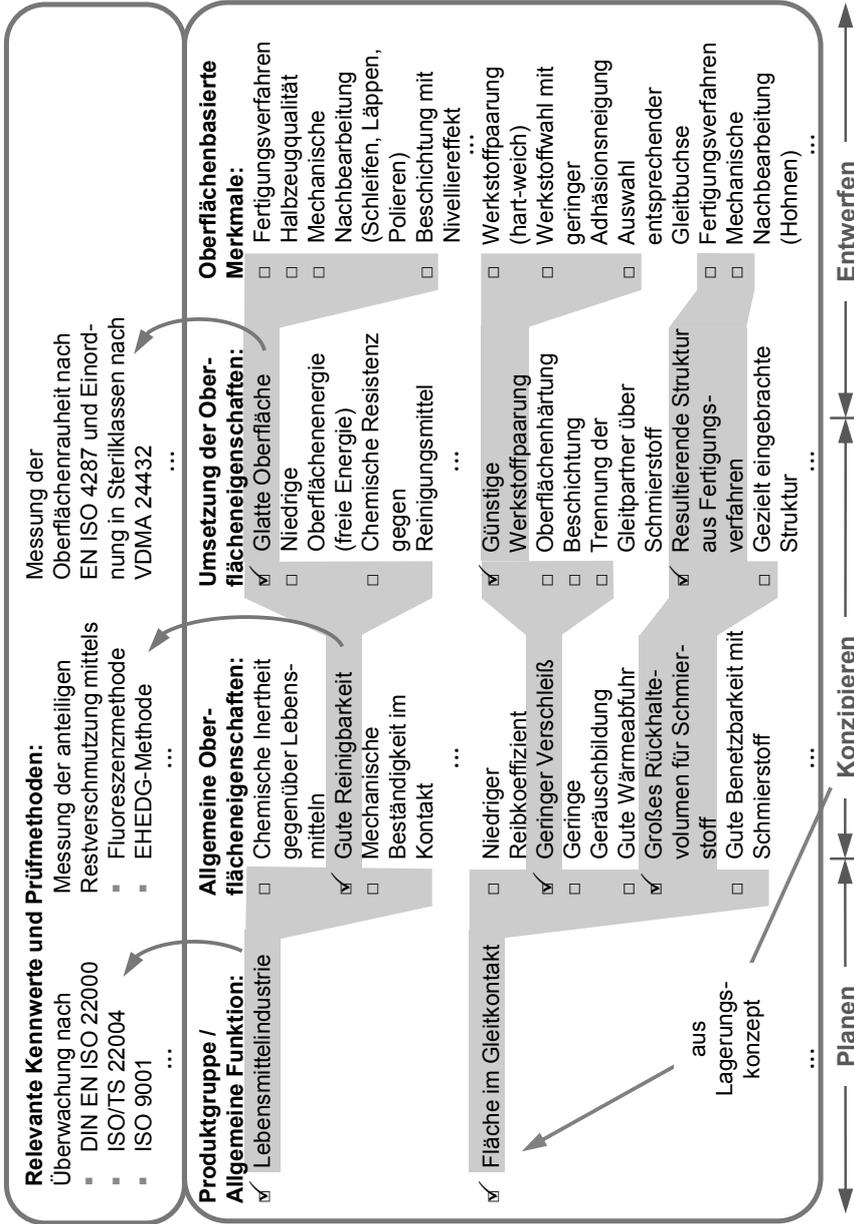


Bild 7: Auszugsweise Anwendung der Vorgehensweise am Beispiel einer Rührwelle in der Lebensmittelindustrie

---

Die gute Reinigbarkeit kann wiederum durch mehrere prinzipielle Lösungen realisiert werden, welche auszugsweise genannt werden: Glatte Oberflächen, welche sehr geringe Van der Waals Kräfte zwischen Schmutzpartikeln und Oberflächenerhebungen bilden; Oberflächen mit geringer freier Energie, welche hydrophobe Eigenschaften aufweisen und Benetzung sowie Anhaftung verhindern (Lotuseffekt); chemische oder mechanische Resistenz gegen Reinigungsmittel. Um die Komplexität für das Beispiel einzuschränken, wird im Weiteren ausschließlich auf die Umsetzung glatter Oberflächen eingegangen. Zur Überprüfung und Absicherung werden hier die geometrische Produktspezifikation mittels Tastschnittverfahren nach EN ISO 4287 [18] empfohlen, welche mit den Vorgaben der Sterilitätsklassen nach der VDMA 24432 [19] verglichen werden können.

Wie die glatte Bauteiloberfläche zu realisieren ist, wird auf Merkmalebene festgelegt, indem entsprechend das Fertigungsverfahren gewählt oder bereits Halbzeuge mit ausreichender Oberflächengüte bezogen werden. Auch eine mechanische Weiterbearbeitung wie etwa Schleifen, Läppen oder Polieren oder eine zusätzliche Beschichtung, welche die Oberflächenrauheit ausgleicht, sind möglich.

Aus der Konzeptphase der Produktentwicklung geht hervor, dass die Rührwelle gleitgelagert werden soll. Analog zum bereits erläuterten Vorgehen wird als zusätzliche und eigenständige Funktion eine Fläche im Gleitkontakt ausgewählt um einen entsprechend angepassten Lagersitz zu gestalten. Hierbei wird auch ersichtlich, dass es bei der Realisierung mehrerer Funktionen zu konkurrierenden Eigenschaften und Merkmalen kommen kann, in welchen der Produktentwickler bewerten und abwägen muss. So konkurriert im gezeigten Beispiel die chemische Inertheit gegenüber den Lebensmitteln mit dem Einsatz von Schmierstoffen bei der Lagerung. Diese Diskrepanz kann jedoch mit einer gedichteten Kapselung der Lagerung vom Kontaktbereich mit den Lebensmitteln aufgelöst werden. Gegensätzliche Funktionalitäten lassen sich auch bei der freien Energie der Oberfläche feststellen. Für die gute Reinigbarkeit sollte diese möglichst gering sein, um ein Anhaften zu vermeiden, während am Lagersitz eine hohe freie Energie für eine gute Benetzung mit Schmierstoff gewünscht ist. Es liegt hier im Ermessen des Produktentwicklers, die entsprechenden Lösungen gegeneinander abzuwägen oder den Widerspruch durch Realisierung anderer Oberflächenkonzepte oder konstruktive Lösungen zu umgehen.

---

## 7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde zunächst die Rolle der technischen Oberfläche als wichtiger Funktionsträger für das Bauteil und komplexes Konstruktionselement aufgezeigt. Ein optimaler Zeitpunkt für die Definition der Oberfläche kann jedoch im Produktentwicklungsprozess nicht gefunden werden, da sie von sehr vielen Parametern abhängt. Die Auswahl geeigneter und funktionsrelevanter Oberflächenkennwerte verdeutlicht, dass der Produktentwickler bei der Wahl von Oberflächenspezifikationen unterstützt werden sollte um optimale Ergebnisse zu erzielen. Es wurde eine Vorgehensweise vorgestellt aus welcher hervor geht, welche oberflächenbasierten Informationen dem Produktentwickler in der entsprechenden Phase des Produktentwicklungsprozesses zur Verfügung stehen sollten. Diese Vorgehensweise wurde anhand eines vereinfachten Beispiels einer Rührwelle für die Lebensmittelindustrie erläutert.

### Literatur

- [1] Maier, B.; Tönissen, S.: „Gewusst wie – Funktionsgerechte Produkteigenschaften aus Hartfeinbearbeitungsprozessen“ 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010, 09. und 10. März 2010, Karlsruhe.
- [2] Czichos, H.; Habig, K.-H.: „Tribologie-Handbuch“, 3. Auflage, Vieweg-Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [3] Lampke, T.: „Gestaltung technischer Oberflächen mit funktionalen Aufgaben“, Habilitationsschrift, 2008. Schriftenreihe: Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen Band 30, Hrsg.: Wielage, B.
- [4] VDI 2235: Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren.
- [5] Weber, C.: „CPM/PPD – An extended theoretical approach to modelling products and product development processes“, Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on advances in methods and systems for development of product and processes, 07. und 08. Juli 2005, Berlin.
- [6] Krehmer, H.; Paetzold, K.: „Eine Betrachtung zur ganzheitlichen Abschätzung des Produktreifegrades auf Basis des Verhaltens“ 19. Symposium „Design for X“, 09. und 10. Oktober 2008, Neukirchen.

- 
- [7] Hubka, V.: „Theorie technischer Systeme, Grundlagen einer Wissenschaftlichen Konstruktionslehre“, 2. Auflage, Springer, Berlin, 1984.
- [8] Wögerbauer, H.: „Die Technik des Konstruierens“, 2. Auflage, Oldenbourg, München, 1943.
- [9] Wittel, H. et. al.: „Roloff/Matek, Maschinenelemente“, 19. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [10] Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): „Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau“, 22. Auflage, Springer, Berlin, 2007.
- [11] Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: „Niemann, Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, 4. Auflage, Springer, Berlin, 2005.
- [12] Bauer, S.: „Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X“, Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2009.
- [13] DIN EN ISO 22000:2005: Managementsysteme für die Lebensmittelsicherheit - Anforderungen an Organisationen in der Lebensmittelkette.
- [14] DIN ISO/TS 22004:2007: Managementsysteme für die Lebensmittelsicherheit - Hinweise für die Anwendung von ISO 22000:2005.
- [15] DIN EN ISO 9001:2008: Qualitätsmanagementsysteme-Anforderungen
- [16] EHEDG: "A method for the assessment of in-place cleanability of moderately-sized food processing equipment" Trends Food Sci.Technol. 8 (1997) 2, S. 54-57.
- [17] Bobe, U.: "Die Reinigbarkeit technischer Oberflächen im immmergierten System", Dissertation, München, 2008.
- [18] DIN EN ISO 4287:2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren.
- [19] VDMA 24432:1992: Komponenten und Anlagen für keimarme oder sterile Verfahrenstechniken; Qualitätsmerkmale und Empfehlungen.

# Integrating Failure Analysis into the Conceptual Design of Cognitive Products: Towards a New Paradigm

Thierry Sop Njindam<sup>1</sup>, Torsten Metzler<sup>2</sup>, Kristin Paetzold<sup>1</sup> and Kristina Shea<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Technical Product Development  
Universität der Bundeswehr München*

<sup>2</sup> *Virtual Product Development Group  
Technische Universität München*

Cognitive products integrate cognitive functionalities such as perceiving the environment, learning and reasoning from knowledge models that are created through the combination of a mechatronic system and advanced software algorithms. While the area of cognitive products is still in his infancy, we regard the safe and reliable performance fulfillment as one of the challenging tasks for the research community to develop cognitive products that meet customer expectations. This paper presents how failure analysis can be integrated in the functional modeling process of cognitive products to increase their safety. For this purpose, we explores if current state failure analysis methods are appropriate for analyzing cognitive products and where their weaknesses and strengths are. The cognitive coffee waiter is used as an illustrative example to concretely show the limitations of these methods.

## 1 Introduction

The effectiveness of failure analysis methods in engineering design is decreasing due to more complex products. By taking a look at modern engineering products, more than four decades have passed now since classical mecha-

---

tronic products have been introduced for the first time. Harashima et al. defined in [8] the term mechatronics as “the synergetic integration of mechanical engineering with electronics and computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes.” Since then, the requirements of some of these products related to man-machine interaction and degree of autonomy have changed, thus increasing the amount of software and bringing other considerations to the foreground such as user interaction, environment considerations, product behavior, emergent properties etc. To date, products are called smart, adaptive, intelligent or cognitive. Cognitive products possess cognitive functions i.e. to learn, to perceive or to reason according to the integrated logic, flexible control loops and cognitive algorithms. This flexible behavior addresses users’ needs and desires better than mechatronic products do, but comes along with an increased susceptibility to failures and errors. Birolini stated in [6] that a “failure occurs when the item or the product stops to perform its required function”. Performing failure analysis at early design stages refers then to detecting possible failures, to finding the cause (es) of the defects and to eliminating them as early as possible, thus, reducing iterations in the development process of safer and more reliable products.

Holding in view these considerations, it is our belief that cognitive technical systems or cognitive products, with regards to their self-sensing capabilities, high degree of autonomy, emerging behavior and increased complexity might be, to the contrary of what has been claimed by many researchers, rather less reliable and robust. Hence, failure analysis is more important today and in the future than it was in the past since cognitive products are supposed to closely interact with users and operate in a non-predefined environment, but despite that, must perform accurately their tasks at all times.

Failure analysis is not a novel concept at all. Several well-known failure analysis methods, e.g. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Fault Tree Analysis (FTA), Hazard and Operability Studies (HAZOP) and Functional Hazard Assessment (FHA) were developed in 1960s by military or aerospace agencies mainly because of the strict safety and reliability requirements in these fields. Since then, they have been extended with good success to other fields including the automotive sector, the electronic sector and the mechanical engineering industry. Nevertheless, the German Department of Motor Vehicles recorded an increasing amount of callbacks in the automotive industry during the last years. This might probably be related to the increased integration of those advanced mechatronic systems such as adaptive cruise control (ACC), driving assistance systems, automated or semi-automated parking aids and so on, into today’s vehicles that expand the range of the

---

classical vehicle behavior, thus pushing towards more autonomy. Even though the management of failures resulting from the increasing products complexity has been recognized as a problem by many research institutions, a solution has not been found yet. Till now, redundancy and highly robust components have been applied as universal solution to overcome these hurdles, thus leading complex systems, i.e. the NASA Rover to being very expensive [9]. Furthermore, this approach is not appropriate for mass production of consumer products as required for cognitive products. Redundancy, for example, comes often along with an increase in weight and highly robust components are generally more expensive than standard components. *But what has changed since the last decades in failure analysis methods? Are fundamentals and actual theory behind these methods suitable for these software-intensive products and systems such as cognitive products or do we have to adapt them to the actual context? This paper explores if current state failure analysis methods are appropriate for analyzing cognitive products and where their weaknesses and strengths are. This provides way for the development of new methods supporting the failure analysis of cognitive products that heavily rely on software.* Due to the limited scope of this paper, we will limit ourselves to the methods for qualitative failure analysis we mentioned earlier. An extension to quantitative methodologies would go beyond the size of this paper.

## 2 Background

The following section introduces the relevant terms and methods of this paper, namely a basic introduction to cognitive products, their functional modeling and methods for qualitative failure analysis.

### 2.1 Cognitive Products

“Cognitive products are tangible and durable things with cognitive capabilities that consist of a physical carrier system with embodied mechatronics, electronics, microprocessors and software. The surplus value is created through cognitive capabilities, enabled by flexible control loops and cognitive algorithms” [3]. Cognitive capabilities basically describe the basic functions enabling cognition as a whole, e.g. to learn, to think, to understand and to reason [5]. Cognitive functions enable cognitive products to act more flexible because they do not necessarily obey rigid and pre-defined control algorithms but instead process the perceived data according to the context [5]. Customer needs are satisfied through the intelligent, flexible and robust behavior of cognitive products that meet and exceed the customers’ expectations. Cognitive products have all or a subset of capabilities of Cognitive Technical Sys-

tems (CTS) and the solid grounding of an everyday product that meets user needs and desires” [3].

Issues about their safety and reliability in unconstrained or partially known environments in which they interact with humans have to be clarified, especially at early stages of their design to avoid costs related to callbacks and later quality assurance measures, and represent one of the most challenging topics to be mastered before their market launch [18].

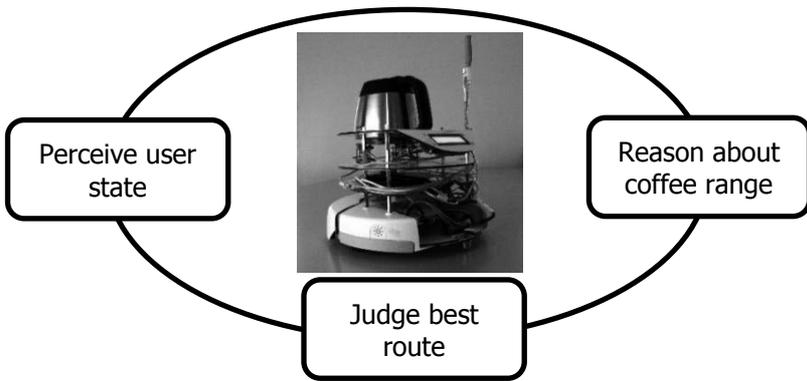


Figure 1: The cognitive coffee waiter “Starbugs”

“The coffee robot waiter (figure 1) is the most developed prototype and students continuously work on developing its cognitive capabilities. It is able to serve coffee based on an order placed on a website. This is enabled since the robot initially learned the environment, using a laser range scanner, and subsequently has a map of the environment. If more than one order is placed, it calculates the optimal route according to an online traveling salesman algorithm and can move autonomously to the target positions. Recently, the amount of coffee in the pot is taken into account for the calculation of a route as well as the previous average coffee consumption of the users. According to its estimation, it might refill coffee before serving customers if it anticipates running out of coffee. On its way, it can avoid obstacles by driving around them and gives the customers feedback about how long they have to wait. This information is also based on a learning algorithm that estimates the time to target based on parameters such as distance, past experience and dynamic obstacle volume” [13].

In the coffee robot waiter project, the software is structured as depicted in figure 2. The architecture is described from bottom to top. A Player server running on the robot hosts modules (called drivers in Player) for accessing the Create platform, laser range scanner and Phidgets. Another Player server runs on the computationally more potent laptop. It hosts proxy modules connecting to the Player server on the robot to forward data and commands, and modules processing the data: A localization module estimates the current robot position based on the robot's odometry data and by comparison of its laser range scans to a previously learnt map of the environment, a local navigation module provides short-range navigation and a global navigation module performs path-planning in the environment map. The actual robot controller is the client program connecting to the player server on the laptop. For the coffee robot waiter, Python has been chosen as the client programming language. It accesses a remote web server to fetch coffee, orders and then uses Player's global navigation module to drive the robot to its targets, as well as directly accesses the Phidgets module for displaying text and reading the coffee pot force sensors. The web server additionally provides the interface for users to place their coffee orders.

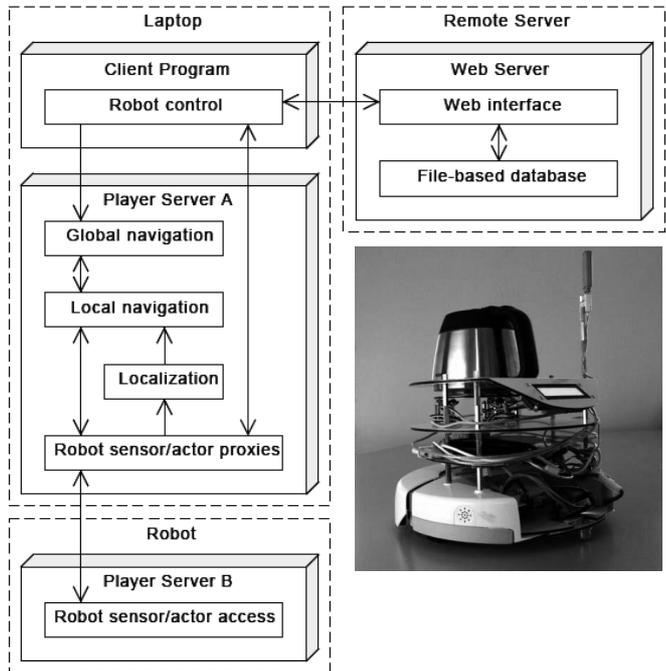


Figure 2: Starbugs software architecture: Programs, modules and information flow.

## 2.2 Functional Modeling with Cognitive Functions

“The process of describing the product function of a system or product in a model through sub-functions is called functional modeling [12, 13]. This usually takes place in conceptual design after identifying the system or product requirements and before searching for solutions. It is a key step in the product design process for original and redesign [14]. Functional modeling is an abstract but direct method for understanding and representing technical systems considering the product function and all sub-functions of the system or product while also representing their connectivity. It can help designers to better understand complex products [13, 15], e.g. cognitive products and CTSs. Design activities are eased through functional modeling by problem decomposition, physical modeling, product architecting, concept generation and team organization [12, 14, 15]. Flow-oriented function models are appropriate to describe systems or products with flows [12, 14]. Therefore, it is essential to define how different functions can be connected. This is usually done using energy, material and signal flows between functions in order to gain an in-depth understanding of the product’s functionality, especially when it comes to failure analysis. Generally speaking, every product can fail regardless of whether the focus is on hardware or software. Drawing upon functional models that illustrate signal, data and information flows during the product’s operation may help to reflect and gain an overall understanding of the possible failure scenarios at the conceptual stage of the design process.

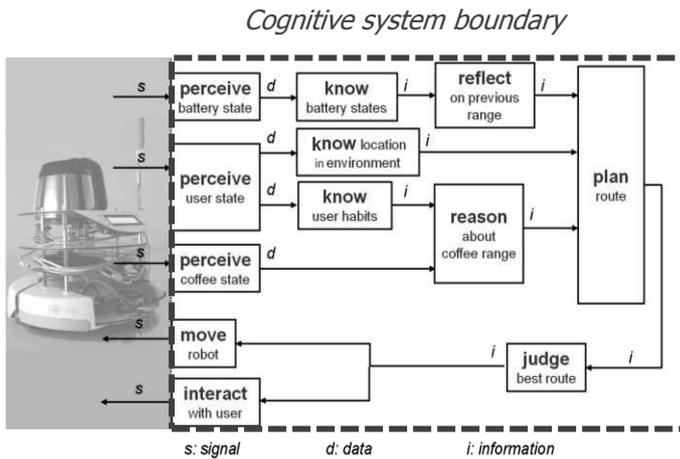


Figure 3: Application example of functional modeling with cognitive functions, according to [5].

---

Following, the functional modeling of a cognitive product using cognitive functions is explained. Due to the complexity of the whole system the coffee robot waiter is modeled only partially, taking into account functions that are related to the planning part of serving coffee. The result is a clearly arranged function structure, shown in figure 3. During service hours of the robot there is "interaction" between the users and the robot, more precisely the users can place orders on their computers that are transferred through electronic "user signals" to the robot. The robot "perceives user states" including who placed an order, expressed as "user data", and where to deliver coffee to, expressed as "location data". Because the robot has an internal map of its environment it "knows locations in the environment" and can transform the "location data" into "location information", meaning that it knows where to deliver the coffee in its environment. This is the first information necessary to "plan a route" for delivering coffee. Additionally, the robot is able to allocate certain user profiles to "user data" and assign user habits to the "user data". This is possible because every user has to register prior use of the service. The robot "knows user habits" of every user from past events. The result is "user information". Together, "coffee pot data" that comes from "perceiving coffee state" and "user information" enable the robot "to reason about coffee range" according previous coffee consumption of the users in the queue waiting for coffee and current filling level of the coffee pot. As a result "coffee information" is generated and integrated in the route planning. Since the start location for the route is necessary and given by the actual location of the robot, it needs "to perceive the environment", e.g. with a laser range scanner, and compare the "perceived environmental data" with an internal model of the environment. The robot "knows locations in the environment" and compiles "location information" about the current position. "Location information" of the robot itself and users is essential "to plan an optimal route" considering distance and "take account" of all waypoints. In our application example the cognitive function "plan route" is accomplished by applying an online traveling salesman algorithm. The result is "route information" [5].

## 2.3 Failure Analysis Methods

Failure analysis basically refers to finding the causes as well as the effects of failures in products. The focus is hereby neither to show the applications in the various disciplines or domains nor to differentiate how these methodologies can be used for quantitative or qualitative assessment, but to rely on the main principles of the aforementioned failure analysis methods to show their limitations for the analysis of cognitive products. Figure 4 visualizes the correlation of these failure analysis methods with system details for investigations in the conceptual design stage.

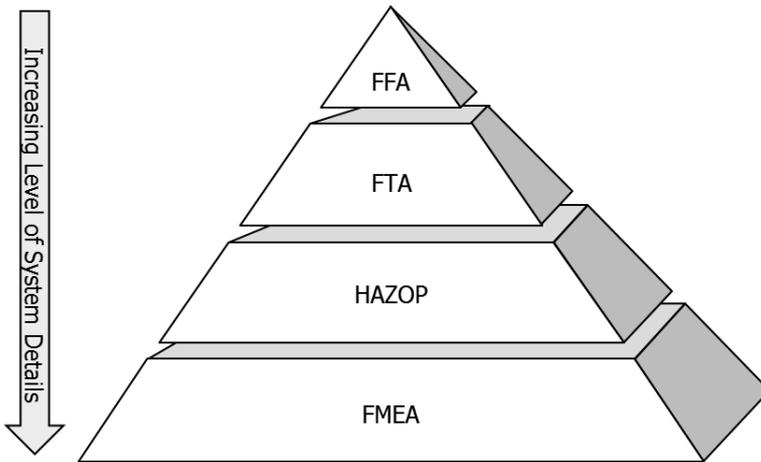


Figure 4: Common Failure Analysis Methods and their Level of Abstraction

While analyzing defects or systematic failures of mechanic or electronic artifacts, several failure analysis methods are available and can be applied. Their aim is mainly to identify and withdraw or fix weaknesses during the product development process. These weaknesses, which most of the time appear in form of failure modes, are not well identifiable for complex multidisciplinary systems, especially at early design stages when the product structure is not yet completely specified. Functional Hazard Assessment (FHA) is especially recommended to be carried out during these early design stages since it can be applied at this low abstraction level, and belongs therefore to the so-called predictive failure analysis methods. In this process (see figure 5), the effects and impacts of the failures of product functions on the system are analyzed. From there on, the estimated functional failures will be assigned to risk factors. Wilkinson et al. claim in [10] the ambiguous formulation of the product functions related to the predefined requirements, especially when it comes to the levels of abstraction. Staying at a too abstract level brings us far from reality and implementation details [10]. Furthermore, functional dependencies as well as interaction with the outside world, which are not unusual in technical artifacts, cannot be addressed with this method. Moreover, the effect of these functional failures on the system can be investigated only in the simplest cases. This method seems therefore not to be adequate for complex multidisciplinary products i.e. cognitive products.

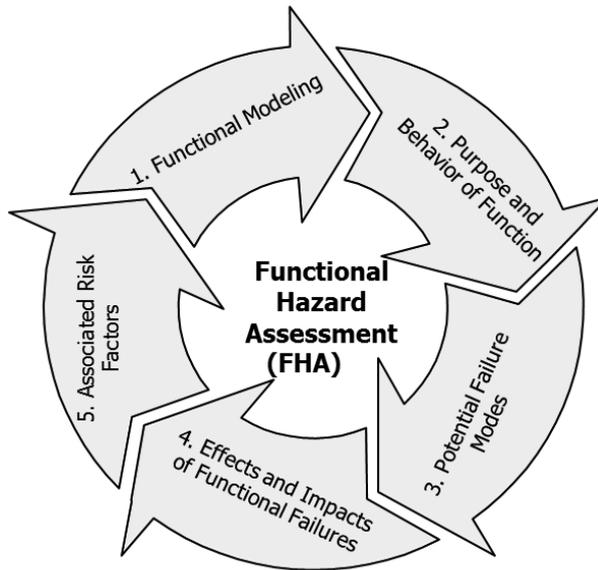


Figure 5: Analysis Steps of the Functional Hazard Assessment (FHA) [10]

Another method whose purpose is to identify potential failures and undertake corrective actions is the Hazard and Operability Study (HAZOP) which has also been developed throughout the 1960s. The constituent steps are defined in fig.6 and reflect the iterative process which is mostly viewed as teamwork. A team of experts is supposed to be led by a moderator and analyzes the system step by step starting with the description of the intended system behavior description or its intended functionality, then using simple keywords such as (more, less, both, different from) to analyze the impact of the system's behavior deviation in order to undertake corrective actions.

Fault Tree Analysis (FTA) is another widely used method for safety and reliability investigations. FTA is a top-down approach to failure analysis and aims at translating the physical structure of a system into a structural logic diagram. A Top Event, which is considered as a product failure or a product undesirable event is considered as the starting point of this analysis procedure. Furthermore, causes or basic events can then be investigated in the context of the system operation as well as of its environment depending on whether they lead individually or in combination to this Top-Event, thus being connected through logic gates such as AND, OR, etc.

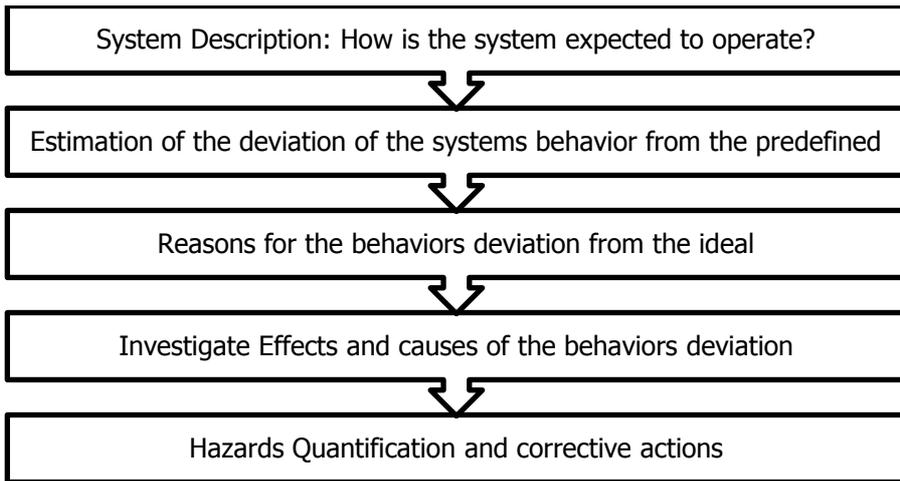


Figure 6: Hazard and Operability Studies (HAZOP) [19]

.FTA has many advantages, inter alia, its easy to perform methodology and its application in a wide range of areas. With the FTA, it is possible to identify weaknesses of the system at early design stages, to predict some aspects of the system behavior in the sense of events and to undertake corrective actions, thus considering failures of the system as a whole including hardware failures, software errors and human failures. But it cannot consider all system failures, especially for cognitive products whose highly dynamic environment cannot be defined in advance. Moreover, failures, which occur but are not related to the considered Top-Event as well as failures resulting from the emerging behavior of the system, cannot be represented or assessed to be realistic by the specialist [21]. Fault Tree Analysis cannot be checked in most of cases for correctness or consistencies and rely too much on the experience or intuition of analysts, in other words: on their informal understanding on the system to be analyzed. Xiang et al. questioned fundamentally in [20] whether the system's safety or reliability can be proven after having founded the basic fault events. However, Stamatelatos et al. point out in [21] the qualitative nature of Fault Tree assessments although they can also be used for quantitative purpose, in so far as quantitative data are available or be estimated through probabilistic analysis.

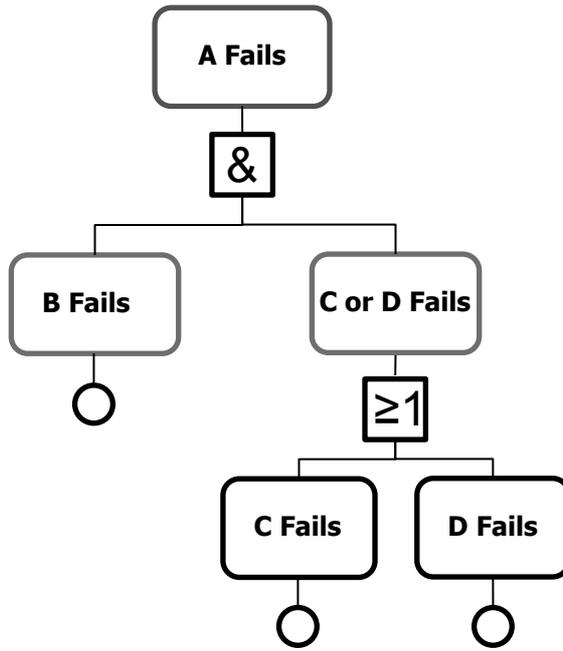


Figure 7: Fault Tree Analysis (FTA)

Figure 7 illustrates the fault-logic approach of the FTA, whereby the event "A Fails" represents the Top-Event. The Combination of the basic events "B Fails" and "C or D Fails" leads to the aforementioned Top-Event. The failure of either the components C or D, which leads to the basic events "C Fails" or "D Fails", leads to the event "C or D Fails".

The Failure Modes and Effects Analysis is probably the most popular and widely used method to systematically identify failure modes and their consequences within a system to conduct RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety)-Analysis. The procedure of the FMEA is mainly team-based. This means that its execution is mainly carried out by experts from different disciplines to detect failure modes, while considering different aspects and their views of the product to be investigated on. One of the main characteristics is the risk assessment and for optimization actions and countermeasures [17].The Risk Priority Number (RPN) quantifies the criticality of the detected failures with regard to their impact on the product, detective and preventive measures. Moreover, it is equal to the product of the Severity (S), Occurrence

(O) and Detection (D). A scale of numbers ranges from 10 to 1 for the Risk Assessment Value is used for the evaluation of the criticality level, whereby 10 will be assigned at high risk or poor evaluation and 1 for low risk or good evaluation. Priorities will then be specified after having identified assessments and the Risk Priority Number (RPN) to draw up optimization and improvement measures related to the design concept and eliminate weaknesses. The whole process is illustrated in figure 8.

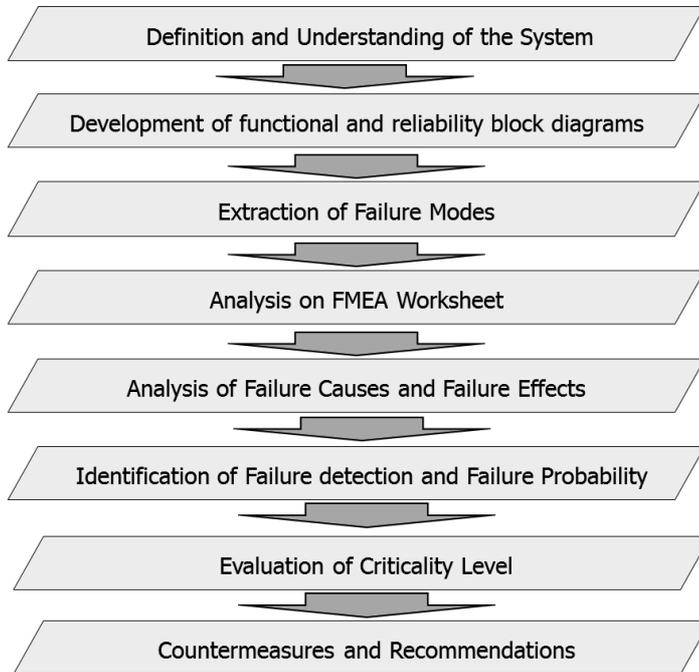


Figure 8: Failure Modes and Effects Analysis Procedure [2]

### 3 Limitations of the methods with relation to the cognitive coffee waiter

This section provides a set of limitations which might be encountered to the specific application of the abovementioned failure analysis methods to the design of cognitive products. Then we will consider the analysis and synthesis made by analyzing failures of cognitive products in specific cases to suggest enhancements and new considerations to be taken into account in future projects.

According to [10], Functional Hazard Assessment (FHA) is best required for early analysis of product failures when restricting our considerations to the conceptual design stage, in particular at the functional level. The identification of functions of the cognitive waiter as illustrated in figure 2 is helpful to consider related failure modes and safety integrity levels (SIL 1 -4: Negligible – Marginal – Critical - Catastrophic) as in most safety related recommendations, i.e. IEC 61508. An exemplary illustration of the assignment of functional failure modes to Safety Integrity Levels according to our considerations is showed in figure 9.

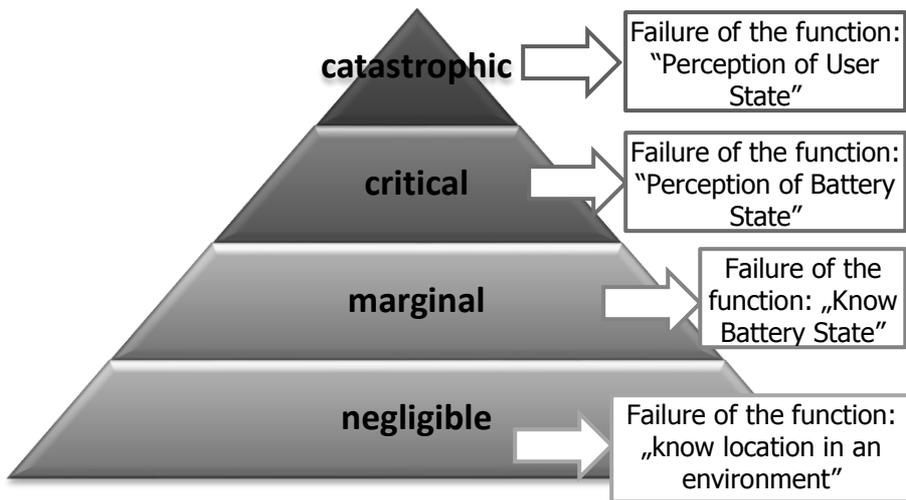


Figure 9: Assignment of functional failure modes to safety integrity levels

Nevertheless, predicting the effects or consequences of these functional failures on the product or on the environment is a gigantic and non-trivial task. For this purpose, the users as well as the environment considerations need to be defined. In our view, environmental conditions are harsh, highly dynamic and difficult to predict at early design stages; therefore, specific use cases such as indoor use, charge at docking station, etc. shall be defined in order to analyze the effects of these functional failures in those specific use cases. FHA shows, as already mentioned, further limitations when it comes to consider functional dependencies. Referring to fig. 2, it is not obvious to clarify the dependency in terms of failure or misbehavior between the functions "perceive battery state" and "reflect on previous range". On the whole, traditional FHA cannot be applied to cognitive products due to their open-loop characteristics which allow them to strongly interact with environment as well

---

as users and enforce these considerations with additional functional dependencies as part of the failure analysis even at early design stages.

Hazard and Operability Study (HAZOP) has been defined earlier on as another team-based technique to identify and analyze critical and catastrophic failures. The application of this method assumes that the system behavior must be as precisely clarified as possible to be able to estimate the causes or reasons as well as consequences of the system misbehavior. An Element-to-Element Analysis of the Functional Model coupled with the use of guide words such as "More, Less, Too Little, Too Early, No or Not" as stated in [19] might be according to the functional model of the coffee waiter (fig. 3) useful for safety analysis i.e. to clarify why the wrong perception of the battery state might have an influence on the route planning. However, the deviations from the intended system might be ambiguous at this abstract functional level. The use of this method is not appropriate for a more detailed model (fig. 2) but rather for functional models which exhibit flows (signal, data, information). Integrating environment uncertainties as well as users considerations, which might lead to system disturbances, need to be considered. In our considered view of the nondeterministic behavior of cognitive products, investigations on reliability and safety cannot be therefore undertaken on a deterministic way due to the unpredictability of the environment. Failure analysis of cognitive products at the functional level must be enhanced with behavioral and structural considerations. As HAZOP is not suitable for detailed models of cognitive products at tangible level where components are defined, it cannot be sufficient alone for safety or reliability validation.

Höfler defined in [2] the FMEA as a generally recognized method to systematically analyze failures systems by means that external influences can hardly be taken into consideration. Moreover, the system dynamic behavior as well as the successive sequences cannot be considered from the functional model (fig. 3) are not considered. The assumption that failures are independent from each other or cannot occur simultaneously cannot be reasonably considered for cognitive products. This means that traditional FMEA investigates the effect of a single failure while the rest of the system is considered to function properly. By looking at figure 10 that i.e. the misestimation of the battery states and the misjudgment of the optimal route cannot happen at the same time. But this assumption cannot be scientifically approved in this example. In all, we cannot leave aside the dynamic behavior of the system even at this conceptual design stage because it is in the essence of cognitive products to operate in the real world environment, thus interacting with users or other products. Therefore, only a dynamic system as well as failure behavior can be considered.

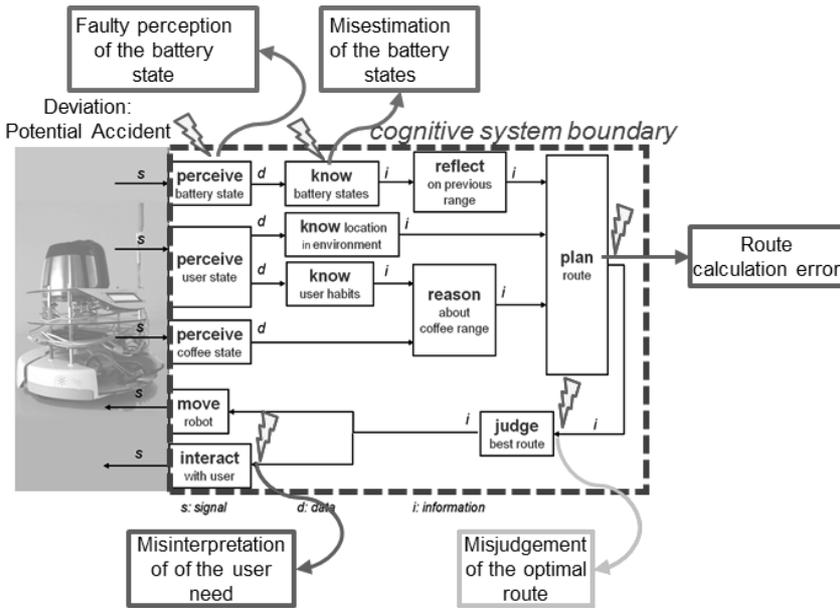


Figure 10: Cognitive coffee waiter: deviation from the system behavior

The first step by the evaluation of the robustness of cognitive products with the Fault Tree Analysis (FTA) is to find in a deductive manner events or causes that lead to failures of the system, which are referred to in this context as Top-Events. One strength of the FTA is its Top-down approach to search for the failure causes regardless of whether they are in the software or in the hardware. The difficulty lies in the modeling of system failures. FTA can certainly not model all system failures. As already mentioned, it is necessary to consider use cases, in which a reduced amount of reduced can be considered. One additional weakness of the FTA is that only the failures that lead to the considered Top-Event can be considered. Even some basic events which might lead to failures can be overlooked. Furthermore, it is not clear how environmental conditions and user behavior, which might also lead to the failure of the system, can be integrated since they cannot be considered as static.

#### 4 Discussion and Conclusion

In this contribution, we tackled the integration of the failure analysis methods in the conceptual design stage of cognitive products. After the definition and the functional modeling of cognitive products in the first step, we

---

briefly covered the basic concepts of the Functional Hazard Assessment (FHA), Hazard and Operability Study (HAZOP), Fault Tree Analysis (FTA), Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for the qualitative failure analysis. Further, these methods have been analyzed if and in what extent they are suitable for the failure analysis of cognitive products. Deriving and integrating real world conditions as well as user interactions, which must be considered and might lead to system failures, represents a challenge for the failure analysis of cognitive products. It seems realistic to argue and analyze the failure behavior of cognitive products on the base of predefined usage scenarios in order to limit the amount of failures to be analyzed. But despite that, these traditional failure analysis methods have several weaknesses which need to be compensated. FMEA does not consider the dynamic system behavior as well as common cause failures; FTA can only illustrate failures that lead to the top event system failure; FHA and HAZOP do not take the functional dependencies into consideration and remain to abstract for later design stages and implementation.

However, we are aware of the difficulties related to the integration of these aspects. We can only argue on the base of these usage scenarios otherwise the amount of failures which may occur during the operation and which are to be considered will grow explosively, though harshly dynamic environmental considerations as well user integration will contribute to the better understanding of the failure behavior analysis of cognitive products.

## 5 Acknowledgement

This research is part of the Innovation@CoTeSys project within the Cluster of Excellence, Cognition for Technical Systems – CoTeSys ([www.cotesys.org](http://www.cotesys.org)), funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

## Literature

- [1] Graham, J .H. et al.: "Research Issues in Robot Safety", Carl Hanser Verlag, München, 2002.
- [2] Höfler, A.: " Mechatronik-FMEA: Erweiterung der Methode für die Analyse von mechatronischen Systemen", VDM Verlag Dr. Müller, 2008
- [3] Metzler, T., Shea, K.: "Cognitive Products: Definition and Framework". In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Design Conference – DESIGN 10, Dubrovnik, pp. 865-874.

- 
- [4] Sop Njindam, T., Paetzold, K.: "An investigation of the reliability of fault-tolerant cognitive technical systems". In 8<sup>th</sup> European Conference on Computing and Philosophy, ECAP10
- [5] Metzler, T., Shea, K.: "Taxonomy of Cognitive Functions". In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED11, Copenhagen, Denmark, 2011, pp. 330-341.
- [6] Birolini, A.: "Reliability Engineering: Theory and Practice", 6<sup>th</sup> Edition, Springer Verlag, Zurich, September 2010
- [7] Alter W. & Logan J.: "NASA goes to ground - National Aeronautics and Space Administration", Whole Earth Review, 1991
- [8] Harashima et. al.: "What is it? Why, and How" An Editorial, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No 1, 1996, S. ¼
- [9] Stancliff, S. B.: "Planning to Fail: Incorporating Reliability Analysis into Design and Mission Planning for Mobile Robots", PhD-Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2009.
- [10] Wilkinson, P. J. et. Al. "Functional Hazard Analysis for Highly Integrated Aerospace Systems", Certification of Ground/Air Systems Seminar, Ref (No. 1998/255), IEEE, 2002
- [11] Metzler, T., Shea, K.: "Lessons Learned from a Project-Based Learning Approach for Teaching New Cognitive Product Development to Multi-Disciplinary Student Teams." In: Proceedings of the ASME 2011 IDETC/CIE 2011, Washington, DC, USA.
- [12] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Berlin 2008.
- [13] Erden, M.S.; Komoto, H.; van Beek, T.J.; D'Amelio, V.; Echavarria, E.; Tomiyama, T.: A review of functional modeling: Approaches and applications. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 22, 2008, pp.147-169.
- [14] Stone, R.B., Wood, K.L.: Development of a Functional Basis for Design. In: *Journal of Mechanical Design*, Vol. 122, December 2000, pp. 359-370.

- 
- [15] Strube, G.: Modelling Motivation and Action Control in Cognitive Systems. In: Schmid, U.; Krems, J.; Wysocki, F.: Mind Modelling. Berlin, Pabst, 1998, pp. 89-108
- [16] Beetz et. Al.: „Cognitive Technical Systems – What is the Role of Artificial Intelligence?“
- [17] Bertsche, B.:“Reliability in Automotive and Mechanical Engineering“, Springer Verlag, Stuttgart, 2007
- [18] Sop Njindam, T., Paetzold, K.: “Design for Reliability: An Event and Function-Based Framework for the Failure Behavior Analysis of Cognitive Products in the Conceptual Design Stage“, In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED11, Copenhagen, Denmark, 2011
- [19] Earthy, J. V.:“ Hazard and Operability Study as an Approach to Software Safety Assessment“, Colloquium on Hazard Analysis, IEEE, August 2002
- [20] XIANG, J. et. al.:“ Fault Tree and Formal Methods in System Safety Analysis“, 4th International Conference on Computer and Information Technology, 2004
- [21] Stamatelatos et. Al. “Fault Tree Handbook with Aerospace Applications“, NASA Office of Safety and Mission Assurance, 2002

# Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung nicht-idealer bewegter technischer Systeme

Michael Walter und Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg*

The success of a product's development is essentially affected by its functionality. So the product developer has to ensure the functionality as early as possible. In the case of a non-ideal system a tolerance analysis is performed to analyze the effect of deviations, deformations etc. on a functional key characteristic. However, the product developer has to draw the right conclusions based on the results of the tolerance analysis. In this paper an approach (using Taguchi's quality loss function) is presented that enables the product developer to analyze these results and to deduce appropriate measures to ensure the functionality by achieving a more robust design.

## 1 Einleitung

Die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit eines Produktes als oberstes Kriterium der Produktentwicklung stellt den Produktentwickler vor die Aufgabe, sämtliche Einflüsse auf diese bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen. Hierbei steht ihm mit der rechnerunterstützten Toleranzanalyse ein Werkzeug zur Verfügung, um gezielt die Auswirkungen auftretender geometrischer Abweichungen der Einzelbauteile auf die Funktionsfähigkeit des Produktes zu ermitteln. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse können somit Maßnahmen zum Erreichen bzw. zur verbesserten Sicherstellung der Funktionsfähigkeit (Robustheit) abgeleitet und ergriffen werden.

---

Jedoch haben neben den geometrischen Bauteilabweichungen in Maß, Form, Lage und Oberfläche auch weitere Effekte Einfluss auf die Funktionserfüllung eines Produktes. Die Toleranzanalyse muss somit neben den bereits genannten geometrischen Abweichungen auch den Einfluss weiterer Effekte, wie beispielsweise der elastischen Bauteilverformung, in ihre die Funktionsbetrachtungen miteinbeziehen.

Im Folgenden soll der Fokus auf der Toleranzanalyse bewegter technischer Systeme liegen. Diese führen auf Grund ihrer Zeitabhängigkeit in ihrem Bewegungsverhalten zu ständigen Änderungen im Einfluss der genannten Abweichungen und Effekte auf die Funktionsfähigkeit. Mit dem Ziel, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse der Toleranzanalyse eine Systemoptimierung zu erreichen, gilt es den Produktentwickler anhand situationsspezifischer Handlungsempfehlungen geeignet zu unterstützen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird hierfür zunächst eine Klassifizierung möglicher Abweichungen des bewegten Systems von dessen Soll-Geometrie, entsprechend ihrer Auswirkungen auf ein definiertes funktionskritisches Maß, vorgenommen. Auf Basis dieser Klassifizierung wird anschließend eine Vorgehensweise zur Ableitung von Handlungsempfehlungen vorgestellt. Diese Handlungsempfehlungen ermöglichen, basierend auf den Ergebnissen einer vorhergehenden Toleranzanalyse, eine Optimierung der Systemdefinition hinsichtlich der Funktionserfüllung des bewegten Systems. Die praktische Anwendung der Vorgehensweise wird in zwei Beispielszenarien anhand des Kurbeltriebs eines 4-Takt-Verbrennungsmotors aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und nennt zukünftige Forschungstätigkeiten im Rahmen des Toleranzmanagements bewegter technischer Systeme.

## 2 Klassifizierung möglicher Abweichungen

Die Klassifizierung der Abweichungen, welchen die Komponenten eines bewegten technischen Systems unterliegen, erfordert zunächst eine genaue Betrachtung ihrer Ursachen sowie der Auswirkungen auf ein – im Rahmen der Toleranzanalyse definiertes – funktionsrelevantes Maß. [1] unterteilt die Abweichungen, die aus der Fertigung resultieren, bezüglich der Zeit, ihres Verhaltens (Zufälligkeit), der Ursache sowie deren Einfluss auf die Geometrie. Diese Einteilung berücksichtigt jedoch nur fertigungsbedingte Abweichungen. Abweichungen, die aus dem Betrieb des Systems resultieren, können jedoch ebenfalls entsprechend dieser Kriterien charakterisiert werden.

Hierbei lässt sich sagen, dass reine Fertigungsabweichungen als statische, also zeitunabhängige Größen verstanden werden können. Hingegen unterlie-

gen betriebsbedingte Abweichungen (wie beispielsweise strukturmechanische Effekte) einer zeitlichen Abhängigkeit vom vorliegenden Betriebszustand (dynamisches Verhalten der Abweichungen). Weiterhin zeigen Fertigungsabweichungen ein statistisches Verhalten, d.h. sie unterliegen in ihren Ausprägungen einer Streuung. Die betriebsbedingten Abweichungen resultieren hingegen aus dem Betriebsverhalten und sind somit deterministischer Natur. Die Auswirkungen der möglichen Abweichungen auf ein funktionsrelevantes Maß zeigen sich bei Betrachtung des Verlaufs des Funktionsmaßes über die Zeit (Bild 1). Während die streuenden Fertigungsabweichungen ebenso zu einer Streuung des Funktionsmaßes führen, resultiert aus einer deterministischen betriebsbedingten Abweichung eine Verschiebung (die sog. Mittelwertverschiebung) der vorliegenden Häufigkeitsverteilung des Funktionsmaßes aus der Nominallage. Tabelle 1 stellt die Klassifizierung der Abweichungen eines bewegten technischen Systems nochmals zusammen. [2]

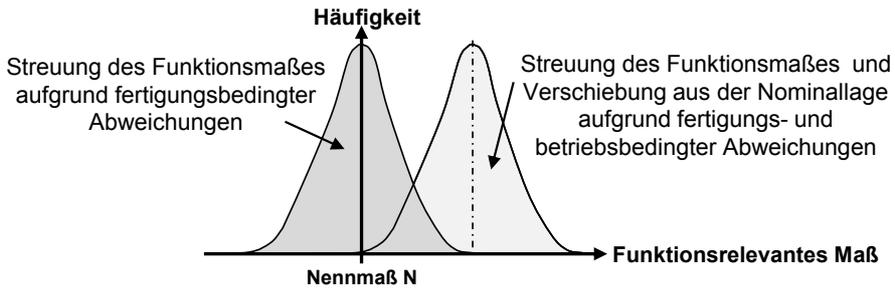


Bild 1: Auswirkungen der unterschiedlichen Abweichungen auf ein funktionsrelevantes Maß zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Tabelle 1: Klassifizierung möglicher Abweichungen bewegter Systeme

<b>Art / Ursache der Abweichungen</b>	<b>Zeit</b>	<b>Zufälligkeit</b>	<b>Auswirkungen auf ein funktionsrelevantes Maß</b>
Fertigungsbedingt	Zeitunabhängig (quasi-statisch)	Statisch	Streuung
Betriebsbedingt	Zeitabhängig (dynamisch)	Deterministisch	Verschiebung aus der Nominallage

---

### 3 Ableiten des Handlungsbedarfs

Die Toleranzanalyse eines abweichungsbehafteten, bewegten technischen Systems nach [2] ermöglicht die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs eines funktionsrelevanten Maßes (sog. Schließmaß) unter Berücksichtigung tolerierter Fertigungsabweichungen sowie betriebsbedingter Abweichungen. Ferner kann mittels einer Sensitivitätsanalyse (auch als Beitragsleisteranalyse bezeichnet) der prozentuale Anteil der Streuungen der jeweiligen Fertigungsabweichungen zur Streuung des funktionsrelevanten Maßes ermittelt werden [3]. Gleiches ist für die Beitragsleister (betriebsbedingte Abweichungen) zu einer möglichen Mittelwertverschiebung des funktionsrelevanten Maßes möglich [4]. Der Produktentwickler hat somit die Möglichkeit ein bestehendes bewegtes System auf Basis der getroffenen Systemdefinition hinsichtlich der Funktionserfüllung zu analysieren.

Jedoch bleibt die Frage unbeantwortet, wie der Produktentwickler auf Basis der gewonnenen Ergebnisse notwendige Änderungen an der Systemdefinition oder mögliche Maßnahmen zur Optimierung des Systems ableiten und umsetzen kann. Somit besteht die Notwendigkeit, den Produktentwickler sowohl bei der Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse, als auch bei der Ableitung geeigneter Handlungsempfehlungen zu unterstützen.

### 4 Vorgehensweise zur Systemoptimierung

Die gezielte Manipulation der Systemdefinition mit dem Ziel einer Optimierung des Systems erfordert das strukturierte und systematische Vorgehen des Produktentwicklers. Auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden Toleranzanalyse müssen zunächst die Zeitpunkte des Schließmaßverlaufs ermittelt werden, an denen das Schließmaß aus den Spezifikationsgrenzen läuft und somit die Funktionsfähigkeit des technischen Systems nicht mehr gegeben ist. Eine Analyse der jeweils vorliegenden Schließmaßverteilung ermöglicht die Identifizierung der verursachenden Abweichungsart (fertigungs- und/oder betriebsbedingt). Mit Hilfe dieser Erkenntnis können im Folgenden gezielt Handlungsempfehlungen gewählt und unter Berücksichtigung der Beitragsleister zur Streuung und Mittelwertverschiebung des funktionsrelevanten Maßes angewendet werden.

#### 4.1 Analyse der Schließmaßverteilung zu kritischen Zeitpunkten

Wie bereits in Bild 1 dargestellt, wirken sich fertigungsbedingte und betriebsbedingte Abweichungen unterschiedlich auf ein funktionsrelevantes Maß eines bewegten Systems aus. Um dennoch gezielt Maßnahmen zur Optimie-

ung des Systems zu ergreifen, ist zunächst die eindeutige Identifikation der (zu den kritischen Zeitpunkten) vorherrschenden Schließmaßverteilung notwendig. Hierzu soll im Folgenden ein neuer Ansatz vorgestellt werden, der mit Hilfe der Verlustfunktion nach Taguchi eine Identifikation der Abweichungen ermöglicht, die zu einem Überschreiten der Spezifikationsgrenzen führen.

[5] besagt, dass die Abweichung eines Funktionsmaßes von dessen nominalem Sollwert bereits mit einem Qualitätsverlust einhergeht, obwohl sich dieses noch innerhalb der Spezifikationsgrenzen bewegt. Somit weicht Taguchi von der herkömmlichen Auffassung des Toleranzbegriffs und dem reinen Gut/Schlecht-Denken ab und erweitert die Forderung der Einhaltung der Spezifikationsgrenzen um das Bestreben zum Sollwert. Die Verlustfunktion

$$L(Y)=z(Y-N)^2 \tag{GI. 1}$$

beschreibt diese Denkweise [5]. Hierbei beschreibt  $z$  den Verlustkoeffizienten (z.B. in €/Teil),  $Y$  das funktionsrelevante Maß bzw. Schließmaß (kurz: SM) und  $N$  das Nennmaß. Bild 2 zeigt mögliche Schließmaßverteilungen zu zwei funktionskritischen Zeitpunkten und die Verlustfunktion  $L(SM)$  nach Gl.1.

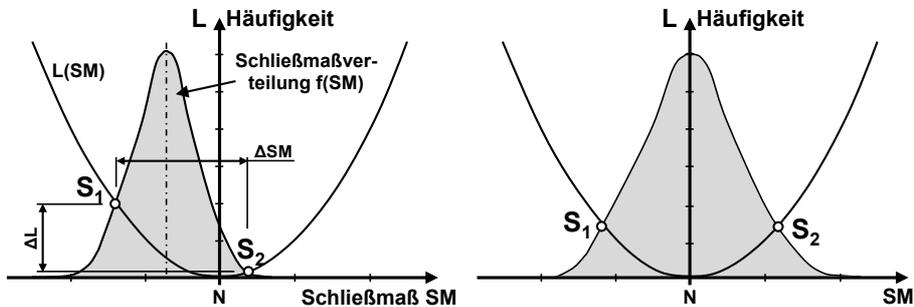


Bild 2: Mögliche Schließmaßverteilungen  $f(SM)$  zu funktionskritischen Zeitpunkten sowie Verlustfunktion  $L(SM)$  nach Taguchi

Der Ansatz zur Identifikation der ursächlichen Abweichungen basiert auf der Bestimmung der Schnittpunkte  $S_1$  und  $S_2$  zwischen der Verlustfunktion  $L(SM)$  und der Funktion  $f(SM)$ , welche die Häufigkeitsverteilung des Schließmaßes beschreibt. Als Analyse Kriterien dienen im Folgenden der horizontale ( $\Delta SM$ ) und vertikale Abstand ( $\Delta L$ ) der beiden Schnittpunkte:

$$\Delta SM = SM(S_2) - SM(S_1) \tag{GI. 2}$$

$$\Delta L = L(S_1) - L(S_2)$$

Gl. 3

Der somit aufgespannte zweidimensionale Parameterraum kann nun zur Beurteilung der vorliegenden Schließmaßsituation herangezogen werden. Entsprechend der Denkweise nach Taguchi sind somit möglichst minimale Werte für  $\Delta L$  und  $\Delta SM$  anzustreben. Bild 3 zeigt den Parameterraum und kennzeichnet den Punkt P (0/0) der optimalen Schließmaßsituation.

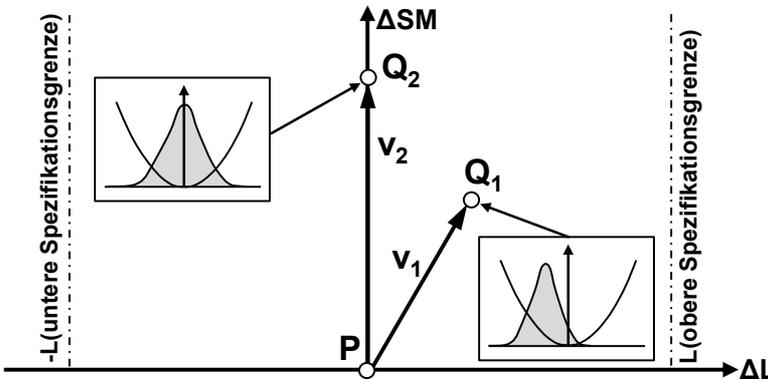


Bild 3: Parameterraum ( $\Delta SM$  über  $\Delta L$ ) zur Beurteilung der vorliegenden Schließmaßverteilung zu kritischen Zeitpunkten

## 4.2 Identifikation der Abweichungsarten

Die endliche Genauigkeit von Fertigungsprozessen verhindert die Erreichung des optimalen Punktes P. Jeder Schließmaßsituation kann jedoch ein Punkt Q im Parameterraum zugeordnet werden.

In der Regel ist eine Schließmaßverteilung zu erwarten, die sowohl aus fertigungs- als auch aus betriebsbedingten Abweichungen resultiert. Eine Gewichtung des Beitrags dieser Abweichungen zur Abweichung des Schließmaßes vom Sollwert ist somit für die gezielte Ergreifung von Handlungsempfehlungen zwingend von Nöten. Hierzu wird zwischen den Punkten P und Q des Parameterraumes ein Vektor  $v$  definiert. Der Quotient  $V$  (Gl. 4) aus der vertikalen ( $\Delta SM$ ) und horizontalen Komponente ( $\Delta L$ ) des Vektors setzt somit die fertigungs- und die betriebsbedingten Abweichungen ins Verhältnis.

$$V = \Delta SM / \Delta L$$

Gl. 4

---

### 4.3 Ableiten geeigneter Handlungsempfehlungen

Die fertigungsbedingten und betriebsbedingten Abweichungen können anhand der statistischen Beitragsleister und der Beitragsleister zur Mittelwertverschiebung auf die einzelnen Beiträge aller auftretenden Einzelabweichungen heruntergebrochen werden. Somit ist fortan die eindeutige Beurteilung des quantitativen Beitrags jeder einzelnen fertigungs- und betriebsbedingten Abweichung zur gegebenen Schließmaßverteilung möglich. Die Auswahl geeigneter Handlungsempfehlungen, mit dem Ziel der Systemoptimierung, kann somit sinnvoll erfolgen.

Mit zunehmendem Beitragsleister-Wert ist eine Reduzierung des Einflusses der jeweiligen Abweichung zielführend. Im Fall der fertigungsbedingten Abweichungen kann dies durch höhere Qualitätsanforderungen an die Fertigung realisiert werden. Hierbei sind u.a. die Einengung vergebener Toleranzen, die gezielte Änderung der auftretenden Häufigkeitsverteilungen als auch die Forderung nach niedrigeren Ausschussquoten im Rahmen der Einzelteilfertigung zu nennen. Hingegen bietet ein vergleichsweise geringer Beitragsleister-Wert Potentiale zur Kostenreduzierung sowie zur Vereinfachung von Fertigung und Montage durch geringere Qualitätsanforderungen wie beispielsweise anhand der Aufweitung bzw. der geringeren Limitierung auftretender Abweichungen.

Im Unterschied zu fertigungsbedingten Abweichungen resultieren betriebsbedingte Abweichungen aus dem Betriebsverhalten des Systems. Sie folgen somit deterministisch aus Merkmalen (wie Bauteilabmessungen) und Eigenschaften (z.B. Flächenträgheitsmoment) der Einzelbauteile sowie aus den vorherrschenden Betriebsrandbedingungen (Bsp: Temperatur, äußere Kräfte). Somit kann der Einfluss dieser betriebsbedingten Abweichungen vom Produktentwickler auf das Schließmaß nur indirekt über die Merkmale und die Betriebsrandbedingungen beeinflusst werden. Die Umsetzung einer Handlungsempfehlung erfordert somit die Kenntnis der Abhängigkeiten zwischen diesen und der jeweiligen betriebsbedingten Abweichung. Anschließend können geeignete Handlungsempfehlungen abgeleitet und umgesetzt werden. Mit zunehmendem Beitragsleister-Wert ist die Reduzierung sowohl der betriebsbedingten Abweichungen an sich, als auch ihres Einflusses auf das Schließmaß zu reduzieren. Dies kann z.B. durch die Modifikation der Betriebsrandbedingungen (Reduzierung der Abweichung) oder durch ihre Kompensation durch gezielte Änderung der Lage der Toleranzfelder der fertigungsbedingten Abweichungen (Reduzierung des Einflusses) erreicht werden. Tabelle 2 stellt ausgewählte Gesichtspunkte zusammen, die zur Ableitung von Handlungsempfehlungen herangezogen werden können.

Tabelle 2: Gesichtspunkte zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

<b>Art / Ursache der Abweichungen</b>	<b>Gesichtspunkte zur Ableitung von Handlungsempfehlungen (für eine Systemoptimierung)</b>
Fertigungsbedingte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toleranzbreiten ändern (Aufweiten/Einengen)</li> <li>• Häufigkeitsverteilungen (und somit die zugehörigen Standardabweichungen) ändern</li> <li>• Forderung höherer/niedrigerer Ausschussquoten</li> </ul>
Betriebsbedingte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lage der Toleranzfelder der fertigungsbedingten Abweichungen ändern (Asymmetrische Toleranzfelder)</li> <li>• Merkmale (und somit Eigenschaften) der Einzelbauteile des technischen Systems anpassen</li> <li>• Betriebsrandbedingungen des bewegten technischen Systems anpassen</li> <li>• Kontinuierlicher Ausgleich durch die gezielte Berücksichtigung von Werkzeugverschleiß [6]</li> </ul>

## 5 Anwendungsszenario: Kurbeltrieb

Die praktische Anwendung der gezeigten Vorgehensweise soll anhand von zwei Anwendungsszenarien am Beispiel des Kurbeltriebs eines 4-Takt-Verbrennungsmotors gezeigt werden.

Im Folgenden kann bereits auf die Ergebnisse einer statistischen Toleranzanalyse des Kurbeltriebs aus [2] zurückgegriffen werden. Als funktionsrelevantes Maß ist hierbei die aktuelle Position des Kolbens in Richtung der X-Achse definiert (Bild 4, links). Aufgrund von Fertigungsabweichungen des Kurbelradius  $r$  ( $45 \pm 0,02$  mm) und der Pleuellänge  $L$  ( $138 \pm 0,05$  mm) sowie der elastischen Verformung der Kurbelwelle (betriebsbedingte Abweichung) wird der Kolben während des Betriebs von seiner Soll-Position abweichen. Um die Funktion des Kurbeltriebs während des Betriebs sicherzustellen, ist eine maximale Abweichung der Ist-Position des Kolbens von dessen Soll-Position einzuhalten. Die definierten oberen und unteren Spezifikationsgrenzen liegen bei  $\pm 0,2$  mm (Szenario 1) bzw. bei  $+0,07$  mm und  $-0,33$  mm (Szenario 2).

Die Fertigungsabweichungen sind nach Tabelle 1 statische, also zeitunabhängige Größen. Hingegen unterliegt die betriebsbedingte elastische Verformung der Kurbelwelle einer zeitlichen Abhängigkeit vom Betriebszustand. Bild 4 (rechts) zeigt den ermittelten zeitlichen Verlauf der Abweichung des Kol-

bens aus dessen Soll-Position sowie die Spezifikationsgrenzen beider Szenarien. Während die streuenden Fertigungsabweichungen zu einer Streuung der Kolbenposition (charakterisiert durch die unteren und oberen Quantile bei  $\pm 3\sigma$ ) führen, resultiert aus der deterministischen betriebsbedingten Abweichung die Verschiebung der Schließmaßverteilung aus deren Nominallage.

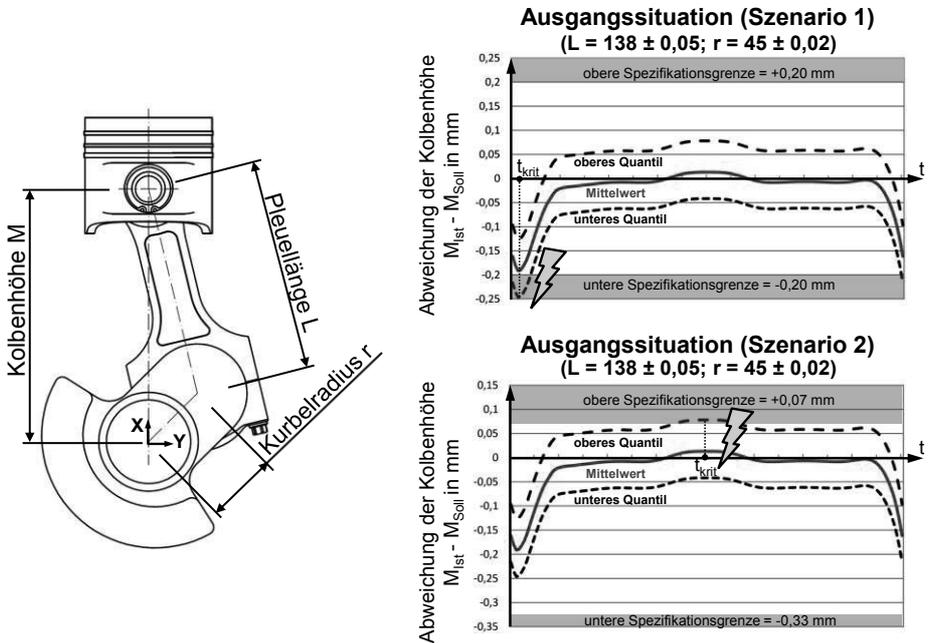


Bild 4: Kurbeltrieb (links) sowie zeitlicher Verlauf der Abweichung der Kolbenhöhe (Häufigkeitsverteilung) beider Szenarien vor der Optimierung

## 5.1 Systemoptimierung der Anwendungsszenarios

Die Funktionsfähigkeit des Kurbeltriebs ist, wie in Bild 4 zu erkennen, bei beiden Szenarien nicht sichergestellt, da die zulässigen Abweichungen des Kolbens gegenüber seiner Soll-Position überschritten werden. Somit ist zunächst, entsprechend der vorgestellten Vorgehensweise zur Systemoptimierung, für jedes Szenario die Analyse der vorliegenden Schließmaßverteilung an den jeweiligen kritischen Zeitpunkten notwendig. Die kritischen Zeitpunkte beider Szenarien ( $t_{krit}$ ) sind in Bild 4 gekennzeichnet.

Die Analyse erfordert zunächst die Definition relevanter Kennwerte. Im Folgenden wird der Verlustkoeffizient  $z$  als der Kehrwert des halben Abstan-

des der Spezifikationsgrenzen definiert. Die Skalierung der relativen Häufigkeit der Schließmaßklassen ist so gewählt, dass die relative Häufigkeit an den Wendepunkten (Standardabweichung bei  $\pm 1\sigma$ ) einer  $6\sigma$ -Normalverteilung (innerhalb der Spezifikationsgrenzen) mit dem Wert der Verlustfunktion an den Spezifikationsgrenzen L (untere/obere Spezifikationsgrenze) des Szenarios 1 übereinstimmt. Die jeweiligen Schnittpunkte  $S_1$  und  $S_2$  beider Szenarien können bestimmt und deren horizontale und vertikale Abstände ins Verhältnis gesetzt werden. Tabelle 3 stellt die gewonnenen Ergebnisse zusammen. Bild 5 (links) zeigt die Schließmaßsituationen zu den kritischen Zeitpunkten.

Tabelle 3: Identifikation der Abweichungsarten der Szenarios

Szenario	$\Delta SM$	$\Delta L$	Verhältnis V
#1	40	72	40 : 72 (bzw. 35,7% zu 64,3%)
#2	92	10	92 : 10 (bzw. 9,8% zu 90,2%)

Somit können für beide Szenarios geeignete Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die kritische Schließmaßverteilung bei Szenario 1 folgt vor allem aus der betriebsbedingten Abweichung (zu 64,3%), wobei die fertigungsbedingten Abweichungen mit 35,7% weder einen vernachlässigbaren noch einen dominanten Einfluss haben. Deshalb ist zur Optimierung des Systems die Reduzierung des Einflusses der betriebsbedingten Abweichung (el. Verformung der Kurbelwelle) zu empfehlen. Hierfür soll die Handlungsempfehlung „Lage der Toleranzfelder der Fertigungsabweichungen ändern“ angewendet werden. Auf eine Änderung der Toleranzbreiten der fertigungsbedingten Abweichungen soll vorerst verzichtet werden.

Im Fall des Szenarios 2 dominiert der Einfluss der fertigungsbedingten Abweichungen die resultierende Schließmaßverteilung zum kritischen Zeitpunkt. Eine Reduzierung des Einflusses ist somit empfehlenswert. Die Ergebnisse einer statistischen Beitragsleistanalyse erlauben eine weitere Differenzierung der einzelnen Fertigungsabweichungen. Hier zeigt sich, dass an die Tolerierung der Pleuellänge L mit einem statistischen Beitragsleister-Wert von ca. 87% höhere Anforderungen (Toleranz einengen) zu stellen sind. In einem weiteren Schritt kann, aufgrund des geringen Beitragsleister-Wertes von 13%, die Toleranzaufweitung des Kurbelradius r in Betracht gezogen werden. Trotz des geringen Einflusses der betriebsbedingten Abweichung von 9,8%, wäre die Handlungsempfehlung „Lage der Toleranzfelder der Fertigungsabweichungen ändern“ geeignet, da diese keine erhöhten Anforderungen an die Fertigung stellt und somit auch bei geringem Einfluss der jeweiligen Abwei-

chung angewendet werden kann. Bild 5 (rechts) nennt die ergriffenen Maßnahmen und zeigt die optimierten Schließmaßverteilungen der Szenarien.

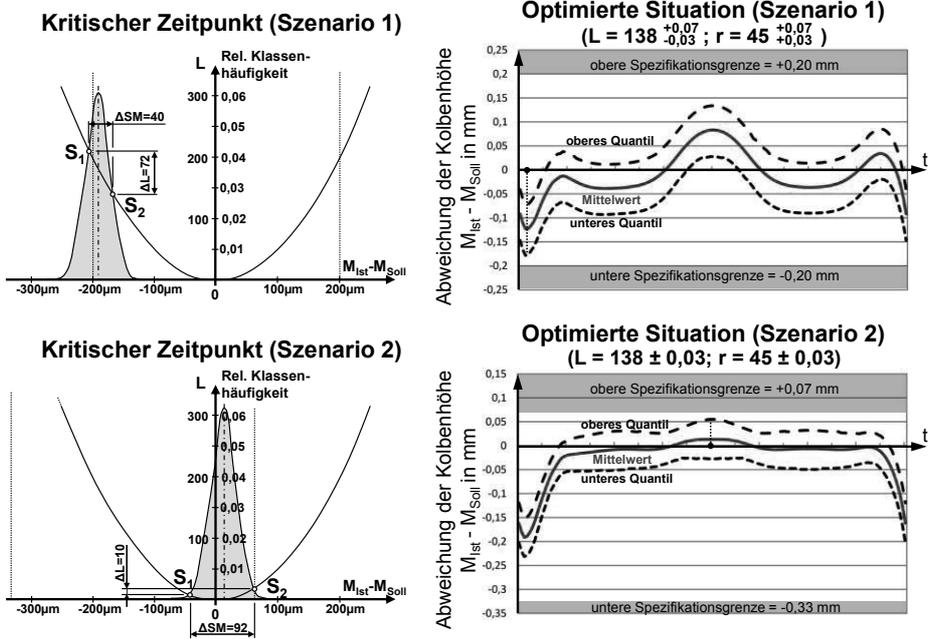


Bild 1: Szenarien 1 und 2: Schließmaßverteilungen (vorher) zu den kritischen Zeitpunkten (links) sowie optimierte zeitliche Schließmaßverläufe (rechts)

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz vorgestellt, der die Optimierung eines abweichungsbehafteten bewegten technischen Systems hinsichtlich der Funktionserfüllung ermöglicht. Auf Basis der Ergebnisse einer vorhergehenden Toleranzanalyse des bewegten Systems können die, in ihren Auswirkungen auf ein funktionsrelevantes Maß unterschiedlichen, fertigungs- und betriebsbedingten Abweichungen in Relation zueinander gesetzt werden. Der Produktentwickler ist somit in der Lage, den genauen Beitrag jeder auftretenden Abweichung zu ermitteln und geeignete Handlungsmaßnahmen abzuleiten und zu ergreifen. Anhand von zwei Beispielszenarien eines Demonstrators (Kurbeltrieb) wurde die Vorgehensweise verdeutlicht.

Die Optimierung wird lediglich auf Basis der Analyse eines kritischen Zeitpunktes des bewegten Systems getroffen. Weißt ein Schließmaßverlauf je-

---

doch mehrere kritische Zeitpunkte während seines Betriebs auf, so folgen daraus unter Umständen unterschiedliche oder sogar konkurrierende Handlungsempfehlungen für das System. Somit ist die Optimierung des bewegten Systems über die gesamte Betriebszeit erforderlich, was auf Grund der damit verbundenen hohen Komplexität nur mit Hilfe rechnerunterstützter Optimierungsansätze sinnvoll erreicht werden kann. Weiterhin resultieren aus dem Bewegungsverhalten Wechselwirkungen zwischen den fertigungs- und den betriebsbedingten Abweichungen. So führen betriebsbedingte Abweichungen zu einer Änderung der Systemstellung und somit zu variierenden statistischen Beitragsleister-Werten der fertigungsbedingten Abweichungen. Zudem führen die Streuungen der fertigungsbedingten Abweichungen ebenfalls zu streuenden betriebsbedingten Abweichungen. Die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen, sowohl im Rahmen der Toleranzanalyse als auch bei der anschließenden rechnerunterstützten Optimierung, ist somit notwendig.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung im Rahmen des Forschungsvorhabens ME1029/16-1 "Funktionale Produktabsicherung und -optimierung von bewegten technischen Systemen im produktlebenszyklusübergreifenden Toleranzmanagement".

## Literatur

- [1] Musa, R.: "Simulation-Based Tolerance Stackup Analysis in Machining", University of Cincinnati, Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering, Dissertation, 2003.
- [2] Stuppy, J.: "Methodische und rechnerunterstützte Toleranzanalyse für bewegte technische Systeme", Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2011.
- [3] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: "Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE)", Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- [4] Chase, K.W.; Greenwood, W.H.: "Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis". In ADCATS Report No. 87-5, Reprinted from Manufacturing Review, ASME, 1988, 1(1), S. 50/59.
- [5] Taguchi, G.; Chowdhury, S.; Wu, Y.: "Taguchi's Quality Engineering Handbook", John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [6] Klein, B.: "Montagesimulation in der virtuellen Produktentwicklung". In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 101 (1999), S. 492/499.

## **Modellierung und Prognose von Entwicklungs- und Recyclingkosten in frühen Entwicklungsphasen**

David Hellenbrand, Maximilian Kissel, Jonathan Rohloff und  
Udo Lindemann

*Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München*

Due to a rising number of variants and a decreasing number of sold items per unit indirect costs like development or recycling costs gain more importance. Existing cost estimation approaches do not deal with the challenges of high uncertainty in early phases of PD in an appropriate way. Therefore, a method to model, estimate and analyse different kinds of costs is presented. This method is based on existing process costing approaches and combines them with a statistical simulation to deal with uncertainties and the high level of complexity. The method can be used within target costing to define cost goals, continuous cost calculation during the process as well as documentation and controlling of estimated and actual costs.

### **1 Einleitung und Motivation**

Vor dem Hintergrund eines dynamischen Wettbewerbs und sowie einem Trend zu individuellen Produkten, sehen sich Unternehmen vor der Herausforderung eine erhöhte Anzahl von Varianten ihrer Produkte anzubieten. Durch den Anstieg der Varianten und gleichzeitig sinkende Stückzahlen pro Variante gewinnen die „indirekten“ Kosten, wie Entwicklungs- oder Vertriebskosten, zunehmend an Bedeutung. Der Anteil dieser Kosten an den einzelnen Produk-

---

ten steigt bei sinkender Stückzahl, so dass sie zukünftig detailliert betrachtet werden müssen (vgl. [1]).

Aus Kostensicht des Produkerstellers stehen über dem Produktlebenszyklus primär die Phasen Planung, Entwicklung, Herstellung sowie das Ende des Produktlebenszyklus im Mittelpunkt der Betrachtungen, da in diesen Kosten entstehen bzw. anfallen können. Auf die Herstellkosten wird in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen, da in diesem Bereich bereits eine Vielzahl von Methoden und Ansätzen existiert und da der Fokus hier auf der Modellierung und Prognose indirekter Kosten liegt. Die Betrachtung des Endes des Produktlebenszyklus gewinnt hingegen zunehmend an Bedeutung, da diverse Vorschriften und Gesetze existieren, welche die Hersteller zur Rücknahme und Entsorgung ihrer Produkte verpflichtet [vgl. VDI4413]. Die damit verbundenen Aktivitäten verursachen somit Kosten und müssen Verkaufspreis berücksichtigt werden. Aufgrund dieses direkten Bezugs zu den Selbstkosten des Unternehmens wurde die Lebenszyklusendphase mit in die Betrachtungen aufgenommen. Unter Lebenszyklusendphase werden in diesem Rahmen sämtliche Aktivitäten und Prozesse verstanden, die nach der eigentlichen Nutzungsphase für Recycling und/oder Entsorgung Produktes anfallen. Da hierbei unterschiedlich Handlungsoptionen zur Verfügung stehen, wird auch allgemeiner der Begriff End-of-Life (EOL) Strategien verwendet. Aufgrund der einfacheren Verwendbarkeit sowie der Einprägsamkeit werden die Lebenszyklusendkosten hier vereinfachend auch als Recyclingkosten bezeichnet, obwohl dies nur eine Teilmenge der möglichen Handlungsoptionen abbildet.

## 2 Bestehende Ansätze zur Berücksichtigung indirekter Kosten

Eine verbreitete Methode zur Berücksichtigung von Kosten die einem Produkt nicht direkt zugeordnet werden können, ist die Zuschlagskalkulation mit Gemeinkostensätzen. In diesem Ansatz werden die „indirekten“ Kosten wie Entwicklungs-, Verwaltungs- und Vertriebskosten über definierte Gemeinkostenzuschlagssätze aus den Herstellkosten abgeschätzt und anschließend die Selbstkosten des Unternehmens ermittelt [2]. Der Vorteil dieses Kalkulationsverfahrens liegt darin, dass es eine einfache und schnelle Berechnung der Selbstkosten über definierte unternehmensspezifische Zuschlagssätze erlaubt. Eine genauere Betrachtung dieses Vorgehens zur Berücksichtigung von indirekten Kosten zeigt jedoch vor dem oben beschriebenen Hintergrund der steigenden Variantenzahl einige Probleme auf.

Die Entwicklungskosten sind zum Beispiel für ein bestimmtes Produkt als Fixkosten anzusehen und daher von der produzierten Stückzahl weitgehend unabhängig. Mit einer zunehmenden Produkt- und Variantenvielfalt (bei sin-

kenden Stückzahlen pro Variante) nimmt der Anteil der Entwicklungskosten an den Selbstkosten zu und müsste über stückzahlabhängige Zuschlagssätze berücksichtigt werden (vgl. Bild 1). Da dies normalerweise nicht der Fall ist, führt die Zuschlagskalkulation zu einer „Quersubvention“ der Varianten mit geringen Stückzahlen durch die Standardprodukte [2, 3]. Weitere verfälschende Einflüsse, welche zu Differenzen zwischen kalkulierten und wirklichen Kosten führen, sind neben der Stückzahl auch Neuheit, Komplexität und Baugröße des betrachteten Produktes [2].

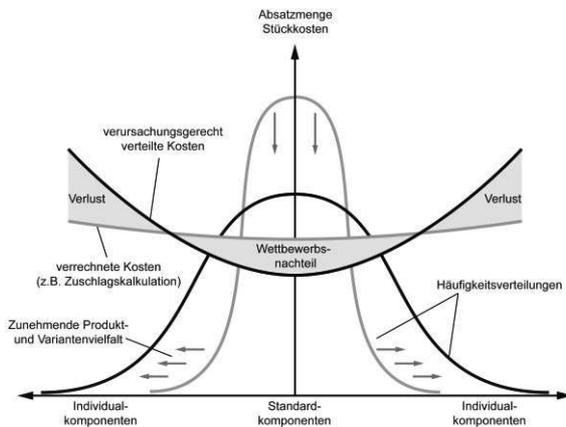


Bild 1: Problematik der Anwendung von Gemeinkostenrechnung nach [3, 4]

Zur Schaffung einer höheren Kostentransparenz in den indirekten Bereichen, welche bisher lediglich über die Gemeinkosten berücksichtigt wurden, existieren prozessorientierte Kalkulationsverfahren wie Prozesskostenrechnung [5] oder Activity Based Costing [6]. Die Grundidee dieser Ansätze besteht darin, die in diesen Bereichen (analog zur Produktion) ablaufenden Aktivitäten bzw. Prozessschritte zu erfassen und kostenmäßig zu bewerten. In der Prozesskostenrechnung können diese Kosten auf Grundlage von geeigneten Bezugsgrößen berechnet und verursachungsgerecht zugeordnet werden [2]. Ein Ansatz zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung in frühen Phasen von individualisierten Produkten mit geringen Stückzahlen ist die Pfadkostenrechnung [4]. Dieser Ansatz wurde für die hier dargestellte Methode aufgegriffen und entsprechend angepasst.

Die wesentliche Schwachstelle bei der Übertragung dieses Ansatzes der Pfadkostenrechnung auf die Prognose von Entwicklungskosten bildet die Ermittlung der Gesamtpfadkosten, da diese mit der gewählten Berechnungsmethode eine statistischen Unabhängigkeit der Prozessschritte erfordert [1]. In

---

Entwicklungsprozessen laufen jedoch eine Vielzahl von Iterationen und Prozessschritten sequentiell oder parallel ab und die Ergebnisse der verschiedenen Aktivitäten beeinflussen sich gegenseitig. Somit kann nicht von einer statistischen Unabhängigkeit der Prozessschritte ausgegangen werden [1].

Aus diesem Grund wurde der Ansatz der Pfadkostenrechnung um eine stochastische Simulation (Monte-Carlo-Simulation) erweitert. Diese eignet sich zur Modellierung komplexer Systeme, deren innerer Zusammenhang nicht bekannt oder nur sehr aufwändig beschrieben werden kann. Die Verwendung von Verteilungsfunktionen für den Ressourcenverzehr erlaubt zudem den Umgang mit Unsicherheiten und die Ermittlung einer Gesamtkostenverteilung. Einen ähnlichen Ansatz findet sich auch zur Kostenbewertung von Produktionsprozessen [7, 8].

### **3 Methode zur Modellierung und Prognose von Entwicklungs- und Recyclingkosten**

In folgenden wird der entwickelte Ansatz dargestellt. Zunächst wird das entwickelte Modell der modifizierten Pfadkostenrechnung eingegangen und anschließend das Vorgehensmodell zur Prozessmodellierung und Kostenprognose dargestellt. Die Methode wurde in einer weiterentwickelten Version der Tools CoCoS (Cost Consulting System, [4]) prototypisch implementiert.

#### **3.1 Grundlagen der modifizierten Pfadkostenrechnung**

Die Schätzung der Entwicklungs- und Recyclingkosten basiert auf dem Prinzip der Pfadkostenrechnung, bei der über den Ressourcenverzehr eines definierten Prozesspfades eine Prognose der Gesamtkosten erfolgt [4]. Analog zum Vorgehen der Pfadkostenrechnung wird zunächst der Prozess mit Hilfe von Prozessschritten bzw. Prozessbausteinen auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen beschrieben. Diesen Prozessschritten wird im weiteren Verlauf ein Ressourcenverzehr und somit ein Kostenwert zugeordnet. Die Angabe des Ressourcenverzehrs kann ebenfalls direkt als Kosten oder über Verbrauchswert und Kostensatz erfolgen. Über die Summe der einzelnen Kosten ergeben sich die Gesamtkosten des betrachteten Prozesses. Für den Fall, dass nur bestimmte Prozessteile oder alternative Pfade (bei oder-Verzweigungen) betrachtet werden sollen, ergibt sich die Möglichkeit zur Analyse unterschiedliche Varianten. Das Grundprinzip ist in Bild 2 dargestellt.

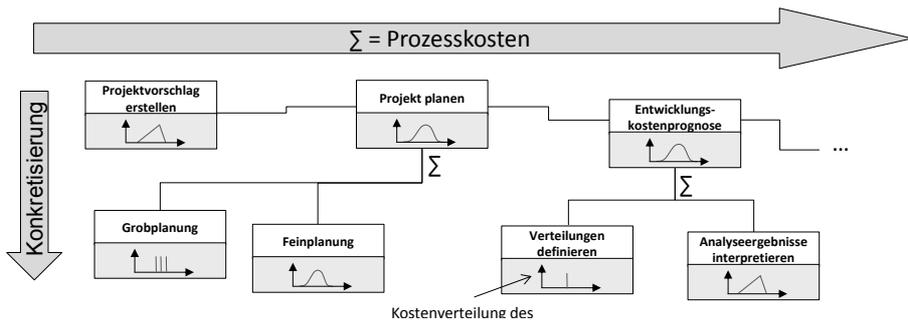


Bild 2: Modell der modifizierten Pfadkostenrechnung

Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bzw. zur fortwährenden Konkretisierung im weiteren Verlauf der Planung und Durchführung sind zwei grundsätzliche Ansätze vorgesehen. Zum einen besteht die Möglichkeit zur weiteren Konkretisierung und Detaillierung der ursprünglich definierten Prozessschritte. Diese können auf beliebig vielen weiteren Abstraktionsebenen detaillierter zerlegt und untergliedert werden (senkrechter Pfeil Bild 2). Dabei kann für jeden Prozessschritt individuell eine beliebige Anzahl Subprozesse und Konkretisierungsstufen definiert werden. In Bild 2 werden die Schritte „Projekt planen“ und „Entwicklungskostenprognose aufstellen“ in jeweils zwei Schritte mit höherem Detaillierungsgrad unterteilt. Auf diese Weise können (abstrakte) Schritte mit großem Kostenanteil detaillierter beschrieben werden um zu genaueren Ergebnissen zu gelangen. Bei der Berechnung der Kosten wird im Anschluss immer mit dem Ressourcenverzehr auf detailliertesten (unterster) Abstraktionsebene gerechnet. Die Kosten für die darüber abstrakteren Prozesse ergeben sich aus der Summe der Subprozesse, wobei evtl. früher definierte Werte auf den höheren Ebenen ignoriert werden. Somit dann der Detaillierungsgrad dem Kenntnisstand der Projektplanung angepasst werden. Die zweite Möglichkeit zur Berücksichtigung der Unsicherheit besteht in der Definition von Verteilungen für den Ressourcenverzehr. Es können somit nicht nur einzelne Werte definiert werden sondern ebenso unterschiedliche Verteilungsarten. Diese können für jeden Prozessschritt und auf jeder Konkretisierungsebene individuell festgelegt werden. Auch hier werden wieder nur die Eingaben auf der jeweils höchsten Detaillierungsebene für die Berechnung herangezogen.

Die Ermittlung der Kosten des Gesamtprozesses erfolgt anschließend mit Hilfe einer stochastischen Simulation (konkret: Monte-Carlo-Simulation) in der eine hohe Anzahl von separaten Simulationsläufen durchgeführt wird. Zu

Beginn eines Laufes wird jedem Prozessschritt ein den definierten Verteilungen gehorchender Wert zugeordnet. Diese Werte können anschließend zu den Prozesskosten aufsummiert werden (waagrechter Pfeil Bild 2). Durch die mehrfache Wiederholung ergibt sich eine Gesamtkostenverteilung für den Prozess. Da in diesem Fall pro Durchlauf nur einzelne Werte und keine Verteilungen aufaddiert werden, muss die statistische Unabhängigkeit der einzelnen Prozessschritte nicht gegeben sein. Die Abhängigkeiten sind vielmehr implizit in den definierten Einzelverteilungen enthalten. Die resultierende Gesamtkostenverteilung kann anschließend einer detaillierten statistischen Auswertung unterzogen werden um Wahrscheinlichkeitsaussagen über die erwarteten Kosten abzuleiten. Zur entwicklungsbegleitenden Kalkulation sowie zur Dokumentation ist es weiterhin möglich, den bereits abgearbeiteten Prozessschritten einen festen (bereits angefallenen) Ressourcenverzehr zuzuordnen. Dieser repräsentiert die angefallenen Ist-Kosten und wird für alle nachfolgenden Simulationsläufe als fix angenommen.

### 3.2 Vorgehensmodell zur Modellierung und Kostenprognose

Das grundsätzliche Vorgehen zur Schätzung von Entwicklungs- und Recyclingkosten ist identisch. In beiden Fällen werden die betrachteten Aktivitäten und Prozesse zunächst über Prozessschritte beschrieben. Im Fall der Entwicklungskostenschätzung handelt es sich dabei um Entwicklungstätigkeiten, im Fall des Recyclings um die durchzuführenden Tätigkeiten bzw. Verfahrensschritte (analog zur Produktion). Das Vorgehensmodell besteht aus vier Schritten (siehe Bild 3) und wird im Folgenden anhand der Entwicklungskostenprognose erläutert. Eine Übertragung auf die Betrachtung von alternativen EOL-Strategien erfolgt im Anschluss.

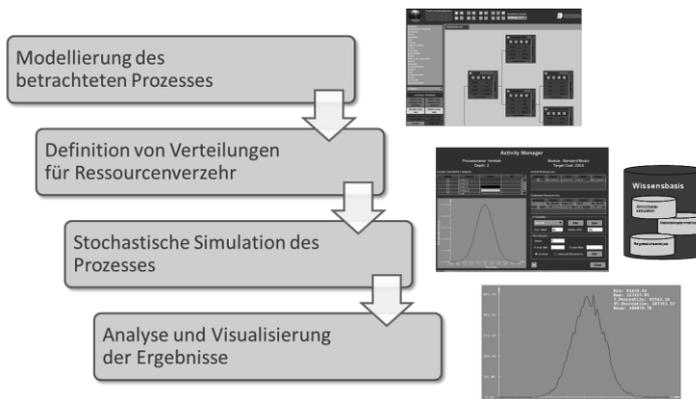


Bild 3: Vorgehensmodell zur Modellierung und Kostenprognose

Der erste Schritt „Modellierung des betrachteten Prozesses“ besteht aus der Definition des betrachteten Prozesses und der zugehörigen Prozessschritte. Diese können aus generischen Vorgehensmodellen wie VDI2221, VDI2206 oder aus einem firmenspezifischen Entwicklungsprozess abgeleitet werden. Der Konkretisierungsgrad ist abhängig vom jeweiligen Kenntnisstand zu wählen und folgt dem Grundprinzip „vom Abstrakten zum Konkreten“. Der Detaillierungsgrad kann jederzeit angepasst werden.

Im zweiten Schritt „Definition von Verteilungen für Ressourcenverzehr“ wird den Prozessschritten ein Ressourcenverzehr zugeordnet und die Kosten damit bewertbar gemacht. Dazu stehen in der implementierten Version des Tools CoCoS mit entsprechenden Funktionalitäten zur Verfügung (siehe Bild 4). Eine separate Beschreibung des Prozesses und seiner Verknüpfungen ist nicht erforderlich, den modellierten Prozessschritten können sofort die Ressourcenverbräuche zugeordnet werden. Zur Verbesserung der Ergebnisqualität kann auf eine Wissensbasis zugegriffen werden, in der Informationen über die Dauer bereits beendeter Projekte abgelegt werden können.

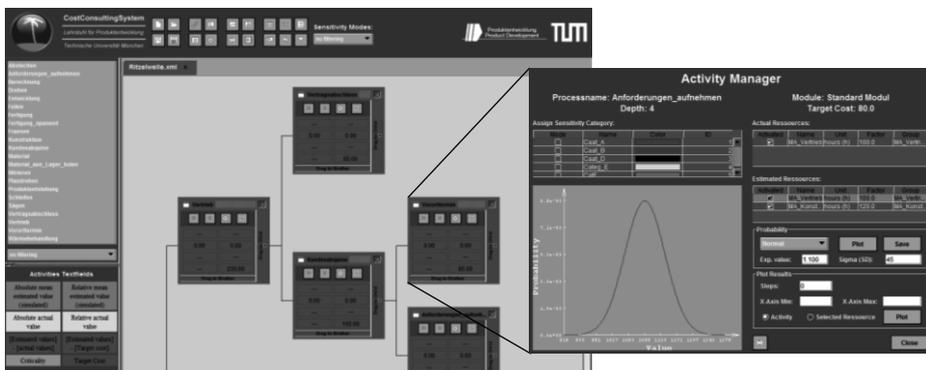


Bild 4: Definition von Prozessschritten und Ressourcenverzehr in CoCoS

Das Tool erlaubt die Definition von unterschiedlichen Verteilungsarten für den Ressourcenverzehr (Bild 4 rechts). Es stehen stetige Gleichverteilung, Dreiecksverteilung, Normalverteilung, Exponentialverteilung, Weibull-Verteilung sowie fixer Wert zur Verfügung. Für den praktischen Gebrauch haben sich die Verwendung von Gleichverteilung, Dreiecksverteilung und Normalverteilung als sehr einfach handhabbar erwiesen, da diese Verteilungen und die beschreibenden Parameter dem Entwickler vertraut sind. Die Bewertung des Ressourcenverzehrs kann entweder direkt monetär oder über eine bestimmende Größe (Zeit, Gewicht, etc.) erfolgen. Bei den Entwicklungs-

kosten kann so beispielsweise eine Zeitverteilung und ein Stundensatz (Kosten pro Stunde) angegeben werden. Es könne auch mehrere Ressourcen (Zeit, Material, Raummiete) einem Prozessschritt zugeordnet werden. Weiterhin bietet CoCoS die Möglichkeit zur Definition von Subprozessen zur weiteren Konkretisierung abstrakter Prozessschritte.

Im dritten Schritt „Stochastische Simulation des Prozesses“ werden die Prozesskosten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation prognostiziert. Das Ergebnis der Simulation ist ein Kostenwert für jeden Prozessschritt in jedem Durchlauf sowie ein Gesamtkostenwert für den Prozess. Die Genauigkeit der Simulation verbessert sich mit der Anzahl der Durchläufe, wobei gleichzeitig die erforderliche Rechenzeit steigt. Diese befindet sich je nach Anzahl der Prozessschritte im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten, so dass auf aktueller Standardhardware problemlos einige tausend Durchläufe berechnet werden können.

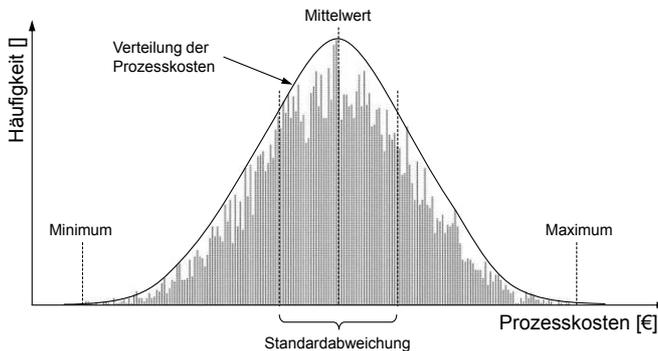


Bild 5: Ergebnis und Analyse der Kostensimulation

Die Gesamtprozesskosten können anschließend im letzten Schritt „Analyse und Visualisierung der Ergebnisse“ nach auftretender Häufigkeit sortiert, grafisch dargestellt und analysiert werden (siehe Bild 5). Mit einer hinreichend großen Anzahl an Simulationsläufen - aufgrund der damit zur Verfügung stehenden Datenbasis - besteht die Möglichkeit verschiedene statistische Auswertungen vorzunehmen. Es können somit Mittelwert, Maximum, Minimum und Varianz der prognostizierten Gesamtprozesskostenkosten berechnet werden. Dem Entwickler stehen somit Informationen über die zur erwarteten Prozesskosten, deren Bandbreite und Verteilung sowie ihre Auftretenswahrscheinlichkeit zur Verfügung. Diese Informationen können bei der Prozessplanung oder zur Erstellung von Angeboten herangezogen werden. Weiterhin sind durch den Export in externe Analysetools wie Excel oder Matlab auch

---

weitere individuelle Kennzahlen ermittelbar oder es kann die Verteilungsfunktion (Hüllkurve) der simulierten Kosten berechnet werden. Daraus können Aussagen wie „Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% sind die auftretenden Kosten geringer als X €“ getroffen werden.

Weiterhin wird die entwicklungsbegleitende Kalkulation und somit der Vergleich von Zielkosten (Target-Costs), prognostizierten und aufgetretenen Kosten unterstützt. Dazu können jedem Prozessschritt neben dem erwarteten Ressourcenverzehr weitere Kennwerte wie (Soll-)Zielkosten und tatsächlich aufgetretene Kosten zugeordnet werden. Diese ermöglichen einen frühzeitigen rollierenden Abgleich zwischen Soll- und Ist-Kosten sowie zwischen prognostizierten Kosten und Ist-Kosten im Kostenmanagementregelkreis. Weiterhin werden die Ergebnisse der Prognosen kontinuierlich über die Zeit verbessert, da die angefallenen und eingepflegten Ist-Kosten in den nachfolgenden Simulationen als konstante Werte berücksichtigt werden.

#### 4 Betrachtung von Recyclingkosten

Im Folgenden wird auf die Prognose von Recyclingkosten bzw. auf die Betrachtung von „Lebenszykluskosten“ (EOL, End-of-Life Costs) eingegangen. Das verwendete Modell sowie die Schritte des Vorgehens sind grundsätzlich analog zu den Entwicklungskosten. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass sich die Aufstellung der betrachteten Prozesse wesentlich komplexer gestaltet, da auf keine standardisierten oder vorhandenen Prozessmodelle zurückgegriffen werden kann. Außerdem ist die parallele Betrachtung und der Vergleich von Alternativen entscheidend um zu einer kostenoptimalen Lösung zu gelangen.

Im ersten Schritt zur Prognose und Analyse der Lebenszykluskosten werden zunächst alternative Strategien für das Ende des Lebenszyklus erstellt (Bild 6). Diese Strategien legen den grundsätzlichen Umgang mit einem Gesamtprodukt am Ende seines Lebenszyklus fest. Auf dieser Ebene wird beispielsweise entschieden, ob ein Produkt als Ganzes entsorgt oder ob es zerlegt und in Teilen aufbereitet oder weiterverwertet werden kann. Den einzelnen Strategien können anschließend untergeordneten Aktivitäten bzw. Prozessschritte wie Transport, Demontage, Zerlegen, Aufbereiten, Entsorgung usw. zugeordnet werden. Neben den notwendigen Prozessschritten werden auch die ggf. entstehenden (Teil-)Systeme aufgeführt und die nachfolgenden Prozessschritten diesen zugeordnet. Auf diese Weise entsteht eine übersichtliche hierarchische Struktur, in der sämtliche Prozesse sowie entstehende Zwischenprodukte enthalten sind. Zur Erstellung alternativer Szenarien des Lebenszyklusendes und möglicher Prozessschritte können unternehmensinterne

oder -externe (standardisierte) Quellen herangezogen werden. Beispielhaft seien an dieser Stelle VDI2243, VDI4413, VDI4431 sowie [9] und [10] genannt, die in diesem Rahmen detailliert analysiert wurden. Diese sowie alternative Quellen können jedoch nur als Grundlage bzw. zur Anregung von Ideen verwendet werden und müssen jeweils individuell auf das vorliegende Produkt und die Situation des Unternehmens angepasst werden.

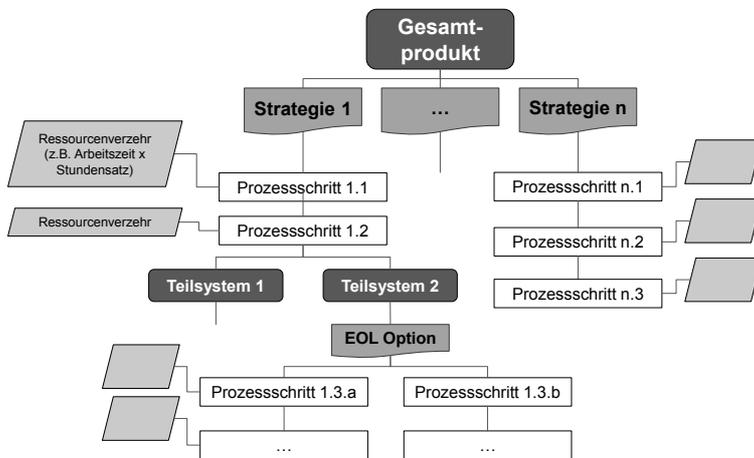


Bild 6: Modellierung und Analyse alternativer EOL-Strategien

Die festgelegten Strategien legen nur auf einer sehr abstrakten Ebene den Umgang mit dem betrachteten Produkt fest. Daher können auf der nächsten Konkretisierungsebene verschiedenen EOL-Optionen betrachtet werden (siehe Bild 6). Diese beziehen sich auf das Gesamtprodukt oder einzelne Teilsystem. In den EOL Optionen können Unterscheidungen vorgenommen werden, ob beispielsweise ein Teilsystem noch weiter zerlegt oder vollständig eingeschmolzen wird. Die verschiedenen Optionen folgen dabei stets der übergeordneten Strategie, ziehen jedoch unterschiedliche Prozessschritte und damit Kosten nach sich und werden demnach getrennt behandelt. Weiterhin ermöglichen sie einen Vergleich der alternativen Möglichkeiten und das Aufdecken von Optimierungspotenzialen auf einer detaillierteren Ebene innerhalb einer Strategie.

Den einzelnen Prozessschritten wird anschließend ein Ressourcenverzehr zugeordnet. Der Ressourcenverbrauch kann ebenfalls direkt monetär oder über eine bestimmende Größe (bspw. Stundensatz oder Gewicht) angegeben werden (Bild 6). Auch eine kontinuierliche Anpassung des detaillierungsgrades und der Anzahl der einzelnen Prozessschritte ist möglich, so dass zunächst

---

meine einer Grobplanung begonnen werden kann die im weiteren Verlauf zunehmen konkretisiert wird. Eine Besonderheit ist die Berücksichtigung von Einnahmen, die durch den Weiterverkauf oder die Weiterverwendung von Teilsystemen oder Materialien erzielt werden können. Diese können durch die Vergabe eines „negativen Ressourcenverzehr“ für die entsprechenden Prozessschritte integriert werden. Die eigentliche Prognose der erwarteten Lebenszykluskosten erfolgt im nächsten Schritt mit Hilfe der stochastischen Simulation. Als Ergebnis ergibt sich eine Gesamtkostenverteilung für das Ende des Lebenszyklus welche analysiert und bewertet werden kann. Hierbei muss jede Strategie und EOL-Option separat betrachtet und anschließend analysiert werden. Durch die Betrachtung alternativer Prozessketten kann eine kostenoptimale Lösung ausgewählt werden.

Die beschriebene und in Bild 6 gezeigte Darstellung von Strategien und Optionen für das Ende des Produktlebenszyklus stellt nur eine Möglichkeit zur Visualisierung und Analyse dar. Ebenso kann eine beliebige andere prozessorientierte Darstellung verwendet werden. Zentraler Punkt ist Auffassung des Lebenszyklusendes als eine Folge von Prozessschritten, denen ein Ressourcenverzehr zugeordnet werden kann.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Methode zur Modellierung und Prognose von indirekten Kosten, wie Entwicklungs- und Recyclingkosten, vorgestellt. Sie basiert auf dem Ansatz der Pfadkostenrechnung und erweitert diese um eine stochastische Simulation zur Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie dem hohen Komplexitätsgrad. Weiterhin wurde das zugehörige Vorgehensmodell sowie die prototypische Implementierung im Tool CoCoS vorgestellt. Die entwickelte Methode kann im Rahmen des Target Costing zur Zielfindung, zur entwicklungsbegleitenden Kalkulation sowie zur Dokumentation und Kontrolle der angefallenen Kosten eingesetzt werden.

Im weiteren Vorgehen ist die prospektive und projektbegleitende Anwendung der Methode in verschiedenen Forschungs- und Industrieprojekten zur Evaluierung und Weiterentwicklung geplant. In diesem Rahmen soll unter anderem untersucht werden, wie Entwickler bei der Auswahl und Definition der Ressourcenverteilungen und Verteilungsparameter effektiv unterstützt werden können. Ein weiterer Punkt ist die die Evaluierung und Weiterentwicklung des prototypisch implementierten Tools. Durch den projektbegleitenden Einsatz unter realitätsnahen Bedingungen können Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit untersucht sowie die vorgesehen Modellierungs- und Analysemöglichkeiten angepasst und erweitert werden.

---

## Literatur

- [1] Hellenbrand, D; Helten, K; Lindemann, U: „Approach for development cost estimation in early design phases“, Proceeding of the 11th International Design Conference DESIGN 2010, Dubrovnik - Croatia, 2010.
- [2] Ehrlenspiel, K; Kiewert, A; Lindemann, U: „Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung“, Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [3] Schuh, G; Schwenk, U: „Produktkomplexität managen“, Carl Hanser Verlag, München, 2001.
- [4] Gahr, A: „Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte“, Dr. Hut Verlag, München, 2006 (Produktentwicklung München, Band 67). Zugl. München: TU, Dissertation 2006.
- [5] Horváth, P; Mayer, R: „Prozeßkostenrechnung – Der neue Weg zu mehr Kostentransparenz und wirkungsvolleren Unternehmensstrategien“, Controlling 1 (1989) 4, S. 214-219, 1989.
- [6] Cooper, R; Kaplan, R S: „Measure costs right: Make the right decision“, Harvard Business Review 66 (Sep-Okt 1988), S. 96-10, 1988.
- [7] Rühl, J E: „Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung – Stochastische Simulation von Produktionssystemen während der Produktentwicklungsphase“, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation 2010.
- [8] Günther, T; Brandis, R; Nordsiek, D; Peters, S; Rühl, J: „Frühzeitige und qualifizierte Kostenprognose für Produktionssysteme – Praxisbeispiel anhand einer mechatronischen Baugruppe“, Tagungsband 10. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung 2010, 2010.
- [9] Bufardi; A; Gheorghe, R; Kiritsis, D; Xirouchakis, P: „Multicriteria decision-aid approach for product end-of-life alternative selection“, International journal of production research 42 (2004) 16, S. 3139-3157, 2004.
- [10] Rose, C M; Ishii, K; Stevels, A: „ELDA and EVCA: Tools for building product End-of-Life Strategy“, The Journal of Sustainable Product Design 1 (2001) 3, S. 181-195, 2001.

## Projektbegleitende Kalkulation komplexer Produkte der Auftragsfertigung

Michael Konarsky<sup>1,2</sup>, Erhard Leidich<sup>1</sup> und Uwe Götze<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik*

<sup>2</sup> *Professur Unternehmensrechnung und Controlling  
Technische Universität Chemnitz*

Within the context of increasing cost pressure in companies with highly complex products, cost information is needed in the early construction stages to offer market-driven and cost-covering products. The discrepancy between the information required and available is to be dissolved by a knowledge-based project-related calculation. With a calculation model developed for cost estimation of complex products, calculation-relevant information from parametrically-associative 3D models is linked to processing of production planning and operational data. In connection with cost objectives determined earlier, it is thus possible to economically assess 3D models in the CAD and design-changing measures in the sense of "Design to Cost".

### 1 Einleitung

Durch den zunehmenden Wettbewerb und den daraus resultierenden Kostendruck auf die Unternehmen der Auftragsfertigung entsteht die Notwendigkeit zur Einführung eines proaktiven Produktkostenmanagementsystems in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses [1][2]. Gerade im Entwicklungsprozess, in dem typischerweise etwa 90 Prozent der Lebenszykluskosten festgelegt werden [2][3], sind die Vorhersagefähigkeit der Produktkosten und die Einhaltung von Kostenzielen Schlüsselfaktoren für den Unternehmenserfolg [4]. Insbesondere bei hochkomplexen, kundenindividuellen und kapitalintensiven Produkten, wie z.B. im Werkzeug- und Formenbau als Ver-

---

treter der Auftragsfertigung, beeinträchtigt der Mangel an spezifischen Fertigungs- und Kosteninformationen in den frühen Phasen die Möglichkeiten der Steuerung von Material- und Fertigungskosten als wesentliche Bestandteile der Produktkosten [5]. Dies zeigt sich darin, dass Erfolgskontrollen meist erst retrograd durch Nachkalkulationen möglich sind, wodurch bei etwa jedem vierten Projekt eine Überschreitung des zulässigen Budgets zu verzeichnen ist [5]. Demzufolge werden geeignete Methoden und Informationssysteme zur Produktkostenprognose, -analyse und -steuerung für die Produktentwicklung in den Unternehmen der Auftragsfertigung benötigt [1][5].

Der vorliegende Beitrag stellt daher ein IT-gestütztes, datenbankbasiertes Kalkulationsmodell zur Projektbegleitenden Kalkulation vor, welches aus einer Kopplung von Methoden zur Verarbeitung technischer und betriebswirtschaftlicher Informationen sowie der Produktkostenkalkulation besteht. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt dabei auf einer frühzeitigen Analyse und Prognose der Material- und Fertigungskosten. Diese stellen die Grundlage für eine aktive Steuerung der Herstellkosten im Sinne des „Design to Cost“ dar.

## 2 Kalkulationsmodell

### 2.1 Modellbeschreibung

Die Projektbegleitende Kalkulation komplexer Produkte der Auftragsfertigung hat das Ziel, frühzeitig entsprechend des steigenden Konkretisierungsgrades der im Projektablauf entstehenden technischen und betriebswirtschaftlichen Informationen [6], verursachungsgerechte Kostenaussagen ressourcenschonend zu ermitteln. Dazu wird im Rahmen des Forschungsvorhabens „Produktkostenmanagement im Werkzeug- und Formenbau“ an der TU Chemnitz in Zusammenarbeit mit einem Kooperationspartner aus dem Werkzeug- und Formenbau ein Kalkulationsmodell zur Projektbegleitenden Kalkulation entwickelt, implementiert und validiert.

Das Kalkulationsmodell orientiert sich an den Rahmenbedingungen des Werkzeug- und Formenbaus, die durch eine hohe Komplexität und Individualität der Produkte sowie einen hohen Anteil an einmaligen Engineeringleistungen und unsicheren Kosteninformationen in heterogenen IT-Systemen gekennzeichnet ist. Um diesen Herausforderungen entgegen zu treten, sind Methoden zur Verarbeitung konstruktiver Parameter aus parametrisch-assoziativen CAD-Modellen (CAD-Datenverarbeitung) und betriebswirtschaftlicher Informationen aus der Arbeitsplanung (Fertigungsplanungsdatenverarbeitung) sowie der Auftragssteuerung (Betriebsdatenverarbeitung) implementiert (Bild 1). Sie werden entsprechend den vorliegenden Projektinformationen

(z.B. Planungsdaten, Geometrie der Entwurfskonstruktion, Stücklisten, Betriebsdatenerfassung [BDE], etc.) zum Teil überlappend eingesetzt und durch die Kopplung zusammengeführt.



Bild 1: Kalkulationsmodell zur projektbegleitenden Kalkulation

Die Auswahl der geeigneten Methoden zum jeweiligen Zeitpunkt in der Auftragsabwicklung orientiert sich an der erreichbaren Prognosegüte und der Verfügbarkeit der Daten. Das Ergebnis der Zusammenführung von technischen und betriebswirtschaftlichen Projektinformationen sind material- und fertigungskostenrelevante Informationen zu den Kalkulationsobjekten (Produkte des Werkzeug- und Formenbaus), die getrennt an die IT-Werkzeuge „Material- bzw. Fertigungsprozesskostenkalkulator“ übergeben werden. Diese führen unter Verwendung von strukturiertem Kostenwissen aus einer Kosten-datenbank und entsprechenden Kalkulationsverfahren zu Kostenanalyse- und Kostenprognoseergebnissen hinsichtlich der bereits verursachten (Istkosten) bzw. der voraussichtlichen (Plankosten) Material- und Fertigungskosten.

Im Materialkostenkalkulator werden auf Grundlage des werkzeugtypenabhängigen Grundaufbaus der Kalkulationsobjekte die Materialkosten berechnet.

---

Der Grundaufbau wird durch die kostenrelevanten Fertigungs- und Zukaufteile gebildet; er ist sowohl als visuelles Werkzeugmodell für die Angebotskalkulation und Kostenanalyse der Werkzeugentwürfe als auch in tabellarischer Form für die Analyse von Stücklisteninformationen hinterlegt. Für die Kalkulation der Materialkosten (im Werkzeug- und Formenbau ca. 40% der Gesamtkosten [1]) sind Kostennäherungsverfahren zur analytischen und vergleichenden Kalkulation integriert, die in Abhängigkeit vom Informationsangebot nutzbar sind. Diese greifen auf kostenbezogenes Experten- bzw. Faktenwissen, wie z.B. über Werkstoffpreise, Kauf- bzw. Normteilpreise und Kostenfunktionen für Rohteile, aus einer zentralen Kostendatenbank zurück. Somit können beispielsweise Stücklisten- oder Geometrieinformationen direkt mittels Kostenfunktionen oder indirekt über das „fallbasierte Schließen“ zu Materialkosten verarbeitet werden. Mit der Methode des „fallbasierten Schließen“ werden Kosteninformationen aus abgeschlossenen und merkmalsindexierten (klassifizierten) Referenzprojekten, die als kostenbezogenes Expertenwissen (Fallbasis) in der Kostendatenbank abgelegt sind, genutzt [1].

Die Kalkulation der Fertigungskosten erfolgt im Fertigungsprozesskostenkalkulator auf Basis von Planzeiten aus der Arbeitsplanung (Fertigungsplanungsdatenverarbeitung), generierten Arbeitsplänen sowie Referenzzeiten zu standardisierten Arbeitsfolgen (Standardarbeitspläne) [1]. Die Referenzzeiten sind statistisch ermittelte Prozesszeiten, die über das fallbasierte Schließen für die Kalkulation der Fertigungskosten verwendet werden können.

In der Produkt- bzw. Projektkalkulation fließen die generierten Kosteninformationen zuzüglich der Gemeinkosten eines Kundenprojekts zusammen und werden vom Projektcontrolling abschließend bearbeitet. Als Ergebnis stehen Herstell- und Selbstkosten für die Kalkulationsobjekte in Abhängigkeit der aktuell verfügbaren Projektinformationen. Für eine verursachungsgerechte Gemeinkostenverrechnung in den indirekten Leistungsbereichen (Verwaltung und Vertrieb) werden Prozesskostensätze und Prozessmengen mittels der dazu geeigneten Prozesskostenrechnung verwendet [7].

## 2.2 Kopplung technischer und betriebswirtschaftlicher Informationen in der Auftragsabwicklung

Die Kopplung technischer und betriebswirtschaftlicher Informationen in der Auftragsabwicklung von Auftragsfertigern stellt innerhalb des erläuterten Kalkulationsmodells (Bild 1) die Verbindung der Methoden zur Datenverarbeitung untereinander und mit den IT-Werkzeugen in der Produktkostenkalkulation her. Damit werden die während der Auftragsabwicklung eines Kundenprojektes in den beteiligten Abteilungen und Teilsystemen (wie PDM-, ERP-

---

bzw. PPS- und CAE-Systemen) entstehenden Projektinformationen für eine frühzeitige Produktkostenprognose verwendet. Dazu sind technische Daten aus einem CAD- bzw. PDM-System und betriebswirtschaftliche Daten aus einem PPS- bzw. ERP-System zu verarbeiten und über die IT-Werkzeuge Material- und Fertigungskostenkalkulator zu einer Projektkalkulation zusammenzuführen. Somit werden die parametrisch-assoziativen Möglichkeiten moderner CAD-Systeme (Template-Technologie) in der Konstruktion mit Planungsdaten aus der Arbeitsplanung und gesicherten Informationen aus der Betriebsdatenerfassung (Bild 2) verknüpft. Zusätzlich kommt es zum Ausgleich der Informationsdefizite durch den Rückgriff auf kostenbezogenes Expertenwissen aus einer Kostendatenbank.

Die Grundlage für die Kopplung der technischen und betriebswirtschaftlichen Informationen (Bild 2) ist ein durchgängiger Informationsfluss zwischen den Abteilungen der Produktentwicklung und der Produktherstellung sowie den beteiligten IT-Systemen. Dies wird durch das Verwenden eines einheitlichen Produktmodells und einer zentralen Datenhaltung realisiert [8]. Im Werkzeug- und Formenbau wird das Produktmodell als sog. Werkzeugmodell abgebildet, welches in Abhängigkeit der Anforderungen der beteiligten Funktionsbereiche unterschiedliche Sichtweisen aufweist. Dazu wurden beim Kooperationspartner für jeden Werkzeugtyp (Spritzguss-, Druckguss-, etc.) parametrisch-assoziative Template-Modelle entwickelt. Die Ausgangsbasis für das Produktmodell stellt hierbei das Konstruktionstemplate dar, welches u.a. durch eine standardisierte Produktstruktur, ein einheitliches Terminologie- und Bauteilklassifizierungssystem, eine adaptergesteuerte Positionierung von Konstruktionselementen (Advanced Adapter Principle) sowie einen modularen Aufbau gekennzeichnet ist. Zudem wurde neben dem Konstruktionstemplate ein Planungstemplate für die Arbeitsplanung ausgearbeitet und in dem PDM-System implementiert. Daran anknüpfend wurden im Forschungsvorhaben Kalkulationstemplates für die Berechnung der Material- und Fertigungskosten aufgebaut, welche die Konstruktions- und Planungssicht auf das Werkzeugmodell widerspiegeln.

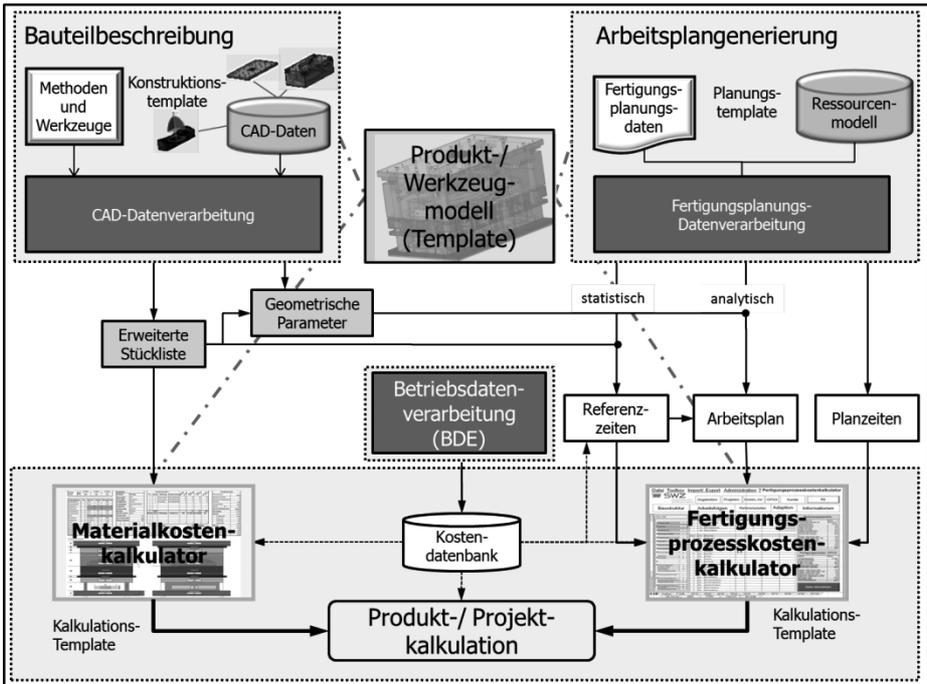


Bild 2: Kopplung technischer und betriebswirtschaftlicher Informationen

Zum Zwecke einer strukturierten Darstellung sind die verschiedenen Möglichkeiten der Kopplung in die drei Bereiche Bauteilbeschreibung, Arbeitsplangenerierung und Betriebsdatenverarbeitung gegliedert. Diese werden im Weiteren näher erläutert.

Im Bereich der Bauteilbeschreibung erfolgt eine Analyse und Verarbeitung der parametrisch-assoziativen CAD-Modelle (CAD-Datenverarbeitung) auf Basis des Konstruktionstemplates hinsichtlich der geometrischen, stofflichen und klassifizierenden Informationen seiner Bestandteile (Bauteile). Das Ergebnis enthält zum einen eine erweiterte Stückliste für die Materialkostenkalkulation und zum anderen die Beschreibung der Roh- und Fertigungsteile anhand ihrer fertigungsrelevanten geometrischen Parameter. Die Überführung der ermittelten geometrischen Parameter in Arbeitspläne erfolgt im Bereich der Arbeitsplangenerierung entweder statistisch durch Zuordnung von bauteilklassenspezifischen Referenzzeiten aus der Kostendatenbank zu den Stücklistenpositionen oder analytisch durch Generierung eines Arbeitsplans. Die Arbeitsplangenerierung greift dabei auf explizites Fertigungswissen zurück, welches in einem Ressourcenmodell abgebildet ist. Dieses enthält unterneh-

---

mens-, verfahrens- und produktspezifisches Wissen zu standardisierten Arbeitsfolgen, Betriebsmitteln und Fertigungstechnologien (Technologiedatenbank) sowie Werkzeugen und optimalen Bearbeitungsparametern (Werkzeugdatenbank). Der aus der Verbindung von klassifizierenden Informationen und geometrischen Parametern mit den hinterlegten Standardarbeitsplänen resultierende Arbeitsplan für ein Bauteil stellt den Ausgangspunkt für die Berechnung der Fertigungszeiten und somit der Fertigungskostenermittlung des gesamten Produktes im Fertigungsprozesskostenkalkulator dar. Darüber hinaus können Planzeiten aus der Arbeitsplanung berücksichtigt werden, was vor allem in der frühen Entwurfsphase geschieht, da hier noch keine Geometrieinformationen im CAD-Modell vorliegen. Ergänzt werden die CAD-Datenverarbeitung und die Fertigungsplanungsdatenverarbeitung durch die Betriebsdatenverarbeitung. Diese liefert einerseits Informationen über realisiert Größen, wie zurückgemeldete Zeiten und Materialbestellungen. Andererseits vergrößert sie die Datenbasis der Kostendatenbank mit Referenzzeiten oder statistisch ermittelten durchschnittlichen Stückkosten. In der nachgelagerten Projektkalkulation erfolgen die Ermittlung der Fertigungskosten im Fertigungsprozesskostenkalkulator durch die Bewertung der Fertigungszeiten mit Stundensätzen und die Berechnung der Materialkosten im Materialkostenkalkulator über die Stücklisteninformationen.

## 2.3 CAD-Datenverarbeitung

Um eine möglichst frühzeitige Prognose der Produktkosten auf Basis von technischen Informationen im Konstruktionsprozess zu realisieren, sind bereits Kosteninformationssysteme wie z.B. FEKIS, XKIS, KICK, PRO3KOS, etc. entwickelt worden. Im Gegensatz zu den dort bevorzugten Anwendungsfeldern sind die Methoden der CAD-Datenverarbeitung speziell auf komplexe Produkte mit einem hohen Anteil an Freiformgeometrien ausgerichtet. Als Methoden und Werkzeuge zur Bauteilbeschreibung sind hierbei ein Rohteilgenerator, ein erweiterter Stücklistenexport sowie die Featurebeschreibung von Regelgeometrien und die mathematische Beschreibung der Freiformgeometrien mittels NURBS (nicht-uniforme, rationale B-Splines) integriert (Bild 3).

Mit dem Werkzeug „Rohteilgenerator“ werden nach Maßgabe der unternehmens- bzw. handelsspezifischen Vorgaben aus den Fertigungsteilen Rohteile und deren Abmaße für den erweiterten Stücklistenexport abgeleitet. Gegenüber der klassischen Stückliste aus dem CAD-System enthält die erweiterte Stückliste alle für die Kostenprognose relevanten geometrischen, stofflichen und klassifizierenden Informationen, wie z.B. die Hauptabmessungen der Fertigungsteile, Identifikationsnummer der Kauf- und Normteile, Klassifikatoren, Verbauungsmengen und Werkstoffinformationen.

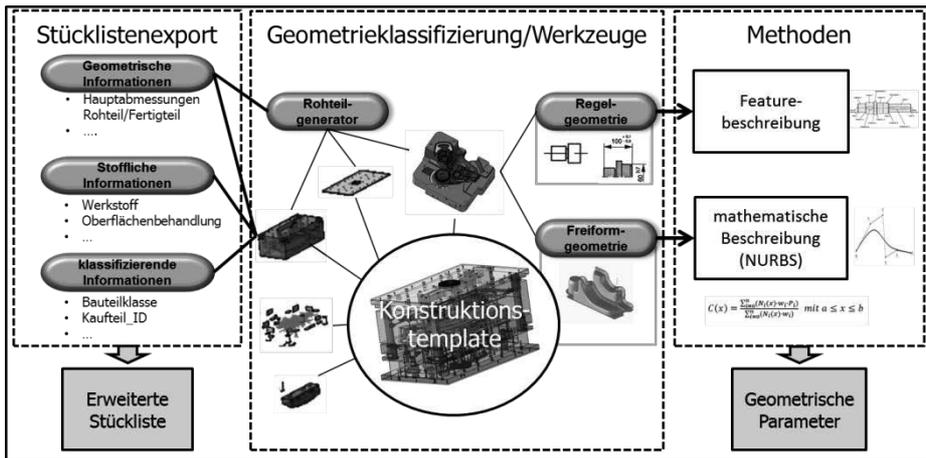


Bild 3: Methoden der CAD-Datenverarbeitung

Die Informationen aus der erweiterten Stückliste werden schließlich unter Einbeziehung von Kaufteil- und Werkstoffpreisinformationen aus der Kosten-datenbank zuzüglich statistisch ermittelter Zuschläge für Kleinteile und Wärmebehandlung im Materialkostenkalkulator zu Materialkosten verarbeitet. Die Zuordnung der Stücklistenpositionen zu den Kalkulationspositionen im Grund-aufbau erfolgt über die Merkmalsausprägungen der Bauteile.

Für die Ermittlung der fertigungsrelevanten geometrischen Parameter eines Bauteils aus einem CAD-Modell wurde ein Benchmark der Methoden Feature-Technologie, Slicing-Methode, Radien- und Krümmungsanalyse sowie mathematische Beschreibung von Konturenzügen durch B-/C-Splines, Bezier-Kurven, NURBS durchgeführt. Dazu wurden die Geometrielemente nach Regel- (Rückführung auf einfache geometrische Formelemente) und Frei-formgeometrie (parametrisch gesteuerte Flächen) klassifiziert. Der Benchmark zeigte, dass sich Regelgeometrien (z. B. Bohrungen, Taschen, etc.) optimal durch Fertigungsfeatures beschreiben lassen, da im Rahmen der Template-Konstruktion vorgefertigte Features verwendet werden. Dazu sind im Res-sourcenmodell technologische Angaben zur Fertigungsabfolge (Standardar-beitspläne), zu den Werkzeugen und zu Bearbeitungsparametern in sog. CNC-Schablonen abgelegt. Somit können die Fertigungszeiten der Regelgeometrie-elemente analytisch bestimmt werden. Für die konturbestimmenden Freiform-flächen wurden die NURBS als geeignetste Beschreibungssprache identifiziert, da sich eine allgemeingültige Beschreibung eines B-Splines mit Gewichtungsfaktoren den Konturenzügen am besten annähert [9] und NURBS bereits in CAD-Systemen standardmäßig integriert sind. Mit NURBS lassen sich somit

---

neben der Werkzeugbahnlänge Fertigungsverfahren, Werkzeuge und Bearbeitungsparameter anhand von Tangentenverläufen und der in dem Ressourcenmodell festgelegten Randbedingungen ableiten. Die Bearbeitungsumfänge vom Rohteil bis zu einem Aufmaß auf die Freiformgeometrie werden ebenfalls durch standardisierte Fertigungsstrategien analytisch bestimmt.

## 2.4 Fertigungsplanungsdatenverarbeitung

Die Fertigungsplanungsdatenverarbeitung gliedert sich in die Verwendung von Referenzzeiten oder Planzeiten sowie in die Generierung von Arbeitsplänen. Die Referenzzeiten aus der BDE werden jeweils den Arbeitsfolgen, dem Projekt und der belasteten Kostenstelle zugeordnet. Über die Beziehung der Arbeitsfolgen zu den Standardarbeitsplänen wird ein Bezug zwischen den Fertigungsteilen und den dafür hinterlegten Referenzzeiten hergestellt. Bei der Verwendung der Planzeiten sind in der Grob-, Mittel- und Feinplanung (siehe Bild 4) Sollzeiten in Abhängigkeit der Detaillierungstiefe des Konstruktionsmodells im Planungssystem abgelegt. Diese werden aus dem Planungssystem in den Fertigungsprozesskostenkalkulator übertragen. Während in der Grobplanung nur grobe Planzeiten auf Baugruppen- und Ressourcengruppen-ebene angegeben werden können, stehen nach der Entwurfsfreigabe Planzeiten auf Bauteil- und Arbeitsfolgeebene zur Verfügung. Somit kann der steigende Konkretisierungsgrad in der Arbeitsplanung für die projektbegleitende Kalkulation genutzt werden. Für die Generierung von Arbeitsplänen werden die geometrischen Parameter aus der CAD-DV mit den Informationen aus dem Ressourcenmodell kombiniert. Die Fertigungszeit ergibt sich schließlich als Produkt aus den berechneten Bearbeitungszeiten der kumulierten Bahnlängen und einem Korrekturfaktor, der aus der Regression von Referenzzeiten und den Konstruktionsparametern der Freiformgeometrien ermittelt wird.

## 2.5 Betriebsdatenverarbeitung

In der Betriebsdatenverarbeitung werden die Eigenleistungskosten über die bereits auf das Projekt gebuchten Zeiten und Fremdleistungskosten aus dem PPS- bzw. ERP-System extrahiert. Diese stehen dann als Istkosten zur Verfügung. Somit können die korrespondierenden Plankostenbestandteile durch Istkosten ersetzt werden, wodurch eine höhere Prognosegüte der Kostenschätzung erzielt wird. Der Ersatz erfolgt im Bereich der Eigenleistungskosten für alle bereits abgeschlossenen und zurückgemeldeten Arbeitsfolgen und im Bereich Fremdleistungskosten für alle bestellten Materialpositionen. Ferner werden die Auftragsdaten aus dem Angebot (Kundeninformationen, Werkzeugklasse, Angebotspositionen) für die Kalkulation und als Zielgrößen für die Produktkostensteuerung verwendet.

### 3 Produktkostensteuerung – „Design to Cost“

Für die Erreichung marktkonformer Produktkosten in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses sind zum einen Kostenziele und zum anderen eine effektive und effiziente Produktkostensteuerung, im Hinblick auf die Erreichung der Kostenziele, notwendig [2]. Zur Festlegung von Kostenzielen und zur Zielkostenerreichung eignet sich besonders das marktorientierte Kostenmanagementinstrument Target Costing, da hiermit eine vom Markt ausgehende, kostenorientierte und erfolgsorientierte Steuerung der produktbezogenen Unternehmensaktivitäten verfolgt wird [10].

Das Kernstück der Produktkostensteuerung auf Basis der projektbegleitenden Kalkulation bildet ein permanenter Soll-Ist-Vergleich der internen (Angebot, Budgetierung) bzw. externen (Markt) Kostenziele mit den durch die projektbegleitende Kalkulation prognostizierten Produktkosten (Bild 4). Dazu kommen in den einzelnen Projektphasen die beschriebenen Werkzeuge und Methoden zur Datenverarbeitung und Produktkostenkalkulation zum Einsatz.

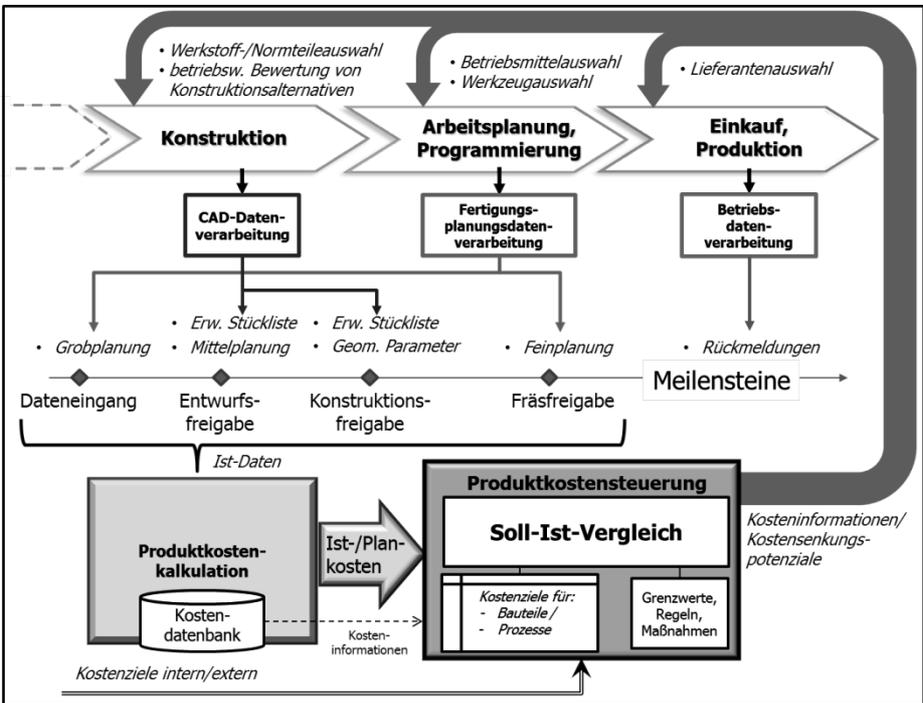


Bild 4: Produktkostensteuerung mit der projektbegleitenden Kalkulation

---

Bis zur Entwurfsfreigabe werden beispielweise die Fertigungskosten unter Verwendung der Planzeiten aus der Grobplanung und die Materialkosten ausgehend von der erweiterten Stückliste berechnet. Anschließend wird der gestiegene Konkretisierungsgrad durch die Verwendung der Planungsdaten aus der Mittelplanung und die analytische Generierung der Arbeitspläne berücksichtigt. Damit ist es möglich, schon in der Entwurfsphase die Kosten von Konstruktionsalternativen zu vergleichen, wodurch Transparenz über den verursachten Ressourcenverzehr geschaffen und Kostensenkungspotenziale aufgezeigt werden. Dies trägt dazu bei, die Konstrukteure für Kostenauswirkungen verschiedener Konstruktionsalternativen zu sensibilisieren. Darüber hinaus können für eine konkrete Entscheidungssituation, wie z.B. bei der Werkstoff-, Betriebsmittel- oder Werkzeugauswahl, dazugehörige Kosteninformationen aus der Kostendatenbank bereitgestellt werden. Hierbei sollte allerdings darauf geachtet werden, dass das Projektcontrolling die Informationen für den Empfänger verständlich, zuverlässig und entsprechend der Produktentwicklungsphase detailliert aufbereitet und bereitstellt [11].

## 4 Zusammenfassung

Mit dem IT-gestützten, datenbankbasierten Kalkulationsmodell zur Projektbegleitenden Kalkulation steht dem Projektcontrolling der Auftragsfertigung eine Methodik zur frühzeitigen Kostenanalyse und -prognose komplexer Produkte zur Verfügung. Hierbei werden technische und betriebswirtschaftliche Informationen gekoppelt und entsprechend der vorliegenden Projektinformationen mit Methoden zur CAD-, Fertigungsplanungs- und Betriebsdatenverarbeitung zur Generierung von Material- und Fertigungskostenaussagen verwendet. Damit sind schon zur Freigabe der Werkzeugentwürfe geometriebasierte Kostenprognosen möglich. Dies wird durch eine Kombination aus einem erweiterten Stücklistenexport, Nutzung der Grobplanungsinformationen und Rückgriff auf Expertenwissen aus einer Kostendatenbank mit dem fallbasierten Schließen (Referenzzeiten) realisiert. Darüber hinaus sind für die Generierung von Arbeitsplänen auf Basis parametrisch-assoziativer Templatemodelle die Methoden der Featurebeschreibung für Regelgeometrien und mathematischen Beschreibung mittels NURBS für die Freiformgeometrien implementiert. Mit Hilfe der in einem Ressourcenmodell abgelegten technologischen Daten werden die Arbeitsfolgen bestimmt, die Fertigungszeiten für die Fertigungsteile analytisch berechnet sowie die Montagezeiten fallbasiert ermittelt. Auftragsfertiger erhalten somit Methoden und nach Umsetzung in eine Softwarelösung ein IT-gestütztes Kosteninformationssystem zur Projektbegleitenden Kalkulation ihrer komplexen Produkte. Durch die Integration des Target Costing-Ansatzes ist mittels Zielkostenfestlegung und -erreichung ein aktives Produktkostenmanagement im Sinne des „Design to Cost“ möglich.

---

## Literatur

- [1] Leidich, E., Götze, U., Konarsky, M.: „Entwicklung und Umsetzung eines flexiblen, IT-gestützten und technologieübergreifenden Kalkulationsmodells für die Angebotskalkulation im Werkzeug- und Formenbau“ In: 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Magdeburg, 2010, S. 71-78
- [2] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: „Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Kostenmanagement in der integrierten Produktentwicklung“, 6. Aufl., Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- [3] Pahl, G., Beitz, W., et al.: „Engineering design, a systematic approach“, Springer Verlag, London, 2007
- [4] Cooper, R.: “The Rise of Activity Based Costing- Part one: What is an Activity Based Cost System“, in: Journal of Cost Management, Volume 2, 1988, S. 45-54
- [5] Schuh, G.; Boos, W.; Gaus, F.: „Marktspiegel – Software-Lösungen für die Werkzeugkalkulation“, 2. Aufl., Aachen, 2009
- [6] Fürst, A.: „Entwicklungsbegleitende Kalkulation in Maschinenbau“, Dissertation, Verlag der TU Graz, 2010
- [7] Eversheim, W., Kümper, R.: „Prozeß- und ressourcenorientierte Vorkalkulation in den Phasen der Produktentstehung“ in: Männel, W. (Hrsg.), „Frühzeitiges Kostenmanagement“, Kalkulationsmethoden und DV-Unterstützung“, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1997
- [8] Eigner, M., Stelzer, R.: Product Lifecycle Management: ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [9] Salomon, D.: „Curves and Surfaces for Computer Graphics“, Science+Business Media, Springer Verlag, New York, 2006
- [10] Götze, U.; „Leidich, E.: Kostenorientierte Produktentwicklung - Target Costing“, E-Learning CD, 1. Aufl., GUC Verlag, Chemnitz, 2010
- [11] Heine, A.: „Entwicklungsbegleitendes Produktkostenmanagement“, Wiesbaden, 1995

# Computergestützte Multiebenen-Simulationen zur optimierten Auslegung von CFK-Bauteilen

Jochen Zapf und Frank Rieg  
*Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD  
Universität Bayreuth*

Carbon fiber reinforced plastics are well suitable for lightweight constructions due to their mechanical properties (high Young's modulus and stiffness) and their low specific weight compared to classic design materials. Possible applications open up for use in e.g. aircraft, racing vehicles and supporting systems. With the help of modern computer-aided calculation methods (CAx-tools) potentials, and thus stability, durability and ultimately the cost can be positively affected. This contribution will explain a methodological multi-level approach on the efficient application and combination of Finite Element Methods used for carbon fiber reinforced structures.

## 1 Einleitung

Einen erheblichen Anteil bei Produktinnovationen bilden die Entwicklung und vor allem die Anwendung neuer Werkstoffe. Durch deren anwendungsgerechten Einsatz können bei Bauteilen zusätzliche Optimierungspotentiale genutzt werden.

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) beispielsweise eignen sich auf Grund ihrer mechanischen Eigenschaften (hoher E-Modul, hohe Steifigkeit) bei vergleichsweise geringer Dichte gut für Leichtbaukonstruktionen. Das Leichtbaupotential dieser Werkstoffklasse ist damit auch die Triebkraft für die

---

Verbreitung von CFK-Werkstoffen in vielen Industriezweigen, um mit leistungsfähigen Produkten Marktanteile zu erwirtschaften. Mögliche Anwendungen erschließen sich beim Einsatz in z.B. in Flugzeugen, Rennfahrzeugen und Tragsystemen.

Jedoch ist der Einsatz dieser Werkstoffe mit neuen Herausforderungen verknüpft, da deren komplexes Materialverhalten oft nur mit Hilfe moderner computergestützter Berechnungsmethoden vorhergesagt werden kann.

## 2 Problemstellung

Mit Hilfe geeigneter computergestützter Verfahren kann die Haltbarkeit mechanischer Bauteile abgesichert werden. Für die Stabilität kohlefaserverstärkter Bauteile ist in erster Linie der belastungsgerechte Lageraufbau der Gesamtstruktur [1] entscheidend. Um Optimierungspotentiale hinsichtlich Stabilität, Haltbarkeit und letztlich der Kosten aufzudecken und umzusetzen, wird hierfür die Finite-Elemente-Analyse (FEA) verwendet.

Jedoch sind derartige Simulationsmodelle oft sehr aufwendig bezüglich Modellaufbau und Berechnungszeit. Vielversprechende Varianten können oft nur nach längerer Lösungssuche ermittelt werden, wenn schon ein erheblicher Zeitaufwand (personell wie maschinell) in ein entsprechend genaues Simulationsmodell investiert wurde.

## 3 Multiebenen-Simulation

Um dieser Herausforderung zu begegnen, verfolgt der vorliegende Beitrag eine Absicherung des Produktes auf mehreren hierarchischen Ebenen. Eine Dekomposition des Gesamtsystems in seine Subsysteme bis hin zu einzelnen Funktionsträgern ermöglicht eine umfassendere Betrachtung und Simulation des Produktes. Die vorgestellte Methode fußt auf einem kombinierten Top-Down und Bottom-up Ansatz in Anlehnung an das V-Modell der Produktentwicklung bzw. das FORFLOW-Prozessmodell [2, 3, 4].

Ziel ist eine Reduktion des Berechnungsaufwandes durch Eingrenzung der möglichen Simulationsmodellvarianten. Hierzu werden Simulationen auf verschiedenen Abstraktions- und Detaillierungsebenen des Gesamtmodells durchgeführt. Hiermit wird die Absicht verfolgt, von einzelnen Funktionsmechanismen der FEA zu detaillierten Gesamtmodellen zu gelangen unter gleichzeitiger Reduktion von Iterationen. Dieses Vorgehen soll anhand eines CFK-Bauteiles erörtert werden. Es handelt sich dabei um einen Teleskopmast, welcher aus kohlefaserverstärkten Rohren mit Anbauteilen aus Stahl und

Aluminium aufgebaut ist. Dieser Mast wird beim Aus- und Einfahren mit Drehmoment sowie im Betrieb mit Gewicht- und Windlasten beaufschlagt.

### 3.1 Prozesskette

Zunächst ist eine adäquate Prozesskette in Abhängigkeit von Art und Umfang der Entwicklungsaufgabe zu erstellen. Hierbei können Wechselwirkungen der jeweiligen Programme untereinander Probleme bei der Durchführung der Simulationen verursachen. Um einen effizienten Einsatz computergestützter Werkzeuge zu gewährleisten, wird die ICROS-Methode (Intelligent CROSS-linked Simulations) eingesetzt, die den Entwickler bei seiner Arbeit unterstützen soll [5].

Mit dem ICROS-Prinzip werden die wechselseitigen Einflüsse von CAx-Anwendungen untereinander berücksichtigt und zu einzelnen Prozessschritten zugeordnet, welche anschließend zu Prozessketten verknüpft werden. Hierbei wird die Merkmals-Eigenschafts-Kopplung nach Weber/Werner zu Grunde gelegt [6] und durch Einbringen von gezielten Iterationen ergänzt. Auf diese Weise kann zu einem geeigneten Syntheseschritt zurückgesprungen werden, falls das System die geforderten Eigenschaften nicht erfüllt, ohne die gesamte Entwicklungskette erneut durchlaufen zu müssen. Das beschriebene Vorgehen kann in einer vereinfachten Design Structure Matrix abgebildet werden (Abbildung 1) [7]:

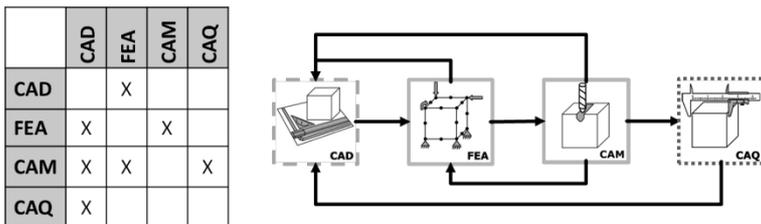


Abbildung 1: Vereinfachte CAx-Prozesskette

Den aufwendigsten Schritt der Produktverifizierung bilden hierbei die Finite Elemente Analysen, welche üblicherweise einen hohen Zeitaufwand nach sich ziehen. Im folgenden Abschnitt wird ein Mehrebenenansatz erläutert, mit dem dieser Zeitbedarf reduziert werden soll.

### 3.2 Einflussparameter

Je nach Anwendungsfall (Konstruktion, Belastungsarten, etc.) sind hierbei verschiedene Einzelaspekte zu berücksichtigen. Die jeweiligen Zuordnungen werden mit Hilfe von Domain Mapping Matrices dargestellt, welche parallel zur Design Structure Matrix für die jeweiligen Simulationstypen aufgestellt werden [7]: Die Zeilen repräsentieren hierbei den Einzelfall (Bauteil bzw. dessen Konstruktionsweise), die Spalten die benötigten Daten und Programmfunktionen (Abbildung 2).

Hauptfkt.- träger	Material						Belastung				...		
	isotrop		orthotrop		anisotrop		Zug / Druck	Biegung	Torsion	...	statisch	dynamisch	...
	Stahl	Aluminium	CFK	GFK	Faserverstärkung	Partikelermäßigung							
Teil 1			X				X		X				
Teil 2	X							X	X				
...													

Abbildung 2: Domain Mapping Matrix für die Hauptfunktionsträger eines Systems

Hierbei gilt es nach aufbau- und simulationsspezifischen Aspekten zu unterscheiden. Erstere umfassen im Wesentlichen die Größe des Gesamtsystems (Einzelteile), Zerlegbarkeit in Subsysteme sowie deren Einteilung in Haupt- und Nebenfunktionsträger. Unter die simulationsspezifischen Aspekte fallen Materialeigenschaften, Randbedingungen und Belastungsfälle. Auf Grund ihres quasi-generischen Charakters eignen sich hierfür die Mikroebenen am besten (Abbildung 3).

Für das beschriebene Beispielteil erfolgt zunächst eine virtuelle Zerlegung des Gesamtsystems in Subbaugruppen, in diesem Fall einzelne CFK-Rohre mit den metallischen Anbauteilen. Auf Grund des Modellaufbaus mit einem CFK-Teil als zentralem Bauteil sowie der Materialkombination (Stahl-CFK) ergeben sich folgende Abhängigkeiten: Da die mechanische Stabilität von CFK-Bauteilen in erster Linie vom Aufbau der einzelnen Lagen abhängt, ist es zunächst erforderlich diesen auf Mikroebene zu simulieren. Etwaige Anbauteile (Führungsschienen, Flansche, etc.) sowie deren Befestigung (Kleberverbindungen, Schrauben) können dann mit dem ermittelten, optimierten Lagenaufbau

in Mesomodellen berechnet werden, bevor deren Ergebnisse in das Makromodell einfließen.

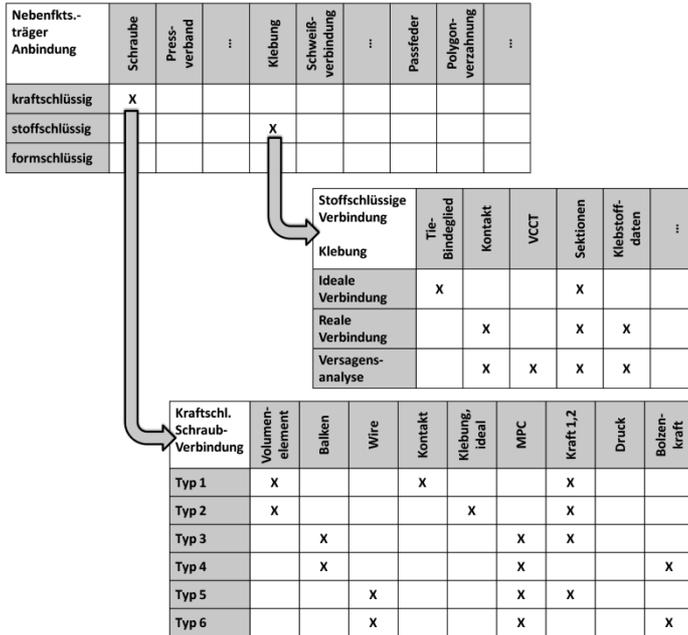


Abbildung 3: Simulationsspezifische Aspekte der Nebenfunktionsträger (exemplarischer Aufbau)

Die Ablage der Simulationen (hauptsächlich aus den Mikromodellen) in einer Datenbank, welche über die eben beschriebenen Parameter verknüpft ist, bietet die Möglichkeit, mit steigender Anzahl an Projekten ein umfangreiches Hilfsmodul zur Anwendung der CAx-Werkzeuge zu erstellen [9]. Maßnahmen zur Verbreitung und Akzeptanz im Benutzerkreis sollen im Zuge dieses Artikels jedoch nicht diskutiert werden.

### 3.3 Ebenendefinition

Auf Basis der ermittelten Einflussparameter ist nun eine Aussage über den erforderlichen Ebenenaufbau möglich [10]. Das Gesamtsystem wird bis auf einzelne funktionale Einheiten heruntergebrochen, so dass eine stufenweise Validierung der geforderten Eigenschaften erfolgen kann. Die Ebenenhierarchie gliedert sich dabei in Simulationen einzelner Bauteile auf Mikro- sowie auf Meso-Ebene, deren Ergebnisse in ein Makro-Modell einfließen [8]. Die

vierversprechensten Varianten können dann jeweils eine Ebene höher in rechenaufwendigeren Simulationsmodellen umgesetzt und bewertet werden. Erst auf der obersten Ebene wird ein genügend detailliertes Simulationsmodell des gesamten Prototypen erstellt und berechnet (Abbildung 4).

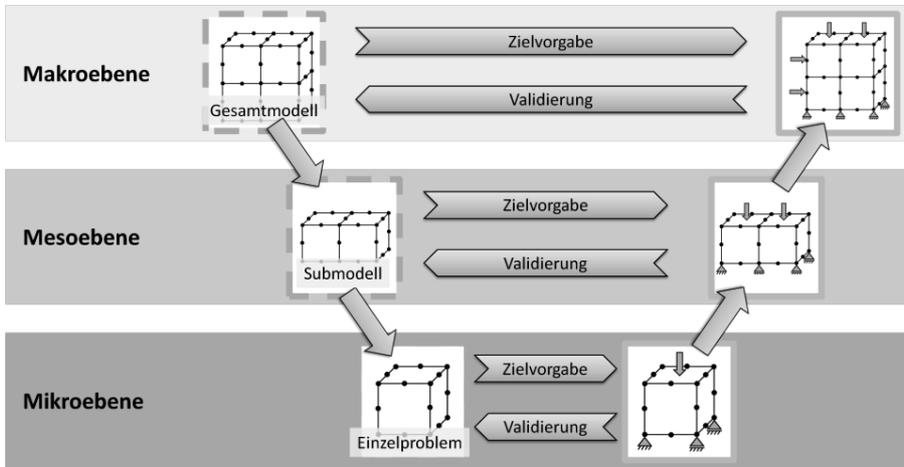


Abbildung 4: Mehrebenen-Ansatz

Die *Mikroebene* repräsentiert einzelne Funktionseinheiten und -mechanismen, welche in relativ überschaubaren und vereinfachten Modellen simuliert und bewertet werden können. Das grundsätzliche Augenmerk liegt hierbei auf den jeweiligen Simulationsvariationen wie z.B. Lagenaufbau oder auch Simulationsmechanismen, wie beispielsweise Schraubensimulation durch aufwendige Volumenbauteile oder vereinfachte Balkenelemente. Diese Ebene bietet den Vorteil, dass die Vorgehensweisen in diesem Stadium noch relativ allgemein gehalten werden können. Somit kann eine generische Datenbank angelegt werden, mit der für bestimmte Simulationsarten Wiederverwendungspotentiale erschlossen werden können. Eine eindeutige Zuordnung erfolgt mit Hilfe einer Domain Mapping Matrix (vgl. Kapitel 3.2) [7].

Für den CFK-Mast werden auf dieser Stufe in erster Linie verschiedene Varianten des Lagenaufbaus simuliert, um ein Optimum zwischen Stabilität und Kosten zu ermitteln (Abbildung 5) [4]. Dieser struktur- und lastfallabhängige Aufbau wird für das Mesomodell übernommen.

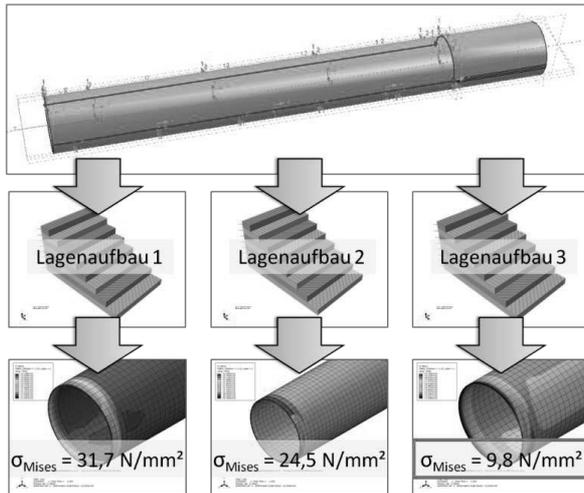


Abbildung 5: Mikroebene zur Ermittlung des lastgerechten Lagenaufbaus

Auf der *Mesoebene* werden die ausgewählten Prinzipien aus dem Mikromodell eingebunden und in Zusammenwirkung mit einzelnen Subsystemen untersucht. Demnach können Mesomodelle für kleinere Bauteile auch entfallen, wenn auf Grund der geringen Anzahl von Einzelkomponenten eine weitere Zerlegung nicht möglich ist.

Die Betrachtungen für das Beispielpiece werden auf dieser Ebene zusätzlich um die Anbindung von Anbauteilen erweitert, indem z.B. etwaige Harznuten und Klebeschichten (im Rahmen der verfügbaren Daten) abgebildet und simuliert werden (Abbildung 6).



Abbildung 6: Mesoebene zur Anbindung der Anbauteile

Ergebnisse dieses Mesomodells sind der Aufbau und die Anbindung der Führungsschienen der Einzelrohre. Den konkret auftretenden Belastungen hält die verwendete Klebeschicht stand, so dass für das Makromodell eine

vereinfachte ideale Klebung verwendet werden kann, wodurch sich sowohl Zeit für Modellausbau wie auch für dessen Berechnung reduzieren lässt.

Bei Simulation auf *Makroebene* werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den untergeordneten Modellen verarbeitet. Bei diesem aufwendigsten der Modelle können durch die „Aussortierung“ auf den unteren beiden Hierarchiestufen gezielt die geeignetsten Simulationselemente verwendet werden. Somit reduziert sich der zeitliche Aufwand für den Aufbau des Berechnungsmodells sowie für etwaige Iterationen / Nacharbeiten. Zusätzlich müssen die Zielvorgaben für jede Ebene geklärt werden, so dass eine gezielte Validierung einzelner Punkte ermöglicht wird. Bereits abgesicherte Erkenntnisse können dann direkt in die Validierung des Gesamtmodells einfließen.

Das Makromodell des Mastsystems schließlich umfasst alle relevanten Teile des Rohrsystems mit den gewonnenen Erkenntnissen (u.A. optimaler Lagenaufbau) und angenommenen Idealisierungen (z.B. Klebung, Schaubanbindungen, etc.) der einzelnen Submodelle. Durch Ergebnisse aus den Mikro- und Mesomodellen ist es damit möglich, eine Aussage über die Hauptfunktionsträger und hochbelasteten Teile zu treffen (Abbildung 7).

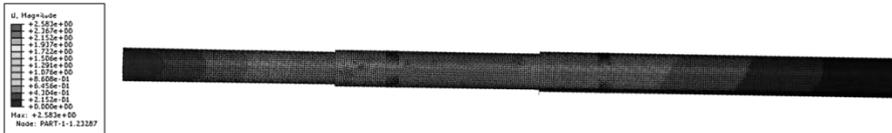


Abbildung 7: Simulation des gesamten Mastes auf Makroebene [11]

Die gezeigte Auswahl stellt jedoch auf Grund der Produktkomplexität nur einen Teil der möglichen Ebenen dar. Aus einer Dokumentation des Vorgehens müssen schließlich generische Best-Practice-Dokumente abgeleitet werden. Diese erschließen Wiederverwendungspotentiale für Folgeprojekte.

### 3.4 Ergebnis

Durch einen gezielten Lagenaufbau wurde eine gleichmäßige und unkritische Spannungsverteilung über die Rohrwandung erreicht, womit ausgewählte Modellvarianten der CFK-Rohre den geforderten Belastungen standhalten. Der Einsatz der CFK-Werkstoffe und einer angepassten Verarbeitung sollte vor allem eine Kosten- und Gewichtsreduktion pro Bauteil erzielen. Ein Vergleich

zwischen einem entsprechend bearbeiteten Rohrsystem aus Aluminium und der möglichen Neuentwicklung aus CFK wird in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Potentiale der CFK-Rohr-Neuentwicklung [11]

<b>Material</b>	<b>Aluminium</b>	<b>CFK</b>	<b>CFK</b>
<b>Wandstärke [mm]</b>	5	4	5
<b>Bauteilgewicht [kg]</b>	15,6	6,9	8,7
<b>Fertigungskosten [€]</b>	ca. 1600	820	920

#### 4 Zusammenfassung

Durch ein stufenweise detaillierteres Vorgehen können für die Bearbeitungs- und die Berechnungszeiten computergestützter Simulationsmethoden erheblich Zeitvorteile erreicht werden. Der leicht gestiegene Initialaufwand beim Erstellen der Modelle für die drei Simulationsebenen wird durch eine Zeitreduzierung beim Änderungsmanagement wieder aufgewogen. Gezielte Simulationen auf mehreren Detaillierungsstufen können ferner dazu beitragen, in der Praxis unnötige Iterationen zu vermeiden, da etwaige Probleme bereits auf den niederen Ebenen bereinigt werden können. Die methodische Verknüpfung von CAx-Werkzeugen (ICROS-Methode) in Verbindung mit dem Mehrebenenansatz hilft Entwicklungsbrüchen vorzubeugen und Fehler frühzeitig zu vermeiden. Somit wird eine Nacharbeit bei den aufwendigeren Gesamtmodellen deutlich verringert. Eine auf diese Weise verbesserte Planbarkeit trägt dazu bei, die Wirtschaftlichkeit im Produktentwicklungsprozess zu verbessern.

#### Literatur

- [1] Ehrenstein, G.: „Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften“, Carl-Hanser-Verlag, 2. Auflage, München Wien, 2006.
- [2] Krehmer, H.; Eckstein, R.; Lauer, W.; Roelofsen, J.; Stöber, C.; Troll, A.; Zapf, J.; Weber, N.; Meerkamm, H.; Henrich, A.; Jablonski, S.; Lindemann, U.; Rieg, F.; Wartzack, S.: „Das FORFLOW-Prozessmodell zur Unterstützung der multidisziplinären Produktentwicklung“. In: Konstruktion, Ausgabe10, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010.
- [3] VDI-Richtlinie 2221: „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“. VDI-Handbuch Konstruktion, Berlin. Beuth Verlag GmbH Berlin Düsseldorf, 1993.

- 
- [4] Pahl, G.; Beitz, W. et al.: "Konstruktionslehre, Methoden und Anwendungen", Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [5] Alber, B.; Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: „Product design with high-tech-polymers – Practical use of CAE-Tools with cross-linked simulations and experimental verification“. In: Materialpruefung, Carl Hanser Verlag, Volume 49, pp. 402-407, 2007.
- [6] Weber, C.; Werner, H.: „Schlussfolgerungen für „Design for X“ (DfX) aus der Sicht eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen“. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 12. Symposium, Erlangen, o.V., 2001.
- [7] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: „Structural Complexity Management“. Springer Verlag, Berlin 2009.
- [8] Zapf, J.; Alber-Laukant, B.; Rieg, F.: „Customized design processes of polymer parts by computer-aided tools“. In: International Design Conference DESIGN 2010, Dubrovnik - Croatia, 2010.
- [9] Vajna, S. et al.: „CAx für Ingenieure“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [10] o.V.: „Analysis of Composite Materials with Abaqus“. In: Vertiefungsseminar - Faserverbundstrukturen mit Abaqus, München, 2010.
- [11] Remer, H.: „Konstruktive und rechnergestützte Auslegung von Faserverbundbauteilen am Beispiel einer zylindrischen Struktur“. unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Bayreuth, Bayreuth, 2010.

# Berücksichtigung anisotroper Materialeigenschaften crashbelasteter Leichtbaustrukturen im Kontext früher Entwicklungsphasen

Georg Gruber, Nick Maltz und Sandro Wartzack  
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg*

To enable substantial progress in the context of lightweight design the early design steps have to be exploited adequately. Hereby the deployment of appropriate simulation techniques is very promising. Within the present paper a simplified approach to enable the simulation of short fiber reinforced polymers using a layer-based approach is introduced. The focus of the paper is the description of a simplified method enabling the consideration of the anisotropic behavior resulting from the manufacturing process.

## 1 Einleitung

Gemäß einer Studie des Marktforschungsinstituts TNS [1] sind ein geringer Kraftstoffverbrauch sowie die Fahrzeugsicherheit die entscheidenden Beweggründe beim Kauf eines Fahrzeugs. Der Kraftstoffverbrauch kann neben Reduktion von Reibungswiderständen und Verbesserung der Aerodynamik vor allem durch Leichtbau herabgesetzt werden. *Leichtbau* und *Crashsicherheit* sind jedoch als gegenläufige Ziele anzusehen, da Leichtbau häufig mit einer Reduktion der mechanischen Sicherheitsbeiwerte einhergeht. Dies hat ein verringertes Energiedissipationsvermögen sowie ein erhöhtes Risiko des Kollabierens der Fahrzeugstrukturen im Crash zur Folge. Um den Herausforderungen des crashgerechten Leichtbaus gerecht zu werden, gilt es den Lö-

---

sungsraum möglichst weit aufzuspannen. Es ist nicht ausreichend Details aktueller Lösungsvarianten anzupassen – vielmehr gilt es die Gestaltungsfreiheit der frühen Entwicklungsphasen ideal auszunutzen. Die Bewertung erster Lösungsentwürfe der frühen Phasen erfolgt i.d.R. mit Simulationswerkzeugen basierend auf der Finiten Elemente Methode (FEM). Die im Leichtbau häufig eingesetzten anisotropen Verbundwerkstoffe führen aufgrund ihres komplexen Materialverhaltens jedoch häufig zu Simulationsergebnissen, welche mit hohen Unsicherheiten verbunden sind.

Demnach muss die Entwicklung genauer Berechnungsansätze, angepasst an die Bedürfnisse der frühen Entwicklungsphasen, angestrebt werden. Diesbezüglich wurde am Anwendungsbeispiel im Spritzgussprozess herzustellender kurzfaserverstärkter Thermoplaste (KVTP) bereits eine Methode zur vereinfachten Abbildung des Materialverhaltens aufgestellt [2]. Die Vorstellung einer Möglichkeit zur Berücksichtigung des in der Fertigung entstehenden Anisotropiezustands im Bauteil ist die Zielsetzung des vorliegenden Beitrags.

Im Rahmen des Beitrags werden eingangs die Bedeutung aussagekräftiger Berechnungsansätze für frühe Entwicklungsphasen sowie der Stand der Technik in der Crashberechnung der fokussierten KVTPs beschrieben. Im Anschluss wird ein eigener Ansatz zur Abbildung des Materialverhaltens crashbelasteter Strukturen in frühen Phasen vorgestellt.

## 2 Bedeutung des Rechneinsatzes in den frühen Phasen der Produktentwicklung

Ziel der Produktentwicklung ist stets die Erstellung des Zielprodukts in möglichst kurzer Zeit bei möglichst geringen Kosten und maximaler Qualität. Der Einsatz von Simulationstechniken ermöglicht die Einsparung von Kosten durch Ersatz physikalischer Prototypen durch digitale Modelle und führt somit gleichzeitig zu einer Verkürzung der Entwicklungszeiten [3]. Als Simulation kann in diesem Zusammenhang jede Form der Abbildung einer realen Problemstellung mithilfe eines numerischen Modells angesehen werden. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags soll der Fokus auf Simulationstechniken liegen, welche zur Beurteilung strukturmechanischer Eigenschaften von Bauteilen genutzt werden. Als gängigste Variante ist hier die Finite Elemente Simulation zu nennen. Das hohe Potential der FEM zur Unterstützung der Produktentwicklung wird in [4] am Beispiel der Crashsimulation verdeutlicht. Hierbei wurden die benötigten Kosten und die benötigte Zeit für die virtuelle bzw. für die physikalische Evaluierung einer jeden Iterationsstufe im Entwicklungsprozess gegenübergestellt. Die numerische Evaluierung führte im gegebenen Fall zu

---

einer Reduktion der Analysezeit um ca. 78 % sowie zu einer Kostenersparnis von bis ca. 98 % pro Iterationsstufe.

Da der Großteil der Bauteilkosten bereits in den frühen Entwicklungsphasen festgelegt wird, liegt vor allem der verstärkte Einsatz der Simulation zur Unterstützung der frühen Entscheidungsfindung nahe [5]. Die Anwendung von Simulationsmethoden in der frühen Phase ermöglicht es eine größere Anzahl an Lösungskonzepten zu evaluieren, wodurch bessere konstruktive Lösungen erzielt werden können [4]. Voraussetzung ist jedoch eine hinreichende Genauigkeit der Simulationsansätze um eine adäquate Ausnutzung der Gestaltungsfreiheit der frühen Phasen zu gewährleisten. Dies wird jedoch im Kontext des Leichtbaus erschwert, da die hierbei häufig eingesetzten Verbundwerkstoffe aufgrund ihres komplexen Werkstoffverhaltens i.d.R. zum Einsatz stark vereinfachter Ansätze führen. Diese liefern lediglich ungenaue Ergebnisse. Die Anwendung aufwendiger Berechnungsansätze der späten Phase ist für erste Abschätzungen im Sinne der angestrebten verkürzten Entwicklungszyklen nicht anzustreben. Weiterhin sind die Bauteilmodelle und deren Parameter in frühen Phasen mit großen Unsicherheiten verbunden, weshalb der Einsatz sehr detaillierter Ansätze nicht zielführend ist [3]. Zielsetzung ist demnach die Entwicklung eines Mittelwegs, der bei vertretbarem Aufwand eine hinreichend genaue Abbildung des Materialverhaltens crashgerechter Leichtbaustrukturen ermöglicht. Eine ausreichende Ergebnisgüte setzt die Möglichkeit voraus, alle wesentlichen Effekte des Materialverhaltens (wie *Anisotropie*, *Dehnratenabhängigkeit*, etc.) berücksichtigen zu können.

### 3 Stand der Technik

Die gängigste Variante der simulativen Abbildung von Verbundstrukturen in frühen Entwicklungsphasen stellt die Verwendung stark vereinfachter Beschreibungsansätze dar. Hierbei werden komplexe Materialeigenschaften wie beispielsweise anisotrope oder dehnratenabhängige Steifigkeiten und Festigkeiten vollständig vernachlässigt und deren Einfluss über globale Abschwächungsfaktoren (Sicherheitsfaktoren) berücksichtigt [6]. Dies ermöglicht schnelle Simulationen mit minimalem Aufwand, liefert jedoch nur Ergebnisse mit i.d.R. nicht zufriedenstellender Genauigkeit.

Für eine möglichst exakte Validierung komplexer Verbundstrukturen wie KVTP sind zum einen aufwendige Materialmodelle einzusetzen, welche alle wesentlichen Effekte des Materialverhaltens abbilden können. Zum anderen gilt es, den aus der Fertigung resultierenden Orientierungszustand der Fasern mit Hilfe einer Spritzgiesssimulation zu ermitteln und auf das Netz der Struktursimulation zu übertragen. Dieser ganzheitliche Simulationsansatz wird als

---

integrative Simulation bezeichnet. Kommerzielle Lösungen zur Durchführung der integrativen Simulation sind beispielsweise die Softwaresysteme Converse [7] und Digimat [8]. Beide Berechnungssysteme sind den hochgenauen, jedoch gleichzeitig auch aufwendigen Berechnungsansätzen zuzuordnen (vgl. Kapitel 2). Weiterhin sei der Forschungsansatz von MICHAELI [9] zu erwähnen. Dieser Methode liegt ein multilinear-elastisches mikromechanisches Materialmodell zugrunde, welches gemäß den Ergebnissen aus [9] lediglich eine eingeschränkte Darstellung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens von KVTP ermöglicht. Die bei geringen Faserorientierungen deutlich erkennbare Plastizität von KVTP ist mithilfe dieses Ansatzes nicht darstellbar. Die Übertragung der Orientierungsinformationen erfolgt bei allen drei vorgestellten Varianten gemäß der Theorie des „Orientation Averaging“ nach ADVANI/TUCKER [10].

Die bestehenden Ansätze sind mit einem hohen Aufwand der Modellerstellung verbunden bzw. bieten zum Teil nicht die Möglichkeit beliebige Effekte des Materialverhaltens abzubilden. Folglich können die Ansätze nicht als ideal für die Nutzung der Gestaltungsfreiheit der frühen Phasen angesehen werden.

## 4 Berechnungsansatz für Verbundstrukturen in frühen Entwicklungsphasen

Aufgrund der derzeitigen Mängel an Berechnungsmethoden für den Einsatz in frühen Entwicklungsphasen wird am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) an einem neuen Berechnungsansatz gearbeitet. Hierbei gilt es zum einen eine Materialbeschreibung zu erstellen, welche eine Abbildung des Materialverhaltens ermöglicht. Zum anderen erfordert die somit definierte Materialbeschreibung im Falle von KVTP weiterhin eine Methode zur Abbildung des Anisotropiezustands, welcher sich durch den Fertigungsprozess einstellt.

### 4.1 Phänomenologische Materialbeschreibung

Die Materialbeschreibung stellt einen phänomenologischen Ansatz dar. Darunter wird ein Simulationsmodell verstanden, das zur Lösung einer inversen Problemstellung aufgestellt wird [11]. Dabei wird die Lösung einer ersten Berechnung experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt und die Eingangsparameter der Simulationsrechnung in der Form angepasst, dass eine möglichst gute Approximation der realen Verhältnisse erreicht wird. Grundlage der phänomenologischen Materialbeschreibung stellt der schichtbasierte Ansatz nach SCHÖPFER [12] dar. Dieser wurde im Rahmen der eigenen Forschungstätigkeiten an die Bedürfnisse der frühen Entwicklungsphase angepasst und erweitert [2]. Die grundlegende Idee der Beschreibungsmethode ist die Überlagerung verschiedener Materialmodelle (Partialmaterialmodelle) ge-

ringer Komplexität, mit dem Ziel beliebiges Materialverhalten abzubilden. Mithilfe einer benutzerdefinierten Integrationsregel können den Integrationspunkten in Dickenrichtung einer finiten Schalendefinition unterschiedliche Materialien zugewiesen werden. Durch die Zerlegung des Gesamtmodells in Partialmodelle, welche eine geringe Anzahl an Eingangsparameter aufweisen, kann eine einfache Parameterbestimmung (Parameterfitting) garantiert werden. Das Parameterfitting erfolgt in Form von drei Standard-Charakterisierungsversuchen (Zug-, Schub- und Biegeversuch), welche eine *unabhängige* Parameterermittlung ermöglichen. Die Probekörper für den physikalischen Versuch werden idealorientierten Platten in verschiedenen Positionen gegenüber der Vorzugsorientierung entnommen (vgl. Bild 1).

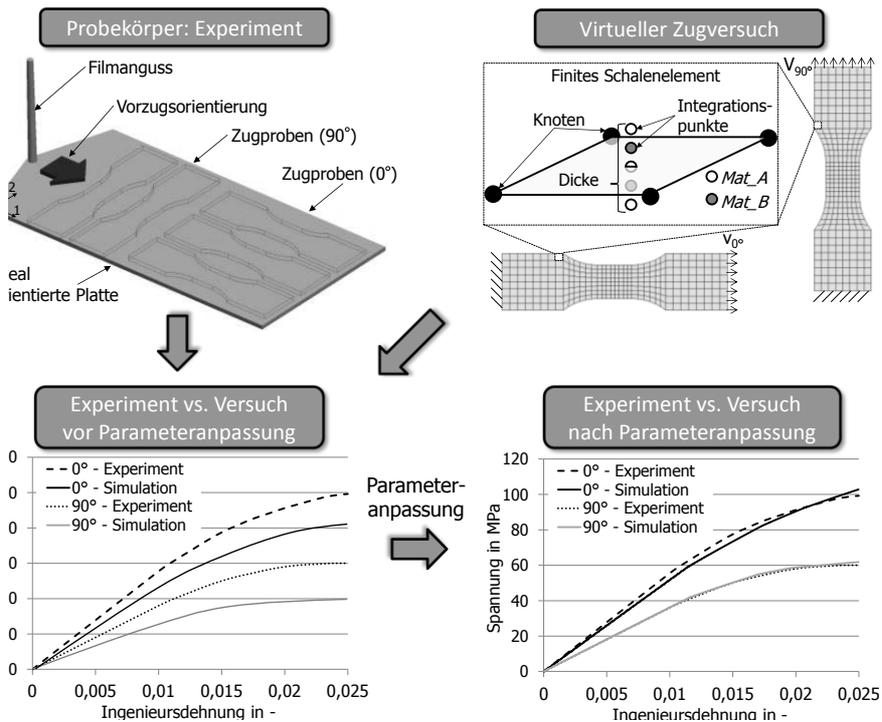


Bild 1: Schematischer Ablauf des Parameterfittings (Beispiel: Zugversuch)

Die in den physikalischen Charakterisierungsversuchen ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven müssen über Parametervariationen mithilfe der äquivalenten virtuellen Charakterisierungsversuche angenähert werden (Reverse Engineering, vgl. Bild 1 unten). Die Eingangsgrößen, welche das Verhalten

ten der Partialmodelle beschreiben (E-Modul, Schubmodul, Fließkurve, etc.), werden im Rahmen des Parameterfittings der Zug- und Schubversuche ermittelt. Der Biegeversuch dient lediglich der Festlegung der globalen Biegesteifigkeit, welche über die Anpassung der Schichtdicke der Partialmodelle beeinflusst werden kann. Der schematische Ablauf des Parameterfittings am Beispiel des Zugversuchs ist in Bild 1 dargestellt. Stellvertretend für den experimentellen Versuchsaufbau ist hierbei die ideal orientierte Platte abgebildet, welcher die Prüflinge entnommen werden.

## 4.2 Berücksichtigung der Anisotropie

### 4.2.1 Grundlagen der Faserorientierung in Spritzgussbauteilen

Die in Kapitel 4.1 betrachteten Probekörper weisen aufgrund der geometrischen Ausprägung des Angusses (Filmanguss, vgl. Bild 1) eine näherungsweise ideal orientierte und homogene Faserorientierung auf. Bei beliebig geformten Bauteilen entstehen jedoch in Abhängigkeit der im Spritzgussprozess entstehenden Fließbewegung der Polymerschmelze lokal variierende Orientierungsrichtungen und Orientierungsgrade der eingelagerten Fasern. Über die Bauteildicke kann die Faserorientierung vereinfacht mit einem Fünf-Schichtmodell (vgl. Bild 2) abgebildet werden [13].

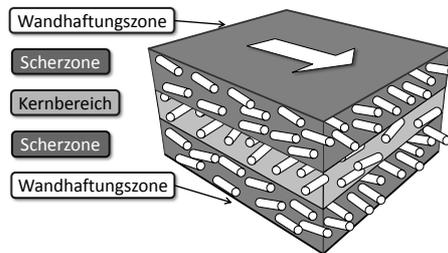


Bild 2: Vereinfachtes Fünf-Schichtmodell über den Bauteilquerschnitt

An den Bauteilwänden entsteht die Wandhaftungszone, welche eine regellose Orientierung aufweist. Aufgrund der sehr dünnen Ausprägung dieser Schicht soll die Wandhaftungszone im Folgenden nicht berücksichtigt werden. Den größten Bereich nehmen die Scherzonen ein. Hier liegen die Fasern bevorzugt in Schmelzfließrichtung vor und weisen somit einen hohen Orientierungsgrad  $\theta$  auf, weshalb die Scherzonen maßgeblich den globalen Anisotropiezustand bestimmen. Der Orientierungsgrad  $\theta$  sowie die Dickenausprägung der drei zentralen Schichten geben Rückschluss auf die Biegesteifigkeit der Struktur. Der Orientierungszustand des realen Bauteils wird mit Hilfe von

Spritzgussfüllsimulationen bestimmt. Diese liefern für jedes Element oder wahlweise jeden Knoten einen Orientierungstensor. Da das Berechnungsnetz der Prozesssimulation (i.d.R. Volumennetz) jedoch nicht deckungsgleich mit dem anvisierten Berechnungsnetz der Crashsimulation ist (i.d.R. Schalennetz), muss ein sogenannter Mapping-Algorithmus eingesetzt werden.

Die Orientierungsinformation wird gemäß der Theorie nach ADVANI/TUCKER [10] als symmetrischer 3x3-Tensor  $a_{ij} = a_{ji}$  angegeben. Über eine Hauptachsentransformation lässt sich der Tensor  $a_{ij}$  auf die Komponenten der Diagonalen  $\bar{a}_{ij}$  reduzieren. Die Eigenvektoren  $e_i$  von  $a_{ij}$  bilden eine Orthogonalbasis (lokales Koordinatensystem), welche die Hauptrichtungen der Orientierung wiedergeben. Die Eigenwerte  $\lambda_i$  ( $\bar{a}_{11}, \bar{a}_{22}, \bar{a}_{33}$ ) geben Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit  $\theta$  wie viele Fasern des betrachteten Raumelements entlang der entsprechenden Hauptrichtung ausgerichtet sind. Die Wahrscheinlichkeit  $\theta$  der Orientierungsausprägung kann anschaulich in Form eines Orientierungselipsoids dargestellt werden (vgl. Bild 3).

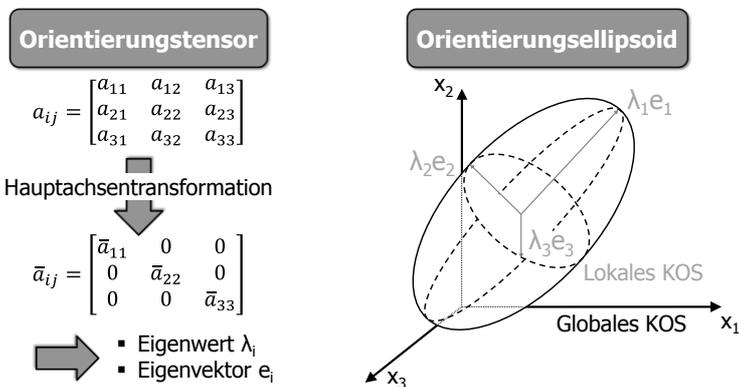


Bild 3: Mathematische Orientierungsbeschreibung

#### 4.2.2 Übergabe der Orientierungsinformationen

Mithilfe der Theorie des „Orientation Averaging“ nach [10] kann die Steifigkeitsmatrix der Strukturberechnung dem real vorliegenden Orientierungszustand mithilfe des Orientierungstensors angepasst werden. Diese Methode ist jedoch nicht mit der unter 4.1 vorgestellten schichtbasierten Materialbeschreibung kompatibel. Im Folgenden wird ein an die phänomenologische Materialbeschreibung angepasster Ansatz zur Übertragung der Orientierungsinformationen vorgestellt. Der Ablauf der Methode der Orientierungszuweisung (im Folgenden KTmfk-Ansatz genannt) wird anhand von Bild 4 erläutert.

Ausgangspunkt für die Berechnung ist ein CAD-Modell der Zielstruktur. Dieses ist die geometrische Grundlage für die Prozess- sowie für die Crashsimulation. Die Prozesssimulation erfolgt mithilfe der Software Moldflow®. Für eine überschlägige Berechnung der Faserorientierung ist hierfür lediglich das Zielmaterial aus der programminternen Datenbank zu wählen sowie die Angusspunkte zu setzen. Die Eigenwerte  $\lambda_i$  und Eigenvektoren  $e_i$  werden ursprünglich je Element berechnet, können jedoch auch bezogen auf die Knoten ausgegeben werden. Diese Variante ist für eine spätere Übertragung der Orientierungsinformationen zu bevorzugen, da somit die Eigenvektoren und Eigenwerte direkt einem Raumpunkt zugewiesen werden können.

Crashberechnungen werden bevorzugt an flächigen Schalenelementen (2D) durchgeführt. Hierfür wird aus dem Ausgangs-CAD-Modell (Bild 4a) ein Mittelflächenmodell abgeleitet, welches direkt für die Crashberechnung vernetzt werden kann (Bild 4b). Für die Übertragung der Orientierungsinformationen ist zusätzlich ein Hilfsnetz notwendig (Hexaedernetz, Bild 4c), welches vom Schalennetz abgeleitet werden kann. Über eine in MatLab® implementierte Software (Bild 4e) werden nun die zur jeweiligen Hexaederzelle zugehörigen Orientierungsachsen inklusive ihrer Länge (=Orientierungsgrad  $\theta$ ) auf die Mittelebene orthogonal projiziert und *gemittelt*. Dabei gehen die in z-Richtung wirkenden Steifigkeitsanteile verloren, welche jedoch in finiten Schalendefinitionen ohnehin nicht wiedergegeben werden können. Im Falle einer lokal bevorzugten Faserorientierung normal zur Bauteilebene wird dem betreffenden Element nur ein geringer Orientierungsgrad  $\theta$  in der Bauteilebene zugewiesen, was einer Schwächung des Bauteils gleich kommt. Dies gibt gut die realen Verhältnisse des Bauteilverhaltes wieder, da in Normalenrichtung eines flächigen Bauteils keine Zuglasten auftreten und somit eine stark ausgeprägte Orientierung in Normalenrichtung einen nicht nutzbaren Steifigkeitsgewinn darstellt. Die Orientierungsgrößen werden entsprechend dem Hilfsnetz (Bild 4c) in Dickenrichtung in drei Ebenen bestimmt (Bild 4h), wodurch die sich im Spritzgussprozess einstellenden drei dominierenden Schichten (vgl. Bild 2/Bild 2) wiedergegeben werden. Für einen vereinfachten Parameterfitting-Prozess sind diese im Nachgang gemäß [14] auf *eine* gemittelte Orientierung pro Element (Bild 4h) zu reduzieren. Die Orientierungsdaten aus Bild 4g werden benötigt um die Dicke der einzelnen Schichten des Materialmodells (vgl. Kapitel 4.1) festzulegen, welche die Biegesteifigkeit wiedergeben. Wenn die resultierende Orientierung aus Bild 4g beispielsweise primär auf eine dominante Mittelschicht zurückzuführen ist, liefert dies einen hohen Beitrag zur Zugsteifigkeit. Die resultierende Biegesteifigkeit fällt jedoch relativ gering aus, da diese maßgeblich von den Außenschichten bestimmt wird. Um das globalverhalten der Zielstruktur wiederzugeben sind demnach die Orientierungsdaten aus Bild 4g und Bild 4h zu berücksichtigen.

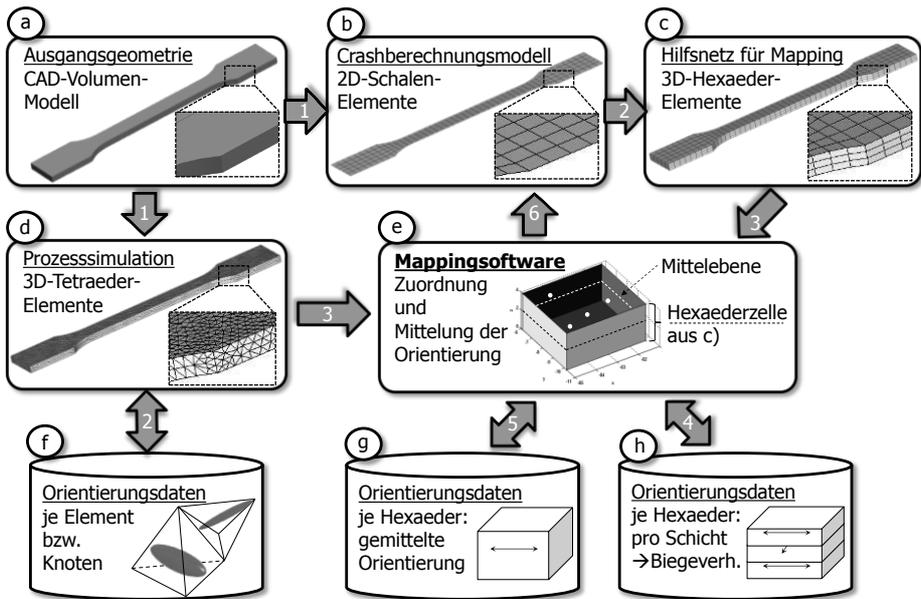


Bild 4: Workflow der Orientierungszuweisung (KTmfk-Ansatz)

Im Folgenden soll genauer auf das Vorgehen der Mittelung der Vektoren eingegangen werden. Hierfür ist eingangs die Elementausrichtung zu bestimmen. Die Orientierungsinformationen im Ansatz aus Abschnitt 4.1 werden über ein transversalisotropes Materialgesetz beschrieben. Deshalb sind die Materialkennwerte in Schalenebene in Bezug auf ein orthogonales Koordinatensystem (Hauptachse  $x_{a^*}$  und Nebenachsen  $x_{b^*}$ ) anzugeben (vgl. Bild 5a). Die Bestimmung der Hauptausrichtung kann auf zwei Arten erfolgen. Hierbei ist zu beachten, dass die Orientierungsinformationen nicht konventionell als einseitig gerichtete Vektorgroße, sondern als Achsen (gegenseitig orientiertes Vektorpaar) zu behandeln sind. Nach der orthogonalen Projektion ist somit jeder resultierende Vektor um das gegensätzlich orientierte Pendant (negatives Vorzeichen) zu erweitern und als Vektorpaar darzustellen. Die beiden Varianten der Hauptachsenbestimmung sind in Bild 5b<sub>I</sub>/b<sub>II</sub> anhand jeweils zweier Beispiele dargestellt. Ausgangslage in beiden Fällen sind die drei, auf die Schalenebene projizierten, Vektoren eines Orientierungselipsoids, welche gemäß vorheriger Erläuterung um den negativ gerichteten Vektor erweitert sind. Bei Variante I ergibt sich  $x_{a^*}$  über eine Vektoraddition. Aufgrund der Achsenproblematik (Orientierungswahrscheinlichkeiten dürfen sich *nicht* aufheben) ist die Addition in der Form auszuführen, welche den maximalen Orientierungsgrad liefert. Bei Variante II wird der dominierende Orientierungsan-

teil direkt als Hauptorientierung übernommen. Variante I hat den Vorteil, dass alle Orientierungsvektoren in die Bestimmung von  $x_{a^*}$  eingehen (vgl. Bild 5, Bsp. 1). Variante II hat den Vorteil, dass im Falle nahezu senkrecht aufeinander stehender Orientierungen keine fälschliche Ablenkung der Orientierung erfolgt (vgl. Bild 5, Bsp. 2).

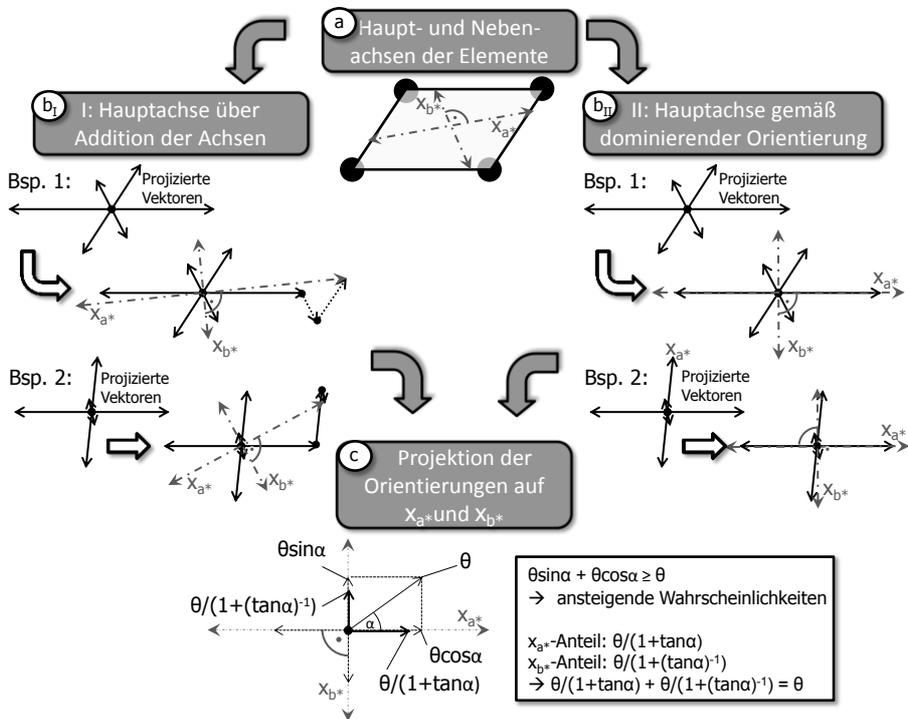


Bild 5: Bestimmung der Elementausrichtung und des Anisotropiezustands

Nach Bestimmung der Hauptachsen, sind alle projizierten Orientierungsvektoren auf die Hauptachse *und* die dazu orthogonale Nebenachse zu projizieren. Die Summe der Längen der projizierten Vektoren ist stets größer als die Länge des Ausgangsvektors. Dies entspricht einem widersinnigen Zuwachs an Wahrscheinlichkeiten. Folglich sind die Längen der jeweils resultierenden Vektoren gemäß Bild 5d) auf die Länge des Ausgangsvektors zu normieren. Abschließend sind die ermittelten Wahrscheinlichkeiten  $\theta$  je Achse aufzusummieren und durch die Anzahl der Vektoren zu teilen. Somit erhält man die umgerechneten Orientierungsgrade in Bezug auf das orthogonale Koordinatensystem eines jeden finiten Schalenelements.

Über den Software-Prototyp können die Hauptachsen  $x_{a*}$  visualisiert werden. Diese sind in Bild 6 beispielhaft für die Scherzonen eines beidseitig angespritzten Zugstabs dargestellt und den Ergebnissen einer Moldflow-Simulation gegenübergestellt. Der qualitative Vergleich zeigt eine gute Überstimmung zwischen den Ergebnissen von Moldflow und des KTmfk-Ansatzes. An den Enden des Zugstabs ist in beiden Fällen eine radiale Orientierung in Bezug auf den Angusspunkt zu erkennen. Die in der Stabmitte auftretende Bindenaht sowie die sonst homogene Verteilung in Stablängsachse werden über den KTmfk-Ansatz qualitativ wiedergegeben.

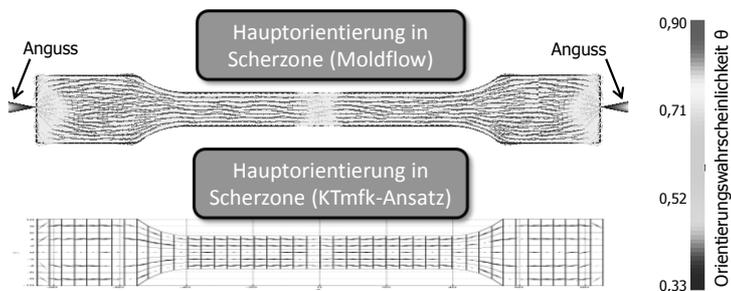


Bild 6: Orientierung in Scherzone: Moldflow vs. KTmfk-Ansatz

## 5 Ausblick

In der derzeitigen Implementierungsstufe der Software erfolgt die Ermittlung der Haupt- und Nebenachse der Elementdefinition ausschließlich über die Addition der einzelnen projizierten Achsen (Variante I). Im Rahmen einer Überarbeitung der Software ist weiterhin die Bestimmung der Hauptachsen anhand der dominierenden Orientierungsstufe (Variante II) zu implementieren und die Leistungsfähigkeit beider Varianten der Hauptachsenbestimmung zu evaluieren. Um die Durchführung der fokussierten Crashsimulation zu ermöglichen ist weiterhin eine Methodik zu entwickeln, welche die Ableitung der Materialkennwerte in Abhängigkeit des Orientierungsgrads ermöglicht.

## Literatur

- [1] TNS Market research: "Public Opinion survey on Energy Efficient Cars", August, 2008.
- [2] Gruber, G.; Wartzack, S.: "An optimized material representation for crashworthy lightweight structures within early design steps", International Conference on Industrial Engineering, Stuttgart, 2011.

- 
- [3] Paredis, C.J.J., Diaz-Calderon, A., Sinha R., Khosla, P.K.: "Composable Models for Simulation-Based Design", *Engineering with Computers*, Vol. 17 (No. 2), 2001, S. 112.-128.
- [4] Thomke, S.H.: "Simulation, learning and R & D performance: Evidence from automotive development", *Research Policy*, Vol. 27 (No. 1), 1998, S. 55.-74.
- [5] Will, P.M.: "Simulation and Modeling in Early Concept Design: Industrial Perspective", *Research in Engineering Design*, Vol. 3 (No. 1), 1991, S. 1.-13.
- [6] Schmachtenberg, E.; Brandt, M.: „Wenn Kunststoffe Metall ersetzen. Plastverarbeiter“, Vol. 55 (No. 8), 2004, S. 52-53.
- [7] Korte, W.: „Technische Kunststoffbauteile besser dimensionieren“, *Kunststoffe*, 11/2003, S. 70-73.
- [8] Assaker, R.: „DIGIMAT Multi-Scale Modeling“, *Kunststoffe + SIMULATION*, Fellbach, 2008.
- [9] Michaeli, W.; Heesel, B.: „Lokale Orientierungen integriert“, *Kunststoffe*, 09/2010, S. 179-182.
- [10] Advani, S.G.; Tucker III, C.L.: "The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites", *Journal of Rheology*, Vol. 31 (No. 8), 1987, S. 751-784.
- [11] Ramuhalli, P.; Udpa, L.; Udpa, S.: "Neural network-based inversion algorithms in magnetic flux leakage nondestructive evaluation". *Journal of Applied Physics*, Vol. 93 (No. 10), 2003.
- [12] Schöpfer, J.; Becker, F.; Maier, M.; Kolling, S.: „Charakterisierung und Modellierung von kurzfaserverstärkten Kunststoffen“, In: 9. LS-Dyna Forum, Bamberg, 2010.
- [13] Schoßig, M.: „Bewertung der Schädigungsmechanismen von kurzglasfaserverstärkten Polyolefinen“, *Dissertation*, Universität Halle, 2010.
- [14] Gruber, G.; Klein, D.; Wartzack, S.: "A modified approach for simulating complex compound structures within early design steps". In: 8<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, 2011.

## Design for Ramp-up komplexer Produkte am Beispiel der Flugzeugindustrie

Steffen Elstner und Dieter Krause  
*Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg*

The production ramp-up represents more and more a critical point in the product life cycle. The ability to launch a product into the market under cost-, time- and quality-pressure, is an important success factor for companies. The aim is to develop a methodology for the early identification and minimization of ramp-up risks with the help of response strategies in the product development. This paper highlights the need for early consideration of the production ramp-up phase in the development of complex products and presents a general approach for the risk assessment of the ramp-up factors.

### 1 Einleitung

Der Übergang zwischen Entwicklung und Produktion von komplexen Produkten stellt einen kritischen Punkt im Produktlebenszyklus dar. Die Fähigkeit, trotz hoher Komplexität innovative Produkte termin-, qualitäts- und kostengerecht in den Markt einzuführen, ist ein immer wichtiger werdender Erfolgsfaktor für Unternehmen [1]. Eine Zielabweichung kann für das Unternehmen zu erheblichen wirtschaftlichen Konsequenzen führen. Im Vergleich zur Automobilindustrie unterscheiden sich die Produkte der Flugzeugindustrie durch eine wesentlich höhere Komplexität und einen Produktlebenszyklus von weit mehr als 20 Jahren. Der Einsatz neuer Technologien und die Umsetzung innovativer Konzepte birgt die Gefahr, dass es im Entwicklungs- und Fertigungsprozess zu unvorhergesehenen Problemen kommen kann. Um in Zukunft neue wettbewerbsfähige Produkte zur Marktreife zu bringen, ist es unabdingbar, gerade

bei sehr langen Entwicklungszeiten, hoher Komplexität und anfänglich großer Unsicherheit, bereits in der Entwicklungsphase mögliche Anlauftrisiken zu identifizieren und zu bewältigen. Der vorliegende Beitrag ordnet sich in den Schnittstellenbereich zwischen Entwicklung und Fertigung ein und beschreibt eine methodische Betrachtung zur Verbesserung der Übertragung der Entwicklungsergebnisse in die Produktion.

## 2 Stand der Technik und Analyse des Forschungsbedarfs

Die wachsende Bedeutung des Forschungsfeldes „Serienanlauf“ als kritische Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsprozess kann durch die sinkende Entwicklungs- und Fertigungstiefe, die Verkürzung der Produktlebenszyklen und Produktentwicklungszeiten sowie die zunehmende Produktvielfalt und Produktkomplexität begründet werden [2]. Ein Großteil der in der Literatur zu findenden Ansätze konzentriert sich auf branchenspezifische Probleme der Automobilindustrie und der Halbleiterindustrie [2–6]. Eine allgemeingültige Definition der Phase des Serienanlaufs geben *Wangenheim* und *Terwiesch*. Der Serienanlauf bezeichnet den Zeitraum zwischen der Produktentwicklung und der Serienproduktion. Der Transfer von Entwicklung zur Produktion erfolgt dabei stufenweise. Änderungen und Störungen im Produkt und im Prozess werden in der Regel innerhalb der Vor- und Nullserie mit Hilfe von zahlreichen Prototypen behoben [3]. Das Ende dieser Phasen stellt das Erreichen der zuvor definierten Ausbringungsmenge und Produktqualität dar und geht anschließend in die Serienproduktion über [6].

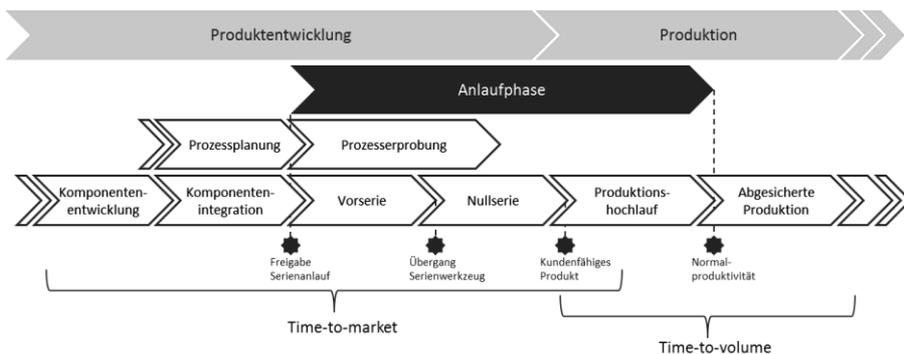


Bild 1: Übersicht der Serienanlaufphasen nach [3]

Gerade für komplexe Serienprodukte stellt die Übergangsphase besondere Anforderungen an die Gestaltung der Schnittstelle dar. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Systemen, Komponenten und Bauteilen, in denen zusätzlich unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen können, ist ein

---

umfangreiches Know-How erforderlich. Eine sinkende Entwicklungstiefe erfordert eine zusätzliche Abstimmung mit externen Organisationseinheiten und generiert eine organisatorische Komplexität [3]. Zeitverzögerungen in der Entwicklung und Einführung von High-Tech-Produkten führt zu stark negativen Auswirkungen auf die Bruttogewinne [4]. Weiterhin beeinflussen der Neuheits- bzw. Innovationsgrad des Produktes und deren Qualität (Reifegrad) eine erfolgreiche Überführung in die Serienproduktion. Empirische Studien belegen die zuvor identifizierten Einflussfaktoren. Nach den Untersuchungsergebnissen von *Coughlan* steigt beispielsweise die Wahrscheinlichkeit einer Verzögerung des Serienanlaufs mit dem Innovationsgrad der Produkt- und Prozesstechnologie. Insbesondere der Einsatz neuer Materialien verursacht Probleme, die laut *Coughlan* nicht durch geringe Testumfänge in der Entwicklung kompensiert werden können [7]. *Tyre* bestätigt in seiner Studie eine stark signifikante Korrelation der Dauer des Serienanlaufs mit der Komplexität der neuen Technologien, dem Ausmaß an Systemumstellung und dem Projektumfang [9]. *De Meyer* kam unter anderem zu dem Ergebnis, dass erfolgreiche Produkteinführungen durch einen hohen Anteil an selbst entwickelten Komponenten gekennzeichnet sind [8]. Innerhalb der qualitativen Untersuchungen von *Kuhn et al.* wird darauf aufmerksam gemacht, dass sich die Erreichung der Zielparameter (Zeit, Kosten und Qualität) durch eine Vernetzung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg ergeben. Dies beinhaltet unter anderem den Grad an neuen Produkten im Unternehmen, die Einbindung der Lieferanten in den Entwicklungsprozess und die Flexibilität von Fertigungsprozessen [10]. *Almgren* stellte in seiner Studie fest, dass die Anzahl und die Frequenz von Störungen innerhalb des Serienanlaufs dazu führen, dass die Organisation stark überlastet wird und es zu einem Verlust an Produktionskapazität kommt. Als Ursachen für die Störungen identifizierte *Almgren* unter anderem die Anzahl konstruktiver Änderungen am Produkt [5]. In einer Studie von *Terwiesch et al.* wurden drei wesentliche Bestandteile zur Verkürzung der Serienanlaufphase identifiziert. Erstens unterstützt eine schrittweise Überführung von Pilotserie zu Serienproduktion eine deutlichere Leistungssteigerung. Zweitens begünstigen klare Verantwortlichkeiten und eine Cross-funktionale Organisation einen besseren Übergang zwischen Entwicklung und Produktion. Weiterhin führt die Einführung von Produktplattformen zu einer effektiveren Nutzung von zuvor gesammelten Serienanlaufferfahrungen bei neuen Produkten [6]. Im Vergleich zu anderen Branchen ergeben sich für die Flugzeugindustrie einige Besonderheiten während der Einführung neuer Produkte. Der Produktentstehungsprozess in der Flugzeugindustrie ist gekennzeichnet durch das Fehlen einer Vor- und Nullserie im engeren Sinne. Dies ist zurückzuführen auf die sehr hohen Entwicklungs- und Stückkosten der Produkte. Zur Absicherung der Produktqualität stehen im Rahmen der Entwicklung zahlreiche Tests und Simulationen im Vordergrund [11]. Diese

allein sind nicht ausreichend, um mögliche Zielabweichungen im Entwicklungsprojekt zu vermeiden. Ein Großteil der Störungen und Probleme tritt erst im Zusammenspiel von Produkt und Produktionssystem auf. Aufgrund der dramatischen Auswirkungen einer Zeitabweichung auf die Kosten des Entwicklungsprojekts (Investitions- und Kapitalbindungskosten) sollte eine effektive Abwendung von potentiellen Zielabweichungen (Risiken) bereits in der Entwicklung erfolgen können. Aktuelle Produkte in der Flugzeugindustrie belegen die gravierenden Auswirkungen von Verzögerungen. Sowohl Boeing als auch Airbus haben Probleme, neue Produkte in die Serienproduktion zu überführen. Dies hat zur Folge, dass es zu Abschreibungen in Milliardenhöhe kommt und die Gewinnschwelle des Produktprogramms sich weiter verschiebt [12]. Hauptursachen sind, neben der hohen Komplexität, der Einsatz neuer Materialien und Technologien, die hohe Kundenvielfalt und die geringe Entwicklungs- und Fertigungstiefe [13]. Das Outsourcing von Entwicklungspaketen in ähnlichem Umfang wie in der Automobilindustrie wurde bereits 2001 von *Hart-Smith* kritisiert [14]. Die aktuelle Entwicklung im Serienanlauf der Boeing 787 zeigt, dass diese Strategie zu einem extremen Anstieg der Entwicklungskosten und zu Verzögerungen von mehreren Jahren führt [13]. Die sich aus den Untersuchungen, aus Sicht der Produktentwicklung, ergebenden Faktoren zur Beeinflussung eines effizienten Serienanlaufs sind zusammenfassend in folgender Abbildung dargestellt.

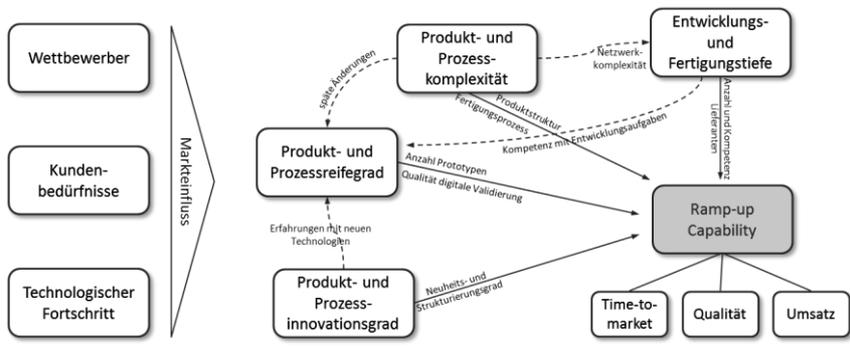


Bild 2: Einflussfaktoren auf die Serienanlauffähigkeit eines Produkts

Aufgrund des mit zunehmender Projektdauer abnehmenden Handlungsspielraums muss eine rechtzeitige Bewertung und Analyse der Faktoren möglich sein. Nur so können Risiken rechtzeitig identifiziert und Entscheidungsprozesse unterstützt werden. Der Faktor Komplexität kann durch seine Varietät (Art/Anzahl der Elemente), Konnektivität (Art/Anzahl der Beziehungen) und Dynamik (Art/Anzahl möglicher Zustände) beschrieben werden [15, 16].

Je komplexer Produkt und Fertigungsprozess sind, desto größer ist der Einfluss auf die Entwicklungsdauer und –kosten. Der Innovationsgrad wird durch die Entwicklung neuer Produkte und Produktionsprozesse beschrieben [3]. Dies beinhaltet unter anderem auch den Einsatz neuer Technologien und neuer Materialien, die wiederum unter Umständen neue Fertigungsverfahren voraussetzen. Je größer der Neuheitsgrad der Technologie für das Unternehmen ist, desto schwieriger ist ein effizienter Übergang in die Serienproduktion. Der Serienreifegrad ermöglicht eine Aussage über die technische Reife des Produkts und somit eine Darstellung der funktionalen Anforderungen zu jedem beliebigen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess [4]. Für die Abschätzung und Beherrschung der Faktoren, die auf die Serienanlauffähigkeit Einfluss haben, wird im folgenden Abschnitt die Entwicklung eines methodischen Ansatzes präsentiert. Aufgrund der langen Entwicklungszeit komplexer Produkte und einer möglichen Zielverlagerung im Laufe der Entwicklung soll die Methode eine Bewertung von Serienanlauftrisiken bereits während des Produktentstehungsprozesses ermöglichen.

### 3 Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Serienanlauffähigkeit aus Sicht der Produktentwicklung

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung einer Methodik, die in der Lage ist, die in Abschnitt 2 beschriebenen Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf den Serienanlauf zu beschreiben und zu bewerten. Aussagen über die Serienanlauffähigkeit des zu entwickelnden Produkts sollen helfen, bereits innerhalb der Entwicklung eine gezielte Risikokommunikation zu ermöglichen und als Grundlage für effiziente Entscheidungsprozesse zu dienen. Die allgemeine Vorgehensweise ist in Bild 3 dargestellt.

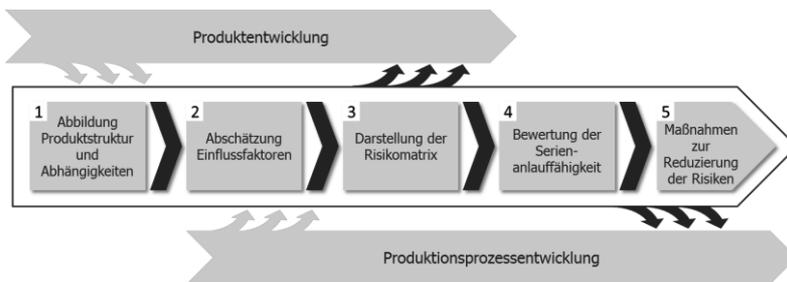


Bild 3: Allgemeine Vorgehensweise des Ansatzes

### 3.1 Abbildung der Produktstruktur und deren Abhängigkeiten

Die innerhalb der Konzeptphase entwickelten Komponenten des Produktes können bereits in einem sehr frühen Stadium der Entwicklung abgebildet werden. Konkrete Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Produkts können allerdings nur bedingt getroffen werden. Im ersten Schritt soll zunächst die vorhandene Produktstruktur, die auf Basis von Strukturierungsmethoden wie der Modularisierung oder Plattformstrategien entwickelt wurde, abgebildet werden. Dabei wird auf am Institut entwickelten Darstellungsmethoden für die Modularisierung von Produktfamilien zurückgegriffen [17]. Die einzelnen Komponenten der Produktfamilie werden innerhalb des *Module Interface Graph (MIG)* dargestellt [18]. In Bild 4 zeigt exemplarisch die Struktur eines Teils des Kabinenlinings eines Flugzeugs, welcher allerdings nur einen kleinen Ausschnitt des Gesamtprodukts abbildet.

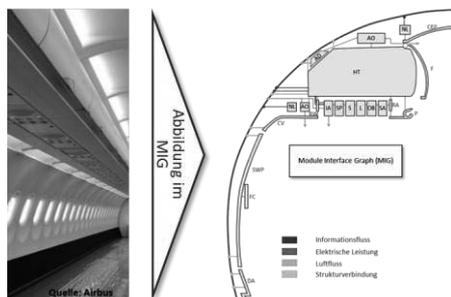


Bild 4: Abbildung der Produktstruktur und deren Abhängigkeiten

Mit Hilfe des MIG können zum einen die Komponenten in ihrer ungefähren Position und zum anderen auch ihre Schnittstellen abgebildet werden. Zusätzlich bietet der Graph eine effiziente Unterstützung bei der Abbildung der Beziehungen und der unterschiedlichen Flüsse, die in anderen Darstellungsmöglichkeiten, wie CAD- oder PDM-Daten nicht erfasst werden. Kommt es aufgrund von z.B. Gewichtsreduzierungsmaßnahmen zu Änderungen innerhalb der Struktur, können mögliche Abhängigkeiten und deren mögliche Auswirkungen nachvollzogen und dargestellt werden.

### 3.2 Abschätzung der Einflussfaktoren und deren Auswirkungen

Auf Basis der Produktstruktur werden im nächsten Schritt die einzelnen Bereiche hinsichtlich der Einflussfaktoren (vgl. Bild 2) abgeschätzt. Der Innovationsgrad lässt sich in Marktneuheits- und Technologie neuheitsgrad aufteilen [19]. Innerhalb des Neuheitsgrades für den Markt kann die Unterschei-

---

derung zwischen Weiterentwicklung, Neuentwicklung mit Technologien, die bereits bekannt sind, und Neuentwicklung mit neuen Technologien unterschieden werden. Innerhalb des Technologieneuheitsgrads kann die Unterscheidung zwischen Übernahmekomponenten mit gleichen Fertigungsverfahren, mit neuen Komponenten oder Materialien sowie mit neuen Komponenten mit neuen Materialien erfolgen (vgl. Bild 5). Hinsichtlich des Serienanlaufs wird die Neuentwicklung mit neuen Technologien als kritisch eingestuft. Es fehlen Erfahrungen mit der Fertigung und der Integration neuer Materialien sowie Leistungsmerkmale neuer Komponenten. Gibt es bereits ähnliche Produkte der Konkurrenz am Markt, können Erfahrungen aus dem Einsatz des Produkts gewonnen werden. Ist dies nicht der Fall, müssen besonders im Vorfeld des Serienanlaufs gesonderte Maßnahmen zur Absicherung getroffen werden.

Die Produktkomplexität lässt sich, neben der Anzahl und Vielfalt der Produktkomponenten (aus dem MIG zu entnehmen), durch die Vielzahl an Beziehungen ableiten. Je größer die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten sind, desto größer sind der Änderungsaufwand und die Fehlerfortpflanzung im Laufe des Serienanlaufs. In der Luftfahrtindustrie entsteht ein Großteil des Änderungsaufwands durch Gewichtsvorgaben, die im Rahmen von Iterationschleifen erreicht werden müssen. Kommt es zu Anpassungen in Bauteilen, können auch Änderungen in dem vom Bauteil abhängigen Komponenten erforderlich sein. Dies wirkt sich negativ auf die Zielkriterien des Serienanlaufs aus. Für die Prozesskomplexität sind die Anzahl, Vielfalt und die zeitliche Parallelität der notwendigen Aktivitäten entscheidende Treiber zur Beeinflussung der Kriterien [15]. Durch eine hohe Anzahl an Aufgabenträgern und einer starken Wechselwirkung zwischen den einzelnen Aktivitäten ist das Risiko einer Verzögerung aufgrund der Koordination sowie der zahlreichen Schnittstellen wesentlich höher (vgl. Bild 5).

Die Berücksichtigung des Produktreifegrads als Kriterium kann über die drei Dimensionen Produkt, Prozess und Kapazität berücksichtigt werden (vgl. Bild 5). Dabei werden Bauteile nach ihrem erreichten Konkretisierungsstand und der Erfüllung funktionaler sowie technischer Anforderungen einer Stufe zugeordnet. Für den Fortschrittsverlauf ist die Vorgabe des prozentualen Anteils an Bauteilen, der zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Stufe erreicht haben muss, notwendig [3]. Der Zeitpunkt der Erreichung wird in der Regel an Quality Gates gekoppelt. Eine frühzeitige Identifizierung von Abweichungen ist ein wichtiger Stellhebel zur Absicherung der Qualität im Serienanlauf. Eine mangelnde Produktreife führt zu unnötigen Rekursionsschleifen in der Entwicklung und bedeutet einen zeitlichen und finanziellen Mehraufwand. Die möglichen Absicherungsmethoden zur Senkung der negativen Auswirkun-

gen eines niedrigen Reifegrads richten sich nach der Produktcharakteristik. Innerhalb der Flugzeugindustrie wird nur eine geringe Anzahl an Prototypen eingesetzt. Umso genauer muss im Gegenzug die digitale Validierung bzw. ein gezielter Einsatz von Demonstratoren erfolgen [20]. Für die Ermittlung der Entwicklungstiefe und die notwendige Koordination der Entwickler kann ebenfalls die Strukturdarstellung des MIG herangezogen werden. So können die Schnittstellen zu externen Bauteilen und deren ungefähre Lage im Produkt ermittelt werden. Eine rechtzeitige Integration und Berücksichtigung innerhalb der Reifegradbewertung der Lieferanten ist unabdingbar für die Überführung in die Serienproduktion. Weitere Aspekte sind die Ressourcenverfügbarkeit und die Expertise der Lieferanten. Diese sollten bereits zu Beginn des Entwicklungsprojekts bewertet und zur Auswahl herangezogen werden. Erfahrungen aus der Vergangenheit haben gezeigt, dass beispielsweise Entwicklungspakete in der Luftfahrtindustrie aufgrund der Komplexität und des Neuheitsgrads nicht in der gewünschten Qualität bewältigt werden konnten [13]. Dies verursachte enorme Verzögerungen und zusätzliche Kosten für den OEM. In der folgenden Darstellung sind zusammenfassend die Einflussfaktoren und eine grobe Differenzierung des Risikopotentials der Faktoren abgebildet.

Einflussfaktoren		Risikopotential		
		gering		hoch
Innovationsgrad	Marktneuheitsgrad	Weiterentwicklung	Neuentwicklung mit Technologien, die umfassend bekannt sind	Neuentwicklung mit nicht bekannten Technologien
	Technologie-neuheitsgrad	Übernahmekomponenten	Neue Komponenten oder Materialien	Neue Komponenten aus neuen Materialien
Komplexität	Produktkomplexität	Geringe Anzahl und Vielfalt von Komponenten und Beziehungen	Mittlere Anzahl und Vielfalt von Komponenten und Beziehungen	Hohe Anzahl und Vielfalt von Komponenten und Beziehungen
	Prozesskomplexität	Geringe Anzahl und Vielfalt von parallelen Aktivitäten	Mittlere Anzahl und Vielfalt von parallelen Aktivitäten	Hohe Anzahl und Vielfalt von parallelen Aktivitäten
Reifegrad	Produktreifegrad	Funktionale Anforderungen voll erfüllt	Komponenten verwendungsfähig, funktionale Anforderungen nicht vollständig erfüllt	Funktionsprüfung der Komponenten noch nicht möglich
	Prozessreifegrad	Qualität der Komponenten reproduzierbar	Produktion auf Serienanlage möglich, hoher Anteil an Nacharbeit	Prozessfähigkeit noch nicht prüfbar, Serienanlage noch nicht determiniert
Supplier-Integration	Entwicklungstiefe	geringe Anzahl an Komponenten vom Entwicklungspartner	mittlere Anzahl an Komponenten vom Entwicklungspartner	hohe Anzahl an Komponenten vom Entwicklungspartner
	Fertigungstiefe	Geringe Anzahl an 1st Tier Lieferanten	Mittlere Anzahl an 1st sowie 2nd Tier Lieferanten	Hohe Anzahl an 1st sowie 2nd Tier Lieferanten

Bild 5: Einflussfaktoren und deren Risikopotential-Ausprägungen

### 3.3 Darstellung innerhalb einer Risikomatrix

Für die einheitliche Risikobewertung der vorgestellten Einflussfaktoren kann auf die häufig verwendete Darstellung des Risikoportfolios zurückgegriffen werden. Dabei werden zum einen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikofalls und zum anderen die Auswirkung bzw. Tragweite des Risikofalls

gegeneinander aufgetragen [21]. Für die Einflussfaktoren kann, wie in Bild 5 dargestellt, das abgeschätzte Risikopotential ( $P_i$ ) als Eintrittswahrscheinlichkeit auf einer ganzzahligen Skala abgeschätzt werden. Die Tragweite des Risikopotentials ( $T_i$ ) bezieht sich dabei auf die möglichen Auswirkungen auf die Zielkriterien des Serienanlaufs. Die Bewertung erfolgt auf Basis der gegebenen Produktstruktur und deren Beziehungen.

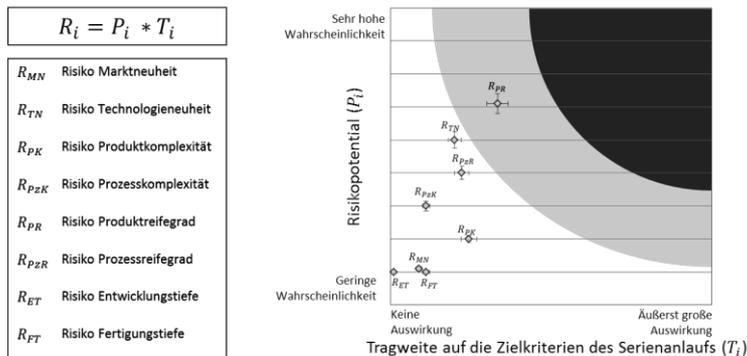


Bild 6: Darstellung des Risikopotentials und deren Tragweite

### 3.4 Bewertung der Anlauffähigkeit

Für die abschließende Bewertung der Serienanlauffähigkeit werden die einzeln bewerteten Risikokennzahlen zusammengefasst. Dabei ist es entscheidend, auch eine Beeinflussung der einzelnen Risikofaktoren untereinander zu berücksichtigen. Eine einseitige Betrachtung der Effekte im Hinblick auf die Zielkriterien Time-to-market, Qualität und Stückzahlen wäre nicht ausreichend, da davon auszugehen ist, dass die einzelnen Faktoren in starker gegenseitiger Wechselwirkung stehen (vgl. Bild 2). Eine mögliche Vorgehensweise zur Abbildung und Berücksichtigung der Beziehungen wird weiterhin untersucht. Über die gesamte Produktstruktur hinweg kann eine reine Aggregation der einzelnen Faktoren bereits erste Aussagen über die Anlauffähigkeit liefern. Dabei kann der Stand der Entwicklung zu verschiedenen Zeitpunkten über das Risikopotential und die Tragweite aufgetragen werden. Im Rahmen einer Trendanalyse kann anschließend die Anlauffähigkeit über Flächenberechnungen ausgedrückt werden. Je kleiner die eingeschlossene Fläche unter der Kurve ist, desto eher kann mit einem effizienten Serienanlauf in der Produktion gerechnet werden. Ein genauer Vergleich und eine detaillierte Untersuchung der maximalen Werte muss im Vorfeld analysiert werden. Bei der Entwicklung komplexer Produkte kann so bereits eine langfristige Optimierung und Absicherung kritischer Bauteile erfolgen.

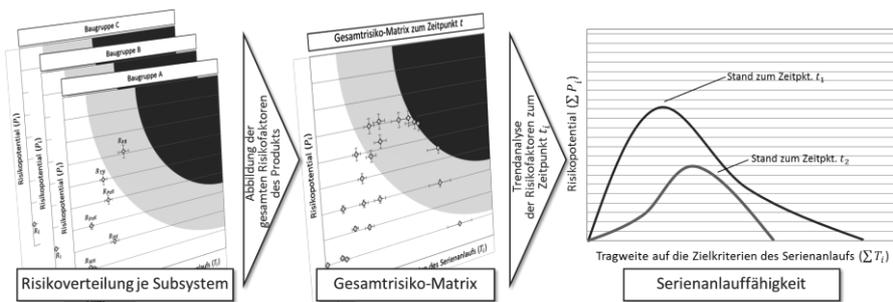


Bild 7: Beispielhafte Darstellung der Bewertung der Serienanlauffähigkeit

### 3.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Bewertung soll als Entscheidungsgrundlage für Handlungsstrategien zur Reduzierung der verschiedenen identifizierten Risiken dienen. Dabei können je nach Einflussfaktor verschiedene Ansätze einen entscheidenden Beitrag zur Risikominimierung leisten. Generell gilt die Aussage, je kleiner die Veränderungen zum Vorgängerprodukt ausfallen, mit desto geringeren Abweichungen bei der Transformation der Entwicklungsergebnisse in die Produktion ist zu rechnen [22]. Allerdings ist in der Flugzeugindustrie aufgrund der langen Lebenszyklen bei einem Nachfolgerprodukt mit großen Technologiesprüngen zu rechnen. Präventive Maßnahmen gegen Risiken innerhalb des Reifegrads sollten gerade für Kerntechnologien des Unternehmens stark ausgebaut werden. Dazu zählen ein verstärkter Einsatz von Prototypen, Testszenarien und parallel dazu eine digitale Absicherung der Komponenten [20]. Je geringer der Reifegrad, desto größer sollte der Umfang einer Prototypenserie ausfallen. Ein bekanntes Beispiel ist der Einsatz von Kohlefaser in der Rumpfstruktur eines Flugzeugs. Das Material ist bereits über mehrere Jahre im Einsatz, verursacht aber dennoch Probleme bei der kompletten Substitution von Baugruppen aus anderen Materialien [13]. Identifizierte Probleme im Bereich des Innovations- und Komplexitätsgrads können mit Hilfe von Produktstrukturierungsmaßnahmen, wie z.B. der Modularisierung oder der Plattformentwicklung, begegnet werden. Dabei unterstützt die Erhöhung des Übernahmanteils und die Standardisierung der Schnittstellen die Reduzierung möglicher Risikotreiber. Für genaue Handlungsempfehlungen müssen die bestehenden Produktstrukturen des Vorgängerprodukts als Ausgangspunkt herangezogen werden. Dies ist die Basis für eine gezielte Szenariobetrachtung. Nur so können, neben qualitativen Abschätzungen, auch quantitative Aussagen für bevorstehende Serienanläufe gemacht werden.

---

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt die Notwendigkeit einer frühen Berücksichtigung der Serienanlaufphase innerhalb der Entwicklung für komplexe Produkte auf. Aktuelle Entwicklungsprojekte in der Flugzeugindustrie und empirische Studien aus anderen Industrien bekräftigen die Tatsache, dass der Serienanlauf als kritische Phase im Lebenszyklus innovativer und komplexer Produkte betrachtet werden kann. Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung einer Methodik zur frühzeitigen Identifizierung und Minimierung von Anlauftrisiken. Dazu soll, ausgehend von den Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf den Serienanlauf, eine Risikobewertung durchgeführt werden. Durch die so erzeugte Transparenz können bereits vor der eigentlichen Fertigung mögliche Probleme identifiziert und Reaktionsstrategien für eventuell auftretende Zielabweichungen zur Verfügung gestellt werden. Die Handlungsstrategien bilden die Einganggröße für einen effizienten Transfer der Entwicklungsergebnisse in die Produktion. Für die weitere Entwicklung des Ansatzes soll eine Validierung am praktischen Beispiel erfolgen. Zudem muss eine weitergehende Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der Risikofaktoren und deren Abbildung für eine ganzheitliche Bewertung der Serienanlauffähigkeit des Produkts untersucht werden. Des Weiteren müssen die Handlungsempfehlungen, basierend auf Heuristiken, für verschiedene Risikoszenarien konkretisiert werden.

### Literatur

- [1] Carrillo, J. E.;Franza, R. M.: "Investing in product development and production capabilities: The crucial linkage between time-to-market and ramp-up time", in *European Journal of Operational Research*, vol. 171, no. 2, 2006, S. 536–556.
- [2] Fitzek, D.: "Anlaufmanagement in Netzwerken", St. Gallen, 2005.
- [3] Wangenheim, S.: "Planung und Steuerung des Serienanlaufs komplexer Produkte", Stuttgart, 1998.
- [4] Risse, J.: "Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie: Ein Gestaltungsrahmen für ein logistikorientiertes Anlaufmanagement", Berlin, 2002.
- [5] Almgren, H.: "Pilot production and manufacturing start-up: The case of Volvo S80", in *Int. J. of Production Research*, vol. 38, no. 17, 2000, S. 4577–4588.
- [6] Terwiesch, C.; Bohn, R.; Chea, K.: "International product transfer and production ramp-up: a case study from the data storage industry", in *R&D Management*, vol. 31, no. 4, 2001, S. 435–451.

- 
- [7] Coughlan, P.D.: "Engineering Change and Manufacturing Engineering Deployment in New Product Development", in "Integrating design and manufacturing for competitive advantage", 1992, S.157-177.
- [8] Meyer, A. de: "The development/manufacturing interface: empirical analysis of the 1990 European manufacturing futures survey", in Susman, G. I.: "Integrating design and manufacturing for competitive advantage", 1992, S.69-81.
- [9] Tyre, M. J.: "Managing the introduction of new process technology - International differences in a multiplant network", in *Research Policy*, vol. 20, no. 1, 1991, S. 57-76.
- [10] Kuhn, A. et al.: "Fast ramp up: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten", Dortmund, 2002.
- [11] Altfeld, H.-H.: "Commercial aircraft projects: Managing the development of highly complex products", 2010.
- [12] Figger, A.: "Der schwierige Weg bis zum Erstflug", in *Aero International*, Vol. 2009, No. 4, 2009, S. 40-43.
- [13] Gates, D.: "A 'prescient' warning to Boeing on 787 trouble", [http://seattletimes.nwsourc.com/html/sundaybuzz/2014125414\\_sundaybuzz06.html](http://seattletimes.nwsourc.com/html/sundaybuzz/2014125414_sundaybuzz06.html), 05.02.2011.
- [14] Hart-Smith, L. J., "Out-Sourced Profits - The Cornerstone of successful Subcontracting", in Boeing TATE Symposium, St. Louis, 2001.
- [15] Wißler, F. E.: "Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte", Stuttgart, 2006.
- [16] Lindemann, U.: "Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden", Berlin, 2009.
- [17] Krause, D.; Eilmus, S.: "Methodical Support for the Development of Modular Product Families", in "The Future of Design Methodology", London, 2011, S. 35-45.
- [18] Brees, C.: "Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien", Hamburg, 2011.
- [19] Kleinschmidt, E. J.; Cooper, R. G.: "The Impact of Product Innovativeness on Performance", in *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 8, No. 4, 1991, S. 240-251.
- [20] Elstner, S.; Halfmann, N.; Krause, D.: "Systematic ramp-up approach in the early development phase for the assembly of aircraft cabins", in 3rd International Workshop on Aircraft System Technologies – AST, 2011.
- [21] Breiing, A.; Knosala, R.: "Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen", Berlin, 1997.
- [22] Meyer, M.; Utterback, J.: "Product development cycle time and commercial success", in *IEEE Trans. Engineering Management*, vol. 42, no. 4, 1995, S. 297-304.

## Bewertung von Methoden zur Herstellbarkeitsabsicherung von Serienfahrzeugen

Miriam Hesse<sup>1</sup>, Christian Weber<sup>2</sup> und Holger Diestelkamp<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *BMW Group*

<sup>2</sup> *Fachgebiet Konstruktionstechnik, Technische Universität Ilmenau*

Validation of manufacturability is an important task during automobile development in order to reduce the risk of expensive rework and disturbances in the subsequent serial production processes. Due to the advancements in visualization, simulation and Rapid Prototyping technology, the field of application of Virtual and Rapid Prototyping techniques for validation has expanded and many different validation methods have been developed and applied. These methods use virtual and/or physical models to represent product/process properties related to manufacturability. This paper introduces a procedure to assess quality of validation methods by analyzing manufacturability problems detected by these methods and in (pre-)series production processes.

### 1 Einleitung

Die Absicherung als Teil des Produktentwicklungsprozesses liefert einerseits eine Aussage über den Entwicklungsstand eines Produktes, andererseits dienen die gewonnenen Erkenntnisse als Basis für weitere Entwicklungsschritte. Speziell bei der Entwicklung von komplexen Produkten wie Kraftfahrzeugen ist die Sicherstellung von Produktfunktionen und -eigenschaften unverzichtbar. In der automobilen Serienentwicklung spielt zudem die Absicherung der Herstellbarkeit eine wichtige Rolle, da hier meist große Stückzahlen in einem komplexen Produktionssystem gefertigt werden. Störungen und Verzögerungen im Produktionsanlauf sind kostenintensiv, weshalb die Herstellbarkeit

---

aufwändig abgesichert wird. Auch soll so das Risiko späterer Produkt-, Prozess- oder Werkzeugänderungen verringert und eine steile Produktionshochlaufkurve ohne teure Nacharbeitslösungen ermöglicht werden. Da der Fertigungsprozess – besonders bei komplexen Produkten – stark durch die Produktgestaltung beeinflusst wird, ist dieser bereits während der Produktentwicklung zu berücksichtigen (s. unter anderem die Ansätze des Design for Manufacturing [1], Design for Assembly [2]) und abzusichern.

Durch die Entwicklung der Darstellungs- und Simulationsmöglichkeiten der virtuellen Welt werden die Einsatzmöglichkeiten und die Qualität der Virtual Engineering-Methoden in den Unternehmen immer weiter verbessert. Eine in der Automobilindustrie verbreitete Vorgehensweise zur Prüfung der Herstellbarkeit, der Prototypen-Fahrzeugaufbau, wird zunehmend durch den Einsatz von Virtual und Rapid Prototyping-Methoden ergänzt oder abgelöst. Mithilfe dieser Technologien sind Unternehmen in der Lage, kostengünstiger und schneller als bisher Produkt- und Prozess-Modelle für Absicherungszwecke zu erstellen [3]. Die Literatur beschäftigt sich umfassend mit diesem Wandel und diskutiert den Einsatz dieser alternativen Prototypen. Dieser Beitrag stellt nun ein Vorgehen vor, die Aussagequalität von Absicherungsmethoden in Bezug auf Herstellbarkeit einzuschätzen, um Hinweise auf eine effiziente Anwendung der Methoden geben zu können.

## 2 Herstellbarkeitsabsicherung

Ziel einer (Herstellbarkeits-) Absicherungsmaßnahme ist die Bestätigung der Umsetzbarkeit einer Konstruktion bzw. der Identifikation von Problemen hinsichtlich effizienter Herstellbarkeit. Ein Problem kann als Abweichung zwischen dem Ist- und einem Sollzustand definiert werden [4]. In diesem Beitrag soll ein Problem im Kontext der automobilen Serienfertigung als Folge einer Unstimmigkeit zwischen Produkt und Produktionssystem verstanden werden, die den Soll-Zustand, also die störungsfreie Fertigung eines fehlerlosen Produktes, verhindert oder erschwert.

Die Absicherung der Herstellbarkeit eines Produktes umfasst zahlreiche Methoden, die auf verschiedenen Technologien basieren und unterschiedliche Umfänge bzw. Objekte (z.B. das gesamte Produkt, einzelne Module oder Bauteile oder den Prozess) bewerten. Das Absicherungsobjekt wird bei Durchführung der Absicherungsmaßnahme durch ein virtuelles oder physisches Modell dargestellt, anhand dessen verschiedene Produkt- und/oder Prozesseigenschaften abgesichert werden. So werden unter anderem die Zugänglichkeit von Montagepositionen durch den Produktionsmitarbeiter, die Fehlerfreiheit der Montagereihenfolge und die Fehlhandlungssicherheit geprüft. Abbildung 1

zeigt eine schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Modell des Absicherungsobjektes und den dadurch dargestellten Eigenschaften. Durch die Bestimmung der Design-Parameter des Absicherungsmodells werden indirekt auch dessen Eigenschaften definiert.

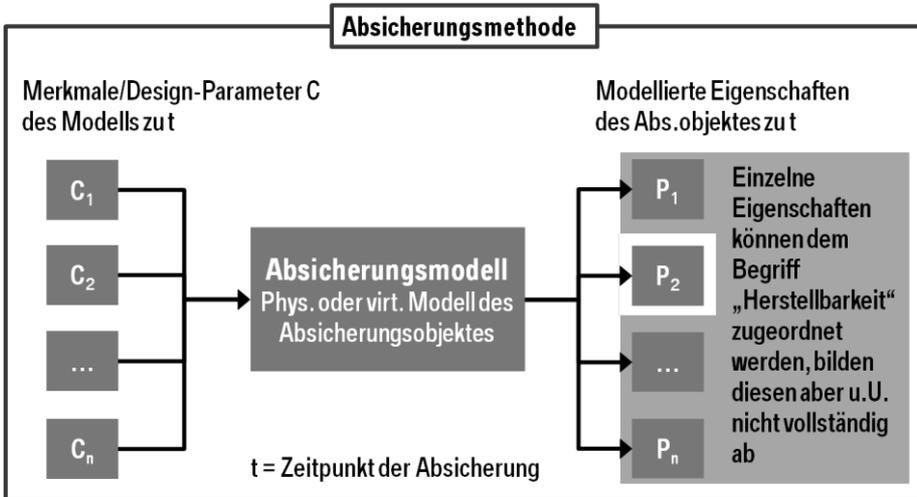


Abbildung 1: Das Modell des Absicherungsobjektes ist Träger von Eigenschaften, die bewertet werden können (eigene Darstellung in Anlehnung an [5])

Eine Auswahl an Eigenschaften des Produktes/Prozesses, die unter dem Begriff „Herstellbarkeit“ zusammengefasst werden können, ist:

- Geometrische Stimmigkeit: Geometrische Unstimmigkeiten im Produkt können dessen Herstellbarkeit in Frage stellen. In diese Kategorie fallen unter anderem Bauteilkollisionen oder -fehlstellungen in Konstruktionslage.
- Montagereihenfolge: Bei der Bewertung der Montagereihenfolge sind sowohl Produkt als auch der Montageprozess Absicherungsobjekt.
- Verbaubarkeit: Diese Eigenschaft beschreibt sowohl die kollisionsfreie Montage der Bauteile als auch das problemlose Einbringen von Werkzeugen und Hilfsmitteln. Außerdem werden Fragestellungen wie z.B. die Bewertung von Fügekräften betrachtet.

- 
- Fehlhandlungssicherheit: Eine weitere Eigenschaft bei der Bewertung der Herstellbarkeit ist die Einschätzung der Fehlhandlungssicherheit. Dabei ist die Zusatzinformation des Produktions-/Montageumfelds unverzichtbar. Dies gilt vor allem in Fertigungssituationen, in denen verschiedene Varianten auf einer Produktionslinie/an einem Bandabschnitt montiert werden. Es muss sichergestellt sein, dass der Montagemitarbeiter
    - die richtigen Bauteile (eventuell sind verschiedene Varianten eines Bauteils zum Verbau bereitgestellt)
    - in der vorgegebenen Reihenfolge, Position und Lage
    - mit den richtigen Werkzeugen

verbauen kann und dabei das Risiko einer Fehlhandlung bzw. Verwechslung möglichst gering ist.

- Ergonomie: Bei der Bewertung der Ergonomie während der Montage ist die Verbausituation zu analysieren (Körperhaltung des Montagemitarbeiters etc.). Auch die zu verbauenden Teile sind zu betrachten (Scharfkantigkeit, Gewicht etc.).
- Erscheinungsbild und Anmutung: (Optische) Unstimmigkeiten, die zwar nicht die Herstellbarkeit des Produktes beeinflussen, aber den Kundennutzen senken und auf die Abstimmung zwischen Produkt und Produktionsprozess zurückzuführen sind, werden dieser Kategorie zugeordnet.

Für die Herstellbarkeitsabsicherung sind Modelle zu wählen, die die abzusi-chernden Eigenschaften möglichst gut darstellen.

## 2.1 Klassifizierung von Methoden der Herstellbarkeitsabsicherung

In der Automobilindustrie werden verschiedene Methoden zu Herstellbarkeitsabsicherung eingesetzt. Diese können unter anderem nach Modell des Absicherungsobjektes unterschieden werden, welches physisch oder virtuell vorliegen kann und – so gut es zum jeweiligen Zeitpunkt möglich ist – möglichst alle Eigenschaften des Serienfahrzeugs zum Produktionsstart widerspiegeln soll. Einige Absicherungsmethoden bedienen sich auch einer Kombination von physischen und virtuellen Modellen.

Eine weitere Unterscheidung der Absicherungsmethoden kann über den Kreis der durchführenden Personen und die Absicherungsziele getroffen wer-

den: Für die Bewertung mancher Fragestellungen ist (Erfahrungs-) Wissen aus unterschiedlichen Bereichen des Unternehmens notwendig. Die Bewertung des Absicherungsobjektes wird hier nicht durch einen Einzelnen, sondern durch eine Gruppe von Experten durchgeführt. Die Absicherungsziele der einzelnen Methoden sind vielfältig und lassen sich einerseits durch den geforderten Detaillierungsgrad (Anzahl der betrachteten Produkt-/Prozesseigenschaften) und andererseits durch die Art der zu bewertenden Eigenschaften beschreiben.

Im Folgenden sollen einigen Methoden mit virtuellen und physischen Modellen von Absicherungsobjekten vorgestellt werden.

## 2.2 Absicherungsmethoden mit virtuellen Modellen

Zu den Absicherungsmethoden mit virtuellen Modellen werden alle Methoden gezählt, deren Absicherungsobjekt während der Bewertung nicht durch ein Modell in physischer Form repräsentiert ist. Diese Methoden werden in der Literatur auch unter dem Begriff Virtual Prototyping diskutiert [6]. Dazu zählen demnach sowohl die Bewertung der CAD<sup>1</sup>-Daten des Produktes als auch die Bewertung von immersiven Visualisierungen des Produktes.

Tabelle 1: Beispiele von Absicherungsmethoden

<b>Absicherungsmethode</b>	<b>Durchführende Personen</b>	<b>Absicherungsziele und Nebenziele</b>
Bewertung des CAD-Modells	Einzelperson	Sicherstellung d. Tauglichkeit Konzeptes; Prüfung der Geometrie (in der Regel in Einbaulage)
Engineering Design Review	Gruppe	Konzeptüberprüfung, Projektsynchronisation/Abstimmthemen
Montagesimulation	Einzelperson	u.a. Sicherstellung Ergonomie, Reihenfolge, Austattung, Zugänglichkeit, Einbaupfadberechnung
Toleranzanalyse	Einzelperson	Berechnung von Toleranzketten
FEM-Simulation	Einzelperson	Berechnung von Kräften, Verformungen, Spannungen

<sup>1</sup> Computer-aided Design (CAD).

---

Tabelle 1 zeigt Beispiele verschiedener Typen von Absicherungsmethoden. Die erste Methode ist die Bewertung des CAD-Modells, im Wesentlichen also der Soll-Geometrie des Produktes (in Einbaulage). Geometrische Unstimmigkeiten können so detektiert werden. Sind weitere Parameter wie Werkstoffdaten bekannt, so kann der Bewertende u.U. aufgrund seiner Erfahrung auch weitere Aussagen, z.B. über das Verformungsverhalten bei Krafteinwirkung treffen.

Engineering Design Review ist eine Methode, die die Kommunikation zwischen den verschiedenen Anspruchsgruppen und Schnittstellenpartnern fördert. Durch die Bewertung in einer Gruppe von Experten aus verschiedenen Bereichen ist nicht nur eine umfassende Sicht auf das Absicherungsobjekt und damit die ausgewogene Beurteilung mehrerer verschiedener Eigenschaften möglich, es bietet sich auch die Möglichkeit des Austauschs und der Synchronisation von Information zwischen den Beteiligten [7].

Eine Ergänzung der Bewertung des CAD-Modells bieten Simulationen von Material- bzw. Bauteileigenschaften und des Prozesses. Hierzu zählen unter anderem Montagesimulationen, Einbaupfadberechnungen und FEM-Simulationen (Finite Elemente Methode).

### 2.3 Absicherungsmethoden mit physischen Modellen

Der Bau physischer Prototypen ist nach wie vor eine wichtige Quelle von Erkenntnissen. Die Übereinstimmung der dabei dargestellten Produkt- und Prozesseigenschaften mit den Eigenschaften des Serienfahrzeugbaus kann sehr hoch sein. Daher wird in diesem Beitrag der Fahrzeugbau mit seriennahen Bauteilen u. Prozessen als Vergleich herangezogen; andere Absicherungsmethoden werden im Folgenden als „alternativ“ bezeichnet. Zu den alternativen Absicherungsmethoden zählen hier neben den Methoden mit virtuellen Objekten auch die Aufbauten von physischen Prototypen mit Ersatzmaterialien und/oder mit Prozessen, die nicht denen der Serie entsprechen.

Durch die Entwicklung der werkzeuglosen Fertigungsverfahren ist es möglich, verschiedene Werkstoffe in wenigen Stunden und ohne die Notwendigkeit eines kostspieligen, spezifischen Werkzeugs zu fertigen. Diese Verfahren können nach Art der Formgebung unterschieden werden [6]: Materialabtrag, Materialauftrag (Rapid Prototyping) und hybride Verfahren. Da die Werkstoffe der so erzeugten Bauteile in der Regel nicht den Serienmaterialien entsprechen, sind bei ihrem Einsatz für die Absicherung gewisse Einschränkungen zu

beachten. Beispielsweise entsprechen Verformungs- und Oberflächeneigenschaften unter Umständen nicht den Eigenschaften des Serienproduktes.

### 3 Bewertung von Absicherungsmethoden

Die Bewertung der Absicherungsmethoden soll Aufschluss über die Aussagequalität, Potentiale und Schwächen der Absicherungsmethoden liefern. Diese können im Anschluss den Kosten und der Absicherungsdauer gegenüber gestellt werden, um durch die so geschaffene Transparenz einen noch effizienteren Einsatz der Methoden zu ermöglichen.

Das übergeordnete Ziel der Entwicklungs- und Absicherungsprozesse ist die Sicherstellung des problemfreien Zusammenwirkens des Produktes mit dem (Serien-)Produktionssystem. Je besser eine Absicherungsmethode bzw. ein Absicherungsmodell die Eigenschaften des Produktes und des Produktionssystems zu Produktionsstart (Start of Production, SOP) darstellt, desto aussagefähiger ist das Absicherungsergebnis. Es ist daher wichtig, die richtige Methode/das richtige Absicherungsmodell für eine Absicherungsmaßnahme auszuwählen. In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang skizziert.

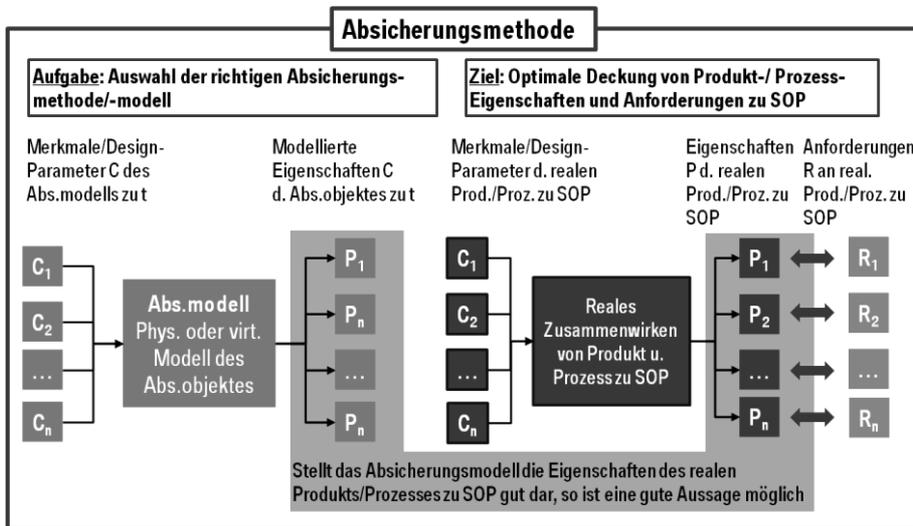


Abbildung 2: Die Aussagequalität der Absicherungsmethoden steigt mit der Darstellungsqualität der Eigenschaften des realen Produktes/Prozesses zu SOP (eigene Darstellung in Anlehnung an [5])

---

Die Aussagequalität (Menge dargestellter Eigenschaften und Aussagegüte) hängt von dem gewählten Absicherungsmodell ab, das das Absicherungsobjekt repräsentiert. Beispielsweise liefert der Bau eines seriennahen Prototypen mit Bauteilen aus Serienwerkzeugen in der Regel präzisere und verlässlichere Aussagen über das Verhalten des Produktes während des Fertigungsprozesses als ein System-Prototyp aus Ersatzmaterialien. In der Literatur werden verschiedenen Arten von Mock-ups bzw. Produktaufbauten zu Absicherungszwecken vorgestellt [u.a. 3]. Werden Prototypen in seriennahen Prozessen und in größerer Anzahl aufgebaut, können Probleme relativ einfach und mit hoher Sicherheit erkannt und ihre Ursache untersucht werden.

Auch der Absicherungszeitpunkt spielt eine wichtige Rolle bei der Auswahl der geeigneten Methode. In den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses sind oftmals noch nicht alle Merkmale (Designparameter) des Produktes/Prozesses definiert bzw. es besteht noch eine sehr hohe Änderungswahrscheinlichkeit. Daher werden in diesen Phasen Konzepte bewertet, die nicht notwendigerweise einen hohen Detaillierungsgrad besitzen. Diese könnten anhand von Modellen bewertet werden, die nur einige ausgewählte Eigenschaften darstellen. Im Laufe des Entwicklungsprozesses gewinnen sowohl das Absicherungsobjekt als auch die zu prüfenden Eigenschaften an Detaillierungstiefe.

Im Kern spiegelt dies die bereits in [5] theoretisch dargestellten Verhältnisse zu Fragen des Reifegrades wider. Der Autor stellt im Kontext der Produktreifegradbestimmung einen zu einer Bewertungsmethode gehörenden Konfidenzfaktor vor ( $\epsilon_j$ , confidence factor of determining property  $j$  ( $0 \leq \epsilon_j \leq 1$ )), der die Gewissheit des Ergebnisses einer (Absicherungs-)Methode beschreibt und im Grunde dem hier beschriebenen Methodenattribut „Aussagequalität“ gleichkommt. Mithilfe des hier vorgestellten Vorgehens kann dieser Konfidenzfaktor empirisch bestimmt werden.

### 3.1 Vorgehen zur Methodenbewertung

Eine Methode wird als ein planmäßiges Vorgehen zur Erreichung eines bestimmten Ziels bzw. ein Vorgehensprinzip zur Lösung von Aufgaben verstanden [8]. Die Bewertung einer Methode kann damit über das Erreichen des Methodenziels und über die eingesetzten Ressourcen erfolgen. Eine Absicherungsmethode hat im Kontext dieses Beitrags das Ziel, eine bestimmte Funktion oder Eigenschaft des Produktes bzw. des Produktionsprozesses zu prüfen und Probleme zu identifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit geht es um solche Eigenschaften, die in ihrer Gesamtheit die zusammengesetzte Eigenschaft „Herstellbarkeit“ beschreiben. Das Ziel einer Absicherungsmethode ist somit

---

ideal erreicht, wenn durch diese alle im Zusammenhang mit der Herstellbarkeit stehenden Probleme detektiert werden. Für den Realfall lässt sich daraus ableiten: Je höher die Zahl der entdeckten im Vergleich zu den unentdeckten Problemen liegt, desto aussagefähiger sind die Ergebnisse der Methode.

Die Schwierigkeit liegt nun in der Bestimmung dieses Prozentsatzes. Hierfür wird folgender Ansatz gewählt: Die durch die vorgelagerten (alternativen) Absicherungsmethoden unentdeckten Probleme werden in der Regel spätestens während des Baus der ersten Fahrzeuge unter seriennahen Bedingungen detektiert und bis SOP gelöst. Die Zahl der zum Zeitpunkt des ersten Fahrzeugbaus entdeckten Probleme kann daher zur Bewertung der Methoden herangezogen werden.

Das bedeutet: Durch eine

- Untersuchung der durch die eingesetzten Absicherungsmethoden detektierten Probleme in Kombination mit einer
- Analyse der Probleme, die erst bei den ersten unter Serienbedingungen hergestellten Produkten am Ende der Produktentwicklungsphase erkannt werden,

ist es möglich, Rückschlüsse auf die Aussagequalität der einzelnen Absicherungsmethoden zu ziehen. Für die Analyse dieser Probleme sind verschiedene Dimensionen relevant:

- **Zeit** (Entstehungszeitpunkt des Problems):  
Manche Probleme können aufgrund ihres Entstehungszeitpunkts von keiner vorgelagerten Absicherungsmaßnahme detektiert werden und müssen aus der Betrachtung ausgeschlossen werden.
- **Ursprung** (Entstehungsgrund):  
Die Unstimmigkeit zwischen Produkt und Prozess und das daraus resultierende Problem kann verschiedene Ursachen haben. Beispielsweise werden in den Bauphasen vor SOP sehr geringe Stückzahlen von Fahrzeugen aufgebaut; so können Prozesse, die eine gewisse Stückzahl zum Hochlauf erfordern, in gewissen Bereichen den Serienstand noch nicht erreichen. Probleme dieses und ähnlichen Ursprungs werden nicht in die Untersuchung eingeschlossen.

- 
- **Problemtyp** (betroffene Eigenschaft):  
Der Problemtyp beschreibt die Produkt-/Prozesseigenschaft, die beeinträchtigt wird. Über diese ist eine Zuordnung zu den Absicherungsmethoden möglich.
  - **Wirkung** (Auswirkung auf Produkt oder Prozess):  
Die Lösung des Problems kann Änderungen von Produkt und/oder Prozess erfordern. Zudem kann die Schwere/Tragweite der notwendigen Änderung für die Analyse des Problems herangezogen werden.

Nach erfolgter Analyse können die einzelnen Probleme den Absicherungsmethoden zugeordnet werden und es kann daraufhin eine Einschätzung der jeweiligen Aussagequalität getroffen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass das vorgestellte Vorgehen nur Probleme berücksichtigt, die zur ersten Bauphase detektiert werden. Die Unstimmigkeiten, die zwar durch die (alternativen) Absicherungsmethoden unentdeckt bleiben, aber bereits vor dem ersten Fahrzeugbau innerhalb des Entwicklungsprozesses behoben werden, fließen nicht in die Untersuchung ein. Trotzdem lässt das Ergebnis der Untersuchung auf Verbesserungspotentiale des Methodenportfolios und die Aussagequalität der einzelnen Methoden schließen.

### 3.2 Anwendung des Bewertungsvorgehens

Das in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehen zur Bewertung von Absicherungsmethoden wird auf ein reales Fahrzeugentwicklungsprojekt angewendet. Zur Absicherung der Herstellbarkeit wurden hier verschiedene alternative Absicherungsmethoden angewendet, die auf Virtual Reality- und Mixed Reality-Ansätzen oder Prototypen-Bauteilen aus Ersatzmaterialien basieren. Diese ersetzen in diesem Fall den Aufbau physischer Prototypen für die Herstellbarkeitsabsicherung. Für die Bewertung der Absicherungsmethoden werden zunächst die Eigenschaften herausgearbeitet, die durch die betrachteten Methoden abgedeckt werden. Dies ermöglicht die spätere Zuordnung von Problemen in die Wirkungsbereiche der Methoden.

In dem hier betrachteten Fall werden die ersten physischen Produkte in seriennahen Prozessen erst kurz vor Beginn der Vorserie aufgebaut. Die während dieses Fahrzeugbaus auftretenden Probleme werden dokumentiert und analysiert und schließlich den Eigenschaften zugeordnet, die durch die zuvor eingesetzten alternativen Absicherungsmethoden bewertet wurden. Durch eine Analyse der einzelnen Probleme ist zudem festzustellen, ob eine Entdeckung des Problems durch die Absicherungsmaßnahmen überhaupt möglich gewesen wäre (Entstehungszeitpunkt des Problems etc.). Basierend auf die-

---

ser Analyse und der Zuordnung der Probleme in die Methodenwirkbereiche (abzusichernde Eigenschaften) kann die Zahl der durch die einzelnen Methoden unentdeckten Probleme bestimmt werden. Ist diese Zahl für eine Methode gering und die Anzahl der durch die Methode selbst detektierten Probleme hoch, dann kann eine hohe Aussagekraft der Methode angenommen werden. Andernfalls geben die unentdeckten Probleme Aufschluss auf Verbesserungspotentiale der Methode.

Das Ergebnis der Bewertung ist nun zum Einen eine Aussage über die Aussagequalität der betrachteten Absicherungsmethoden und zum Anderen ein Hinweis auf deren Stärken und mögliche Verbesserungspotentiale. Die Bewertung ist sehr zeitaufwändig, da die zu untersuchende Problem- und Ergebnisdokumentation unter Umständen sehr umfangreich ist. Trotzdem ist eine Bewertung der Absicherungsmethoden sinnvoll, da sie Ergebnisse liefert, die eine Basis für die Weiterentwicklung des Methodenportfolios bilden. Stellt man die Bewertungsergebnisse den zur Absicherung verwendeten Ressourcen gegenüber, können Aussagen über die Methodeneffizienz abgeleitet werden, die als Grundlage für die Planung der Herstellbarkeitsabsicherung zukünftiger Fahrzeugprojekte dienen können.

#### 4 Zusammenfassung

Es wurde ein mögliches Vorgehen vorgestellt, um alternative Absicherungsmethoden hinsichtlich ihrer Aussagequalität bezüglich der Eigenschaft „Herstellbarkeit“ eines Produktes zu bewerten. Dabei werden Absicherungsmethoden über die den Methoden zugrunde liegenden Modelle mit den im nachgelagerten, seriennahen Fahrzeugbau detektierten Problemen verknüpft. In Kombination mit den durch die einzelnen Absicherungsmethoden selbst detektierten Problemen wird als Ergebnis des vorgestellten Untersuchungsvorgehens eine Einordnung der Absicherungsmethoden entsprechend ihrer jeweiligen Aussagefähigkeit ermöglicht.

Eine Untersuchung wie die hier vorgestellte kann nur in der Industriepraxis durchgeführt werden, weil es nur hier nach der Entwicklungsphase einen Serienbau gibt, in dem die vorgeschlagenen Messparameter (Anzahl der unter seriennahen Bedingungen auftretenden Probleme) bestimmt werden können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben aber auch eine wissenschaftliche Relevanz, indem sie helfen können, die Aussagefähigkeit eines bestimmten Methodenportfolios vorherzubestimmen.

---

## Literatur

- [1] Stoll, H. W.: "Design for manufacture: An Overview", *Appl. Mech. Rev.*, 1986, 39, pp. 1356-1364.
- [2] Andreasen, M. M. et al.: "Design for assembly", Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [3] Müller, M.: "Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie", Universität d. Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik, Saarbrücken, 2008.
- [4] Haberfellner, R.; Nagel, P.; Becker, M.; Büchel, A.; von Massow, H.: "Systems engineering", 8., verb. Aufl.; Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 1994.
- [5] Weber, C.: "Looking at "DFX" and "Product Maturity" from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes". In: Krause, F.-L. (ed.), *Proceedings of the 17th CIRP Design Conference, The Future of Product Development*, pp. 85-104. Springer, Berlin-Heidelberg, 2007.
- [6] Zorriassatine, F.; Wykes, C.; Parkin, R.; Gindy, N.: "A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, 217(4), pp. 513-530.
- [7] Huet, G.; Culley, S. J.; McMahon, C.; Fortin, C.: "Making sense of engineering design review activities", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, June 2007, 21(3), pp. 243-266.
- [8] Ehrlenspiel, K.: "Integrierte Produktentwicklung - Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion", Hanser-Verlag, München, 1995.

## Is what you see really what you get?

- Case study of virtual prototyping in designing the production process

Ilse Becker<sup>1,2</sup> and Ville Toivonen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Valmet Automotive*

<sup>2</sup> *Department of Production Engineering, Tampere University of Technology*

This case study was conducted in a car manufacturing company where they used an immersive virtual reality system when designing the production process for a brand new car model. The process was designed simultaneously with the product development. The study is based on a user interview after the process was implemented in reality. Results consider the biggest gaps between working in a virtual environment and with physical models. Also some general thoughts of virtual reality system requirements are presented.

### 1 Introduction

This paper presents the results of using immersive virtual reality (VR) in prototyping a new car to the production in order to design its assembly process. The process was designed simultaneously with the product development. The product design was done in a newly founded company located in the US whereas the manufacturing company was very experienced and located in northern Europe. The target was to frontload the project as much as possible to reach the time to market quickly enough. Simultaneous engineering was the core function in realising this target. The geographic locations and difference in time made this a challenging issue. This study shows the

manufacturing company's point of view. Figure 1 shows how the whole process worked in designing the product simultaneously with the assembly.

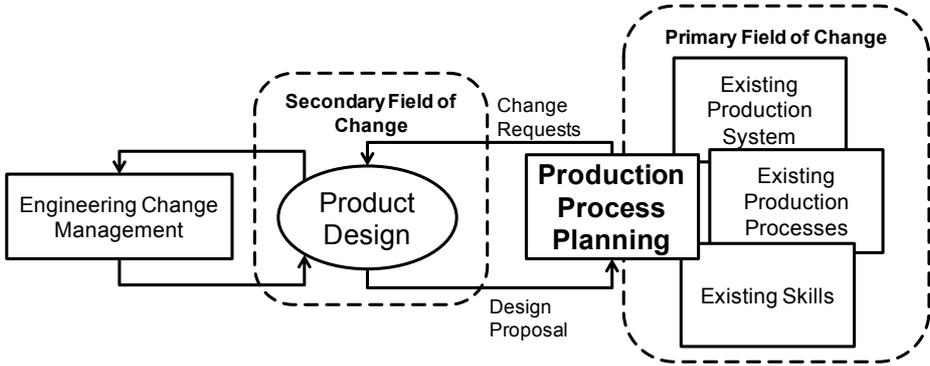


Figure 1: The SE teams propose their ideas to the product design when planning the assembly sequence within the line stations. This is an ongoing discussion until the final design is ready

### 1.1 Valmet Automotive – Case Company

The case company is located in the southwestern part of Finland. It has been manufacturing cars for over 40 years for traditional OEMs (Original Equipment Manufacturer). In the beginning of the 21st century the company's strategy was expanded from contract manufacturing to service providing. This meant among other changes that its manufacturing role was expanded more towards simultaneous engineering by designing the production process at the same time as the product is being designed and in collaboration with the OEM. Traditionally, very soon after the concept phase, physical prototypes are built to get an impression of the product and its manufacturability. In 2008 the company made an agreement with its first customer of the new era. The partners agreed that the car should be developed simultaneously with the production. Time to market pressure existed and led to a situation in which the production process had to be designed by virtual prototyping. That is why the case company decided to test its first immersive virtual build system to design the assembly process. In addition, they decided to conduct a pre-study to find out, what are the advantages of virtual build for them, and what properties are needed in the system in this context. By using the immersive virtual reality system in the production process design, the cooperation partners wanted to get as near the DfM (Design for Manufacturing) and DfA (Design for Assembly) targets as possible. This kind of early design can be compared to making movies, as illustrated by the filmmaker Howard Hawks's comment

---

in the Chicago Tribune interview: "The one thing I've learned about making movies is that you can't fix a film once the shooting begins. If it's not right in the script, the problems are only bigger as the images move from paper to the big screen." [1].

## 1.2 Simultaneous engineering teams in the case company

There were four simultaneous engineering teams in the assembly department in this project's organisation. The teams were based on the module structure of the vehicle: powertrain and chassis, interior and HVAC (heating, ventilation and air conditioning), exterior and closures, electric and info&control. Each team had members from different departments in the case company: change management, process planning, assembly teams, production technology, internal quality, supplier quality, logistics, purchasing.

Most active participants in the virtual build sessions where the production process was planned came from the first four departments. Also the quality departments were represented but not so actively. That is why the interviewees in this study were chosen from those active departments. The questionnaire was sent to 30 persons, 10 of which gave their answers by email. Three from the eight persons were process planning and assembly team members from the assembly department, four were change management engineers and two were production technology engineers. One answer was got from an internal quality engineer but he answered only one question. The responsibilities in their team roles were the following:

Process Planning was responsible for planning the assembly process and they had to take into account the parallel production of another car model manufactured on the same production line. They also had to inform the construction about their requirements and to take the construction into account when planning a capable manufacturing process

The production team leader was responsible for telling the production's requirements to the construction and planning the production line balancing together with the process planning, from the realiser's point of view. They also supported in solving the problems concerning the assembly as well as taught the manufacturing staff in their own area

Change Management was responsible for acquiring the knowledge of all the product data and specifications which were created in the product development company as well as engineering changes. They had to inform the other team members about issues when it concerned the planning of the

---

production as well as to prepare the MBOM (Manufacturing Bill of Materials) out of EBOM (Engineering Bill of Materials).

Production Technology was responsible for informing the team about the requirements and possibilities of the manufacturing equipment and prepare the alternative calculations of them if needed.



Figure 2: SE Team with moderating consultant in planning the assembly sequence virtually

## 2 Research in virtual prototyping when planning the production process

The case company benchmarked three different virtual reality systems during the production design process. The interview study in this paper is based on the usage of the company's first VR system which was rented for half a year. The benchmark study is presented in another paper by the authors [2]. Different kinds of systems were found with various features. Regarding the assembly, some system features were essential for virtual prototyping. Product design on the contrary needed other features. Although common for both of them was the collision detection feature. No literature about similar cases was found where the target was to design the whole assembly process sequence of a brand new vehicle designed by a brand new company collaborating for the first time in a tight schedule. The virtual system technologies have been developed a lot in the past ten years and the starting point for today's research is different than it was in the millenium's change.

Dewar et al. [3] (1997) have been researching an assembly planning system which uses virtual reality. They said that there are two major tasks which the virtual assembly tool has to capture, the assembly sequence and the

---

method of joining components together. They found out that the lack of force feedback when the objects collide as well as the relative accuracy of affordable tracking systems and imperfect depth perception are obstacles that occur when using virtual reality for assembly planning.

Jayram et al. [4] (2007) have been researching virtual assembly with a tool developed by them called VADE (Virtual Assembly Design Environment). In their case study of assembling the fifth wheel to a truck chassis, the downstream value to ergonomics was evaluated. However, their study focused on individual subassemblies.

Bullinger et al. [5] have been studying virtual assembly together with concurrent engineering developing "right first time" -methods like virtual assembly planning and ergonomic prototyping. In their method Virtual ANTHROPOS – a virtual model of a person – was applied. Also assembly sequencing was part of their research (2000).

Volkswagen has been using virtual reality in their company for quite a long time, since 1994 [6]. The software and hardware possibilities were much more limited at that time. The term VRAD (Virtual Reality Aided Design) is used in Volkswagen. The scope in virtual product design differs from the scope in designing a virtual assembly production process. In order to produce cars of top quality, the production process needs to be designed simultaneously with the product so that the product engineering design receives feedback from the production engineers and their requirements, thus resulting into an optimal process designed and implemented.

Simultaneous engineering and virtual assembly process have been developed and tested with good results for instance in a rock crusher manufacturing company [7]. Even though engineering design and production departments involved in simultaneous engineering were from the same company, the virtual assembly sessions were facilitated by a sub-contractor. Utilization of VR improves communication and collaboration between engineering design and production. It also enables better human requirements management, better safety and ergonomics, cost effective verification and documentation process, and increased productivity. The process included data conversions from CAD to VR, but the biggest bottleneck was the lack of a common PDM. Especially feedback, such as deviations, from reviews should be attached within the model and transferred back to PDM.

---

In the traditional automotive industry simultaneous engineering and collaborative design is not a new phenomenon. E.g. Toyota is one of the most famous companies who has made use of this practice to a great extent [8].

Also many other traditional automotive companies are using simultaneous engineering in this manner. But when it comes to automotive companies who are cooperating for the first time, with no previous common history, the situation is more complicated.

Ye et al. [9] have compared the assembly planning in three different environments (1999), traditional engineering environment, virtual nonimmersive CAD environment and immersive virtual environment. The results revealed advantages of the two VR environments over the traditional engineering environment in improving the subjects' overall assembly planning performance and in minimizing the handling difficulty, excessive reorientation, and dissimilarity of assembly operations. They have noticed the same facts as the case company of this study: Many factors must be considered in assembly planning. For example, production engineers must examine the geometric design of an assembly to ensure a feasible assembly sequence that does not induce part collisions and part trappings. Production engineers also need to look into other factors such as the reorientation, directionality, stability, manipulability, and parallelism of assembly operations, as well as the complexity of tools and fixtures. The study itself was very detailed in defining the assembly sequence for an air cylinder which consisted of 34 parts. Zhenyu et al. [10] have studied recording and edition of assembly sequence and assembly path. Recording was also used in the case company in difficult assemblies.

Today it is widely understood that if the product is already in the early development stage designed simultaneously for manufacturing process, it will save costs as well as in manufacturing time, one reason for that being that the possible needs for changes occur earlier. Eg. Fricke et al. [11] write about front-loading of the changes in a product development project as well as "Rule of 10" that also many other authors recommend. This rule means that if a change in a later phase is ten times more expensive than a change in the previous phase you can have ten times more changes in an earlier phase at the same cost. Choi et al. [12] have studied virtual assembly tools for improving product design. They say that a successful implementation of DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) requires cultural changes which lead to better communication among all levels of the organisation, promotion of team spirit, and an integrated involvement in product and process design. In our case this was even more demanding because the product and process design done in separate companies.

---

### 3 The Case study

The starting point and hypothesis in this study was that VR as a tool is a necessity in the projects of the new era. The aim was to find out, how well a production process design succeeded in real life when it was planned virtually.

The study itself was based on a real situation where the assembly process was designed virtually before any physical parts were available. In earlier projects the case company had always had a physical prototype car with which they did the sequence planning. Now they did the similar planning with immersive virtual reality system.

One experienced process planning engineer made the first draft of the assembly sequence. This proposal was then reviewed together with the assembly teams. The planned sequence had to fit the present manufacturing line where there already was another car model in production. Figure 3 presents the basic idea of the production line with the assembly stations. Also the sub-assemblies like the instrument panel and doors and their sequences were designed in the same way.

One interview was conducted among the participants in virtual build during the benchmark study. That was done in the early stage when they had not yet experienced the effects in the real production. Nine participants were interviewed by using a questionnaire. The participants were mostly experienced team leaders from the general assembly. During the new project they had learned to use CAD in analyzing the product subassemblies. Previously they worked mainly with the physical parts. In the interview they were asked what was their opinion of analysing assembly issues with the VR tool was when compared to 3D CAD, and how effective the VR was in solving assembly problems and if they noticed any benefits in learning the new product with VR.

The previous study focused on the features of the available VR software and hardware systems and which of them would best suit the case company's needs. One of the tested systems was in use for half a year and the virtual sequence planning was done with that software. The interviewee's answers are based on that software. Eg. the cable harness bending feature in that software was not used, because it was too complicated.

Almost everyone (eight out of nine) said that VR increased clarity compared to a regular screen projection very much or greatly (four or five on a

scale from one to five). It also helped in learning a new process. Also many (eight), said that the system speeded up problem solving very much or greatly. Comparison in this first interview was done against 3D CAD usage, whereas in this second interview study VR usage is compared against reality.

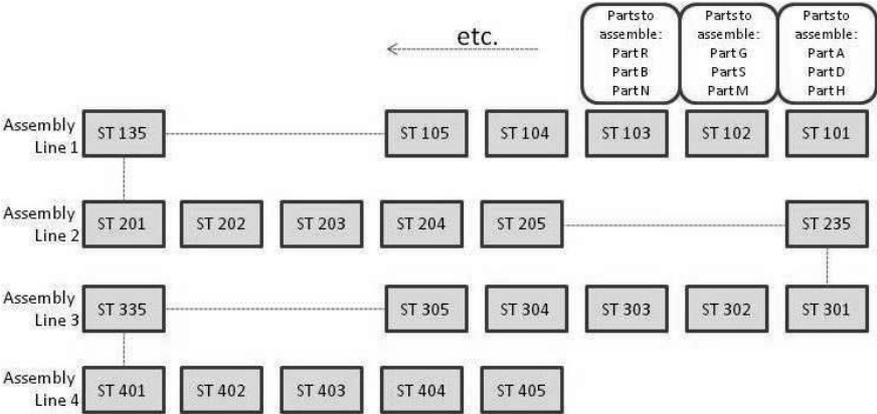


Figure 3: The assembly station layout and lines in the process

### 3.1 The interview methods

The interview method was qualitative allowing the interviewees to express their opinions more freely. The questions were sent by email to all active participants of the virtual build which was 30 people. Answers were got from 10 people and one of them answered only one question. The following chapter represents the questions and results of the interview.

### 3.2 The interview results

The interviewees answers were expressed in their own words and they are summarized in the table 1. The interviewees were asked to answer the questions presented in the table, comparing the assembly sequence planning that uses a virtual prototype with that of using a physical prototype.

Table 1: Questions and answers summary

What were the differences in the resulted assembly sequence between these two methods?	The virtually resulted assembly sequence was mainly suitable also in real life. Soft parts like wire harnesses caused some changes afterwards. Anyway the worst failures in product design from assembly point of view were captured
What assemblies were not possible to study virtually?	Assembly dimensions and tolerances were not possible to study virtually as well as the gaps between eg. the exterior parts like fascias to fenders.
What implications had the previous lack in the planned production process	Part behaviour, assembly tolerances and difficulties in collision analysis as well as specifying the assembly tools caused that the assembly time and sequence could not be specified exactly
What is your note for the goodness of the virtually planned assembly sequence?	Average is 7 (scale 1-10). The best ratings were given by the people who designed the assembly process. The worst rate was given by an engineer, who had to prepare the sessions.
What were the biggest miscalculations?	The virtual build gave maybe a little bit too optimistic picture of the assemblies because the part features could not be simulated. This was one reason for wrong assembly time estimations.
Which issues lend themselves best to reviewing in virtual reality?	Planning the assembly sequence, evaluating the ergonomics and assembly of non-elastic parts like interior, motor, subframe as well as assembly of single subassemblies.
Does the virtual reality system suit for training of the assembly personal?	If you have not got real parts yet. Best way is still learning by doing and virtuality can give a picture for the assemblers in advance of the product and assemblies.
If yes in which way then?	By going through the assembly sequence and parts and analysing and discussing the details in the team.
What else should be kept in mind with the next new product process design with VR system?	The planning should be started early enough keeping in mind the uncertainties of the process. The VR system's usability is important as well as enough trained users to operate the system. The CAD model management should be in good shape to have the accurate revisions on hand.

## 4 Conclusions

The interviews verified the immersive virtual reality system's necessity in today's production line sequencing. If the production line design has to wait for the physical prototype parts, product design does not get feedback from manufacturing and the simultaneous engineering targets are not reached.

---

Another important target is the time-to-market which is a crucial success factor in a car project's market competition.

It was also useful to get the production staff's opinions documented and analysed for the future projects. What was interesting was that those from the interviewees who worked near the production line, and were very experienced on their own field but had limited experience in digital product data system usage, were more positive about using the VR and about its benefits. The change management and production technology engineers, who worked in production supporting functions and had more experience in CAD systems, were not as positive. The reason might be that the VR system used in this case study needed a lot of preparation before a session could start.

To get back to the question if what you see really is what you get, the study has shown that when planning the assembly virtually you do not get exactly the same result as in real life. In the sequence planning one has to keep in mind that it is not possible to design the sequence completely virtually because not all parts are acting realistic, e.g. wire harnesses and hoses. Neither was it possible to get force feedback in the assembly. However ergonomometry investigations were found very useful with virtual build, especially since the case vehicle's body was quite big. For those assemblies that could not be tested virtually, eg. tolerances and flexible parts, it might be good for every module to have a special engineer in charge who does it on his desktop with the CAD software. Assembly ergonomometry testing could also be separated as an individual task of an expert.

One very important aspect to be considered is the usability of the system. The tested system which also was the basis for the interview was not user friendly. The sessions had to be prepared in advance by converting all the CAD files to the system's format. It sometime happened that the converted CAD file was not the latest revision and a new conversion was needed. Because the conversions took quite a long time they were conducted the evening before. One of the conclusions is therefore that user friendliness and accessibility of the virtual system is essential for an immersive VR system. This holds especially when the product models are subject to repetitive change and there are multiple people attending the planning sessions.

The amount of project organisation in the case company is low and the teams are used to working in a self-organised way. Also the VR system should support independent groupwork and enable fast setup of planning sessions without considerable external work effort. When the software is the same as the CAD design software this is possible in principle but it also requires

---

trained personnel. In any case the company has to have someone who is responsible for the VR room and equipment usage.

## 5 Discussion

The interview was based on working with rented test equipment. Now the case company has installed an own immersive VR system of its own where the software is part of the CAD software used in the company. That is a big advantage because it does not require conversions to the CAD files. Further research could show how well the system is working and whether the chosen features of the system are suitable in real life, and how well the system will be adopted in the company's organisation.

Haptic technology has not been used in the case company's virtual planning but it would also be an interesting trial for some subassemblies. Another interesting subject for investigation in later project phases in the case company might be augmented reality. Also software features with bending of flexible parts would be a useful new add-on to the virtual build.

It would also be interesting to study the VR usage in other case companies when designing the production process and assembly sequence. Another interesting research topic would be to analyse the change proposals that the manufacturing teams made to the product design during the simultaneous product development. The questions would then be, how many of the proposals are realized and what are the savings in time and money in consequence of that.

## References

- [1] Campbell, R.G., Roth, E.S. Integrated Product Design and Manufacturing using Geometric Dimensioning and Tolerancing. 2003. Marcel Dekker, Inc.
- [2] Becker, I.; Toivonen, V., Leino, S-P.: "Using virtual reality in designing the assembly process of a car", 13th International Design Conference - Design 2011, Copenhagen.
- [3] Dewar, R.G., Carpenter, I.D., Ritchie, J.M., Simmons, J.E.L.: "Assembly planning in a virtual environment", Innovation in Technology Management - The Key to Global Leadership. PICMET '97: Portland International Conference on Management and Technology

- 
- [4] Jayaram, S. Jayaram, U., Young, J.K., DeChenne, C., Lyons, K.W., Palmer, C., Mitsui, T.: "Industry case studies in the use of immersive virtual assembly". *Virtual Reality*, Vol. 11, No. 4, pp. 217-228, 2007.
- [5] Bullinger, H.J., Richter, M. Seidel, K.-A. *Virtual Assembly Planning. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*. Vol. 10 (3), 331-341. 2000
- [6] Zimmermann, P. *Virtual Reality Aided Design: A Survey of the Use of VR in Automotive Industry*. Advanced Summer Institute on "Product Engineering: Tools and Methods based on Virtual Reality", 30th May-6th June 2007
- [7] Leino, S.-P., Kiviranta, S., Rantanen, P., Heikkilä, J., Martikainen, T., Vehviläinen, M., Mäkiranta, A., Nuutinen, P., Hokkanen, I., Multanen, P. (2010) "Collaboration between Design and Production by exploiting VR/AR and PLM - Case Metso Minerals" 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics - AHFE2010. 17- 20 July 2010. Miami Florida USA
- [8] Morgan, J.M., Liker, J.K., *The Toyota Product Development System: Integrating People, Process And Technology*. 2006. Productivity Press.
- [9] Ye, N., Banerjee, P., Banerjee, A., Dech, F.: *A Comparative Study of Assembly Planning in Traditional and Virtual Environments*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, Vol. 29, No. 4, November 1999.
- [10] Zhenyu Liu, Jianrong Tan,: "Virtual assembly and tolerance analysis for collaborative design", *Computer Supported Cooperative Work in Design*, pp. 617 - 622 Vol. 1, 2005. Ninth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design Proceedings.
- [11] Fricke, E., Gebhard, B., Negele, H., Igenbergs, E. *Coping with Changes: Causes, Findings and Strategies*. *Systems Engineering*, Vol. 3, No. 4, 2000, pp. 169-179.
- [12] Choi, A. C. K., Chan, D. S. K., Yuen, A. M. F., *Application of Virtual Assembly Tools for Improving Product Design*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2002. Vol. 19, pp. 377-383.

## **Notwendigkeit für eine Methodenplattform zur Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse**

Daniel Krüger<sup>1</sup>, Sandra Eilmus<sup>2</sup>, Johanna Schmidt<sup>3</sup>, Sandro Wartzack<sup>1</sup>, Dieter Krause<sup>2</sup> und Kristin Paetzold<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Universität Erlangen-Nürnberg, <sup>2</sup>TU Hamburg-Harburg, <sup>3</sup>Uni BW München*

A basic need for every human being is mobility. Mobility is far more than the pure ability to move around. In fact it also comprises any kind of interaction with the environment especially the communication with other persons. Since a lack of mobility usually has a tremendous effect on the quality of live technical products that train, assist or compensate the users' mobility, will have a growing importance especially against the background of an aging society. As the need for mobility is highly user-specific, the designer of such products is confronted with a huge variety of requirements through to tailored products. This paper outlines the need for a platform of methods to handle these challenges.

### **1 Produkte für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse**

Mobilität ist eines der Grundbedürfnisse des Menschen. Dieses geht über die reine Bewegung hinaus und umfasst weitere Aspekte wie den Transport von Dingen, die Interaktion mit der Umwelt und Kommunikation mit anderen Menschen [1]. Nur wenn in keinem dieser Bereiche ein gravierendes Hindernis vorliegt, ist der Mensch mobil. Eine Einschränkung der Mobilität ist für die meisten Menschen gleichbedeutend mit einer Einschränkung ihrer Lebensqualität [2]. Produkte, die die Mobilitätsbedürfnisse des Nutzers befriedigen, müssen daher alle Aspekte von Mobilität berücksichtigen und über die reine Be-

---

wegungsunterstützung hinausgehen. Dazu müssen sie an die individuelle Leistungsfähigkeit des Nutzers anpassbar sein. Diese Anpassung umfasst unter anderem, dass ein Produkt so viel Unterstützung wie nötig, aber so wenig wie möglich liefert. Tritt eine Leistungseinschränkung auf, so sollte zunächst versucht werden, die noch vorhandenen Fähigkeiten des Nutzers weiter zu trainieren, so dass eine Unterstützung im eigentlichen Sinne noch nicht stattfindet. Erst wenn die eigenen Fähigkeiten des Nutzers nicht mehr ausreichen, um sein Mobilitätsbedürfnis zu befriedigen, wird er durch das System unterstützt. Erst als letzten Schritt werden nicht mehr vorhandene Fähigkeiten des Nutzers durch das technische System ersetzt und erhalten so die Mobilität des Nutzers.

Ein Problem bei der Entwicklung derartiger Produkte ist die große Heterogenität der Zielgruppe. Nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse werden von individuellen, technischen und sozialen Randbedingungen beeinflusst. Zu den individuellen Randbedingungen gehören der Gesundheitszustand, Bedürfnisse und Gewohnheiten sowie Kompetenzen. Unter die technischen Randbedingungen fällt die Verfügbarkeit von Geräten zu Training, Unterstützung und Kompensation, sowie von Verkehrsmitteln wie PKW oder öffentlichem Nahverkehr. Unter den sozialen Randbedingungen werden strukturelle Einflussfaktoren, die soziale Einbindung und das Auftreten von Ängsten oder dem Gefühl von Sicherheit verstanden. Für mobilitätseingeschränkte Personen ergeben sich daraus spezifische Bedürfnisse an Produkte, die sehr unterschiedlich sein können. Gleichzeitig ändern sich beim Nutzer diese Bedürfnisse durch z.B. sich ändernde Gesundheitszustände, was zu besonderen Bedürfnissen an die Variabilität dieser Produkte führt.

Ein weiterer Aspekt in der methodischen Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse ist die Notwendigkeit, die nutzerspezifischen Bedürfnisse sehr genau zu erfüllen. Dies liegt darin begründet, dass viele ältere Menschen z.T. große sehr individuelle Barrieren im Umgang mit technischen Produkten erleben. Diese Personen benötigen ein Produkt, das sich sehr einfach bedienen lässt. Die Zusammenhänge im Inneren des Produktes zur Funktionserfüllung können dabei durchaus komplex sein. Der Nutzer soll mit dieser Komplexität aber nicht konfrontiert werden, um ihn nicht zu verunsichern. Andere ältere Menschen oder jüngerer Menschen mit besonderen Mobilitätsbedürfnissen nutzen unter Umständen gern die Vorteile eines Produktes mit vielen technischen Möglichkeiten und können ein zu einfaches Produkt als stigmatisierend empfinden. Hier besteht der Bedarf das Produkt an die Bedürfnisse der Menschen möglichst genau anpassen zu können, um eine hohe Akzeptanz zu gewährleisten.

Außerdem spielen Kommunikationsbarrieren bei der Formulierung eigener Bedürfnisse, z.B. bei älteren Nutzern eine besondere Rolle. Ältere Nutzer formulieren ihre Bedürfnisse häufig nicht explizit. Nur wenn sie gezielt danach gefragt werden, ob sie ein bestimmter Aspekt eines Produktes stört, drücken sie das auch aus. Das erschwert die Erfassung der Bedürfnisse. Die zahlreichen Faktoren, die die Bedürfnisse beeinflussen, wurden bereits beschrieben. Dadurch ergibt sich, dass die Bedürfnisse sehr individuell sind, was es für die Produktentwicklung schwierig macht, allgemeingültige Anforderungen abzuleiten. Für das gesamte Nutzerspektrum ergibt sich so eine erhebliche Varianz. Zu dieser Varianz zwischen verschiedenen Nutzern kommt noch die nutzerspezifische Varianz. Ändern sich einer oder mehrere der beschriebenen Randbedingungen, was schon durch den normalen Alterungsprozess der Fall sein kann, beeinflusst das unter Umständen die Bedürfnisse des Nutzers und damit seine Anforderungen an das Produkt. Für die Akzeptanz eines Produktes durch den Nutzer, ist ein hoher Erfüllungsgrad der individuellen Bedürfnisse aber entscheidend. Diese Einflüsse sind in Bild 1 dargestellt.

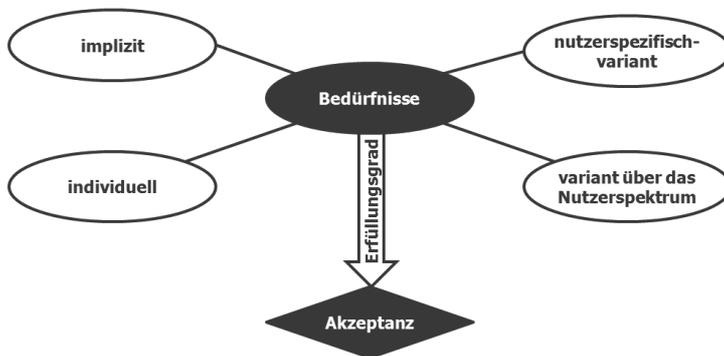


Bild 1: Bei der Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse relevante Einflüsse auf Bedürfnisse und Akzeptanz

Um Produkte entwickeln zu können, die diesen Bedürfnissen gerecht werden, müssen die Bedürfnisse explizit gemacht und in ihrer Varianz erfasst und beschrieben werden. In verschiedenen Bereichen der Produktentwicklungsmethodik sind Ansätze vorhanden, um einzelnen dieser Herausforderungen zu begegnen [siehe Abschnitt 2 und 4]. Es fehlt jedoch eine methodische Grundlage, auf deren Basis individuelle, implizite, nutzerspezifische und nutzerspezifisch-variante Bedürfnisse abgestimmt in technische Anforderungen überführt werden. Dies ist notwendig, um im gesamten Produktentwicklungsprozess auf die Anforderungen zugreifen zu können, ohne sie zu stark zu verein-

fachen. Nur so können Produkte entwickelt werden, die diesen Bedürfnissen genügen. Aus diesem Grund sollen Möglichkeiten einer Methodenplattform untersucht werden, die die methodische Erfassung des Nutzers und seiner Mobilitätsbedürfnisse, die Überführung in mobilitätsspezifische digitale Menschmodelle und die Nutzung dieser Modelle zur Entwicklung nutzerspezifischer Produktfamilien unterstützt. Im Folgenden werden diese methodischen Elemente der Methodenplattform vorgestellt.

## 2 Methodische Erfassung des Nutzers und seiner Mobilitätsbedürfnisse

Produkte, die alle Bedürfnisse des Nutzers vollständig befriedigen, müssten individuell für jeden einzelnen Nutzer entwickelt werden. Für bestimmte Produkte und Nutzergruppen ist dieses Vorgehen realisierbar, für die Produkte, die im Rahmen dieses Projektes betrachtet werden, stellt dies aus Kosten- und Zeitgründen keine Option dar. Es wird daher eine Methode zur Entwicklung einer Produktfamilie benötigt, die so variabel ist, dass ihre Produkte die Bedürfnisse möglichst vieler verschiedener Nutzer in weiten Teilen erfüllen können. Dazu müssen diese Bedürfnisse erfasst und in geeigneter Form für die Produktentwicklung zur Verfügung gestellt werden.

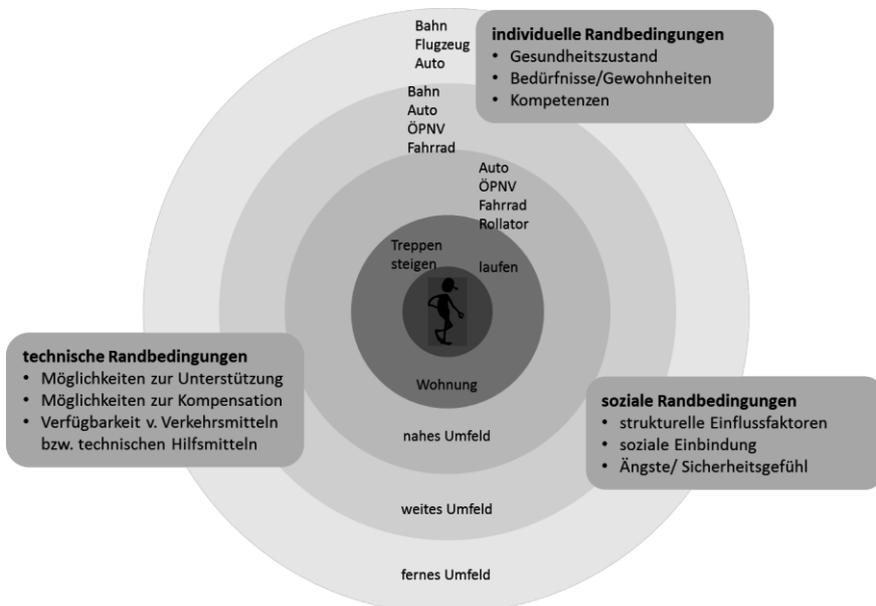


Bild 2: Mobilitätsebenen nach [3]

---

Für den Bereich Mobilität gilt es zunächst typische Szenarien zu erfassen, um die dabei auftretenden Probleme zu erkennen. Dies erfolgt in Anlehnung an die verschiedenen Mobilitätsebenen (Bild 2), in denen unterschiedliche Voraussetzungen für die Mobilität gelten.

Hier wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die Anforderungen, an die Fähigkeiten des Nutzers mit zunehmendem Abstand von der Wohnung zunehmen, wobei die eigenen Füße trotzdem das wichtigste Fortbewegungsmittel bleiben. [1] Auch wenn die Fortbewegung über weite Strecken mit anderen Verkehrsmitteln erfolgt, müssen immer Wege zum und vom anderen Verkehrsmittel zu Fuß zurückgelegt werden. Aus der Bewegung in und zwischen den verschiedenen Ebenen und dem damit verbundenen Ziel (z.B. Einkaufen, Besuch bei Freunden) lassen sich typische Tätigkeiten ableiten, bei denen die Nutzer Unterstützung brauchen.

Neben der Mobilität müssen auch die Nutzer mit ihren typischen Einschränkungen, Fähigkeiten und Bedürfnissen erfasst werden. Anhand dieser Kriterien können dann Gruppen von Nutzern gebildet werden, die ähnliche Voraussetzungen und Bedürfnisse haben. Ein Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Randbedingungen (siehe Bild 2) und den Anforderungen an ein Produkt in den verschiedenen Mobilitätsebenen aufzuzeigen. Die Nutzergruppen werden gebildet, um die Varianz der technischen Anforderungen möglichst gering zu halten.

Bei der Ableitung von Anforderungen an die Produkte für eine Nutzergruppe wird wieder der Grundsatz „so wenig wie möglich, so viel wie nötig“ zugrunde gelegt. Aufgrund der Heterogenität, auch innerhalb einer Nutzergruppe, müssen für die Produktfunktionen Bereiche angegeben werden. Zum einen unterscheiden sich die Bedürfnisse der verschiedenen Nutzer innerhalb der Gruppe, sodass hier eine Anpassung an die einzelnen Nutzer erforderlich ist, zum anderen verändern sich die Fähigkeiten der einzelnen Nutzer und die Produktfunktionen müssen mit der Zeit angepasst werden. Dieses breite Anforderungsspektrum ist Grundlage zur Konzeptionierung einer entsprechend abgestimmten Produktfamilie.

---

### 3 Unterstützung des Entwicklungsprozesses durch mobilitäts-spezifische digitale Menschmodelle

Um diesem breiten Anforderungsspektrum genügen zu können, muss es sehr genau erfasst und in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden. Die Norm EN ISO 9241-210 [4] fordert hierzu beispielsweise, Lösungskonzepte aus der Nutzerperspektive zu evaluieren. Hierzu sind konventionell umfangreiche Nutzerbefragungen und Usability-Tests unter Verwendung von Prototypen notwendig [5]. Wie bei vielen anderen Problemstellungen der Produktentwicklung zeichnet sich auch hier das Bestreben ab, die Nutzerintegration mittels Rechnerunterstützung zu rationalisieren. Probate Mittel sind hybride Versuchsaufbauten (Hybrid Mock-Up) [6], welche die Interaktion von Testpersonen mit virtuellen Prototypen gestatten oder die virtuelle Repräsentation des Nutzers durch digitale Menschmodelle.

Ziel ist es, den Menschen mit seinen spezifischen Eigenschaften, Fähigkeiten und Verhaltensweisen in einer rechnerverarbeitbaren Form abzubilden. Hierbei sind mehrere Teildisziplinen entstanden, die sich mit jeweils unterschiedlichen Aspekten des Menschen beschäftigen: [7]

- Ziel der **Anthropometrie** ist die Erfassung und Kategorisierung menschlicher Körpermaße. Anthropometrische Menschmodelle sind oft einfache virtuelle Puppen (Mannequins), die sich in CAD- oder VR-Systeme integrieren lassen. Bedeutung haben sie vor allem in der Bekleidungsindustrie sowie im Fahrzeug- und Maschinenbau, wo sie zur Lösung ergonomischer Fragestellungen eingesetzt werden.
- **Biomechanische Menschmodelle** bilden den menschlichen Bewegungsapparat, bestehend aus Skelett und Muskulatur, als überbestimmtes Mehrkörpersystem ab. Ausgehend von vordefinierten Bewegungsabläufen und äußeren Lasten kann der innere Beanspruchungszustand des Körpers simuliert werden. Beanspruchungskennwerte wie Muskelaktivität und Gelenkreaktionskräfte dienen häufig als Randbedingungen bei der Auslegung von medizinischen Prothesen und Implantaten, können aber auch zur Bewertung ergonomischer Probleme herangezogen werden. Bild 3 zeigt exemplarisch die Simulation eines Hebevorganges mit Hilfe der freien biomechanischen Simulationsplattform OpenSim [8].

- **Kognitive Modelle** stellen den Versuch dar, Aspekte der menschlichen Informationsverarbeitung und Verhaltenssteuerung zu simulieren. Beispiele sind Modelle zur Reaktionsfähigkeit, Entscheidungsfindung, Orientierung und Lernen. Die Modelle basieren oft auf empirisch gesammelten Daten.
- **Sensorische Modelle** dienen der Simulation menschlicher Sinnesaktivität. Besondere Bedeutung haben sie im Bereich der Ergonomie, wo beispielsweise die Sichtbarkeit von Objekten oder die Hörbarkeit von akustischen Signalen von Interesse sein kann.

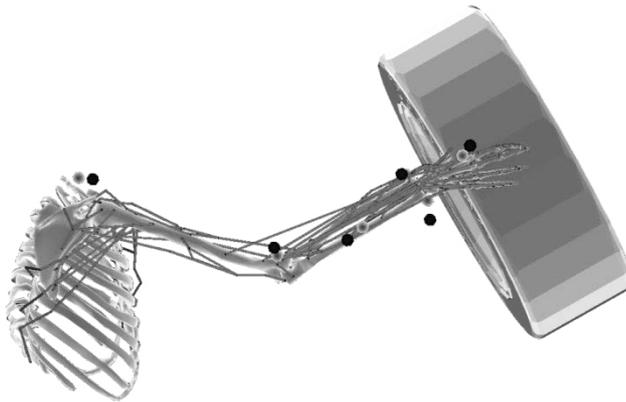


Bild 3: Biomechanische Simulation einer Hebetätigkeit (OpenSim)

Mit Hilfe digitaler Menschmodelle ist es möglich, der Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse eine durchgängige und prozessbegleitende Datenbasis zur Verfügung zu stellen, die es erlaubt, den aktuellen Produktstatus jederzeit mit den Eigenschaften und Bedürfnissen des Nutzers abzugleichen. Voraussetzung ist jedoch, dass die Menschmodelle in der Lage sind, die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Nutzergruppe, inklusive eventuell vorhandener Mobilitätseinschränkungen, korrekt abzubilden.

---

## 4 Methode zur Entwicklung nutzerspezifisch-varianter Produktfamilien

Bei der Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse sind vielfältige individuelle Bedürfnisse zu berücksichtigen. Eine mögliche in der Industrie vielfach verwendete Strategie, um dieser Herausforderung zu begegnen und die Produkte zu marktfähigen Preisen anbieten zu können, ist die Entwicklung von modularen Produktfamilien [9]. Hier können verschiedene Produktvarianten auf Basis modularer Strukturen effizient erzeugt werden. Die Variantenvielfalt hat das Ziel, möglichst vielen Nutzern mit ihren spezifischen, individuellen Bedürfnissen begegnen zu können. Bestehende Methoden, wie der integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien [9] oder die Multi-Produkt-Entwicklung [10] und weitere in [11] zusammengefasste Methoden, unterstützen die Bereitstellung dieser großen externen Vielfalt auf Basis einer kleineren internen Vielfalt.

Im Bereich der Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse können verschiedene neue Aspekte allerdings nicht mit bestehenden Methoden adressiert werden. Zum Einen besteht neben der Varianz durch verschiedene Nutzer (nutzerspezifische Bedürfnisse) eine weitere Varianz von Bedürfnissen während der Nutzung durch einen Nutzer z.B. durch sich ändernden Gesundheitszustände (nutzerspezifisch-varianter Bedürfnisse). Die Varianz wird bisher aus Sicht eines Unternehmens, das viele Kunden erreichen möchte, optimiert. Die Varianz, die der Nutzer braucht, um nicht für das Agieren in und zwischen Mobilitätsebenen oder bei Änderung bestimmter Fähigkeiten das Produkt wechseln zu müssen, wurde bisher nicht methodisch in die Produktfamilienentwicklung integriert. Da gerade bei z.B. älteren Nutzern die Gewöhnung an neue Produkte oft eine Barriere darstellt, ist es besonders wichtig, dem Nutzer ein Produkt bereitzustellen, das er möglichst konstant und lange benutzen kann, auch wenn sich die Bedingungen der Nutzung ändern.

Eine weitere Herausforderung ist zum anderen, der Bedarf an sehr genauer Erfüllung von Bedürfnissen, um eine hohe Akzeptanz zu erzielen. Eine Variante, die die Bedürfnisse nur zum Teil befriedigt, kann unter Umständen zu große Barrieren darstellen das Produkt zu nutzen.

Aus diesen Aspekten, die bei der Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse eine besondere Rolle spielen, ergibt sich für die Entwicklung dieser Produkte ein neues Ziel. Es sind Produkte für ein breites Nutzerspektrum zu entwickeln, die individuellen und sich über die Nut-

---

zungszeit stark ändernden Bedürfnissen sehr genau genügen müssen, um keine Nutzungsbarriere darzustellen.

Hierzu muss der bisher nur aus Sicht des Herstellers betrachtete Zusammenhang von äußerer und innerer Varianz zusätzlich auch aus der Sicht des Nutzers betrachtet werden. Auf diese Weise können Produkte entwickelt werden, die dem Nutzer eine möglichst große Vielfalt in der Nutzung auf Basis eines möglichst überschaubaren, individuell angepassten Produktes ermöglichen. Es müssen mit Hilfe dieses Ansatzes modulare Strukturen abgeleitet werden können, die optimal individualisierte Anteile mit standardisierten Anteilen kombinieren und in der Nutzung flexible Module für unterschiedliche Nutzungsbedingungen bieten. Um von den Bedürfnissen sowohl individualisierte Anteile als auch variable, flexible Anteile des Produktes ableiten zu können, ist eine genaue Analyse und Simulation der Anforderungen wie in Abschnitt 2-3 beschrieben eine wichtige Grundlage der Entwicklung nutzerspezifisch-varianter Produktfamilien.

## 5 Ausblick: Entwicklung einer Methodenplattform

In Bild 4 ist ein Konzept für eine Methodenplattform zur Entwicklung von Produkten für nutzerspezifische Mobilitätsbedürfnisse skizziert. Als Input gelten die individuellen Fähigkeiten und Mobilitätsbedürfnisse der Nutzer, die implizit vorliegen können. Die Definition von Mobilitätsebenen erfolgt analog Bild 2. Zur Erfassung dieser Inputs sind geeignete Methoden zu entwickeln (vgl. Abschnitt 2), damit sie in eine explizite Form überführt und somit weiteren Schritten der Modellbildung zugänglich gemacht werden können. Ziel der Modellbildung ist es, eine Konsolidierung der stark varianten Nutzerdaten in Nutzergruppen zu erreichen, innerhalb derer die Fähigkeiten und Mobilitätsbedürfnisse der Nutzer relativ homogen beschrieben werden können. Auf Grundlage dieser Gruppen können mobilitätsspezifische digitale Menschmodelle erstellt werden, die für den gesamten Produktentwicklungsprozess eine durchgängige Datenbasis zur Nutzerintegration bereitstellen. Aus der Erfassung der für die Nutzer relevanten Übergänge zwischen den Mobilitätsebenen lassen sich elementare Tätigkeiten (z.B. Aufstehen, Treppen steigen, etc.) und Bedürfnisse ableiten, die durch technische Produkte adressiert werden müssen. Gleichzeitig sind es eben diese Tätigkeiten, anhand derer später generierte Produktkonzepte mit Hilfe digitaler Menschmodelle evaluiert werden können.

Für die Konzeptentwicklung werden Informationen über die Varianz der individuellen nutzerspezifischen Fähigkeiten und die unterschiedlichen geforderten Produktfunktionen benötigt. Beides wird von den Methoden zur Erfas-

sung des Nutzers und seiner Fähigkeiten geliefert. Die auf digitalen Menschmodellen basierende durchgängige Datenbasis kann an dieser Stelle dazu herangezogen werden, die nutzerspezifischen Bedürfnisse in technische Anforderungen zu transferieren. Außerdem kann sie die Festlegung varianter Produkteigenschaften anhand der Nutzergruppen unterstützen. Auf Basis der geforderten Vielfalt sollen nun Produktkonzepte entwickelt werden, die dem spezifischen Nutzer variante Nutzungsmöglichkeit eines Produktes bieten (nutzerspezifisch-varianter Produktfamilien). Gleichzeitig müssen verschiedenen Kunden verschiedene auf sie zugeschnittene Produkte angeboten werden. Diese Vielfalt muss durch wenig technischen Aufwand realisiert werden können. Für diese Phase sind methodische Werkzeuge zu entwickeln, die den Produktentwickler dabei unterstützen, die interne Varianz nicht nur in der Herstellung, sondern auch in Richtung des individuellen Kunden zu reduzieren. Zur Evaluierung und Verfeinerung der Produktkonzepte in ihren verschiedensten Varianten dienen wiederum die mobilitätsspezifischen digitalen Menschmodelle.

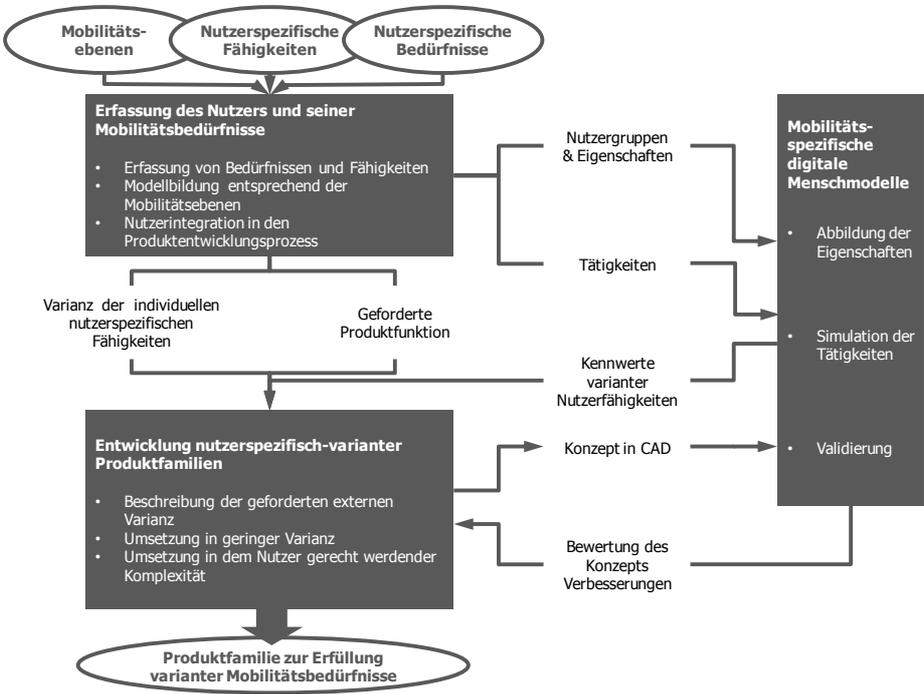


Bild 4: Erforderliche Struktur einer Methodenplattform

---

## Literatur

- [1] Mollenkopf, H.; Flaschenträger, P. (Hrsg.: Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend): "Erhaltung von Mobilität im Alter", Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 2001.
- [2] Griessinger, N.; Weber, M. et al.: "Krankheitsbilder im Alter, die die Lebensqualität beeinträchtigen". In Likar, R.; Bernatzky, G. et al.: "Lebensqualität im Alter – Therapie und Prophylaxe von Altersleiden", Springer, Wien, New York, 2005.
- [3] Lueth T.C.; D'Angelo L.T.; Czabke A.: "TUM-AgeTech – A New Framework for Pervasive Medical Devices". In Coronato, A.; De Pietro, G.: "Pervasive and Smart Technologies for Healthcare: Ubiquitous Methodologies and Tools", IGI Global, 2010, S. 295 – 321.
- [4] ISO 9241-210 Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centered design for interactive systems. International Organization for Standardization, Genf, 2010.
- [5] Maguire, M.: "Methods to support human-centered design". International Journal of Human-Computer Studies, Volume 55, 2001, S. 587-634.
- [6] Krüger, D.; Stockinger, A.; Wartzack, S.: "A haptic based Hybrid Mock-Up for mechanical products supporting human centered design". International Conference on Engineering Design ICED11, Kopenhagen, 2011.
- [7] Bubb, H.; Fritzsche, F.: "Scientific Perspective of Digital Human Models: Past, Present and Future". In: Duffy, V.(Hrsg.): "Handbook of digital human modeling – Research for applied ergonomics and human factors engineering", 1.Auflage. Boca Raton: CRC Press, 2009, S. 3-1 - 3-30.
- [8] Delp, S.; Arnold, C.: "OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement". IEEE Transactions on Biomedical Engineering 54.2007, S. 1940 – 1950.
- [9] Krause, D.; Eilmus, S.: "Methodical Support for the Development of Modular Product Families", in: The Future of Design Methodology, Springer-Verlag, Berlin, 2011.

- 
- [10] Mortensen, N. H.; Harlou, U.: "Erfolgreiche Multi-Produkt-Entwicklung", in Handbuch Produktentwicklung, B. Schäppi, E., Wien: Hanser, 2005, S. 319–339.
- [11] Jiao, J.; Simpson, T. W.; Siddique, Z.: "Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review", in J Intell Manuf, vol. 18, no. 1, 2007, S. 5–29.