Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 5

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

6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008

Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.

Copyright Shaker Verlag 2008
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7544-0
ISSN 1438-4930

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Mit dem Motto des 6. Gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik „Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung“ haben die veranstaltenden Hochschulen versucht, die wesentlichen Probleme, mit denen sich heute forschende und in der Industrie praktizierende Ingeneurinnen und Ingenieure auseinandersetzen müssen, zu adressieren. Nachhaltig meint dabei, sowohl ökologische, also mit unserer Umwelt im Einklang befindliche, als auch ökonomisch tragfähige Lösungen zu entwickeln. Dies ist heute nicht mehr möglich, ohne sich intensiv mit den vorhandenen Hilfsmitteln, insbesondere der Rechnerunterstützung aller Aufgaben, und strategischen Ansätzen wie dem Product Lifecycle Management (PLM) auseinanderzusetzen und diese zweckmäßig anzuwenden.

Hierbei soll die Tagung Unterstützung bieten, indem Forscher von Hochschulen sowie Anwender aus der industriellen Praxis im Rahmen von Vorträgen und Diskussionen neueste Trends, Erfahrungen und zukünftige Fragestellungen darstellen. Das 6. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik soll so einen Beitrag zur Bewältigung anstehender Probleme leisten und helfen, zukünftige Fragestellungen rechtzeitig zu erkennen.

Die sehr guten Erfahrungen der vorangegangenen Veranstaltungen lassen hoffen, dass auch diesmal wieder eine Plattform für einen regen Austausch zwischen universitärer Forschung und industrieller Anwendung stattfindet.

Danken möchte ich an dieser Stelle allen Vortragenden für die aufgewendete Mühe und den Gästen für ihr Interesse an der Veranstaltung. Insbesondere gilt mein Dank aber Herrn Dipl.-Ing. Christoph Warkotsch, der die gesamte Organisation durchgeführt hat sowie allen Mitarbeitern des ikt, die ihn dabei unterstützt haben. Ohne diesen weit über das Übliche hinausgehenden Einsatz wäre die Veranstaltung nicht möglich gewesen.

Allen Gästen und Vortragenden wünsche ich eine erfolg- und erkenntnisreiche Veranstaltung sowie einen angenehmen und interessanten Aufenthalt im altehrwürdigen und schönen Aachen. Abschließend möchte ich nicht versäumen, meinem lieben Kollegen Frank Rieg und dem Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD an der Universität Bayreuth ein erfolgreiches Kolloquium 2009 zu wünschen.

Aachen, September 2008
Jörg Feldhusen

Inhaltsverzeichnis

Integrierte Visualisierung von Simulationsergebnissen mit Virtual Reality
Ralph Stelzer, Wolfgang Steger, Bernhard Saske
Technische Universität Dresden 1

Wasserkraft – Ein konstruktiver Blick in die Zukunft
Jana Hadler, Klaus Brökel
Universität Rostock 11

Strategische Projektbewertung in der Vorentwicklung produzierender Unternehmen
Stephan Oertelt, Karl-Heinrich Grote
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 19

Simulationsmethoden und -werkzeuge der Kunststoffkonstruktion – Simulationskopplung mittels ICROS
Bettina Alber-Laukant, Andreas Dörnhöfer, Jochen Zapf, Frank Rieg
Universität Bayreuth 31

Design für Investitionsgüter
Frank Drechsel
Technische Universität Dresden 41

Effizient vom Megatrend zur Produktidee – das Bahnhofsmodell
Ingo Schulz, Andreas Kern-Trautmann
SKF GmbH 51

Fluidtronic: Entwicklungsumgebung für fluidtechnisch-mechatronische Systeme
Günther Schuh, Michael Lenders, Jochen Müller, Christopher Nussbaum
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen 59

Kostenprognose in sehr frühen Stadien der Produktentwicklung
Jörg Feldhusen, Frank Dehen
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen 73

Simulationsgestützte Schätzung von Entwicklungsdauern und –kosten auf Basis der Design Structure Matrix
Thomas Gärtner, Norbert Rohleder, Christopher M. Schlick, Riklef Callsen
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Daimler AG 85

Speicherverwaltung und Lösung großer Gleichungssysteme im Rahmen einer FEA
Martin Zimmermann, Bernd Roith, Frank Rieg
Universität Bayreuth 97

Lean Innovation – Komplexität der Produktentwicklung sicher beherrschen
Günther Schuh, Michael Lenders, Jens Arnoscht
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen..... 109

Effizienzsteigerung der Produktentwicklung durch numerische Optimierung in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses
Sven Faßbender, Markus Bröckerhoff
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen 119

DMG-Lib – Ein webbasierter Lösungskatalog zur Unterstützung des Entwurfs von ungleichförmig übersetzenden Getrieben
Johannes Kloppenburg, Mathias Hüsing, Burkhard Corves, Torsten Brix
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, TU Ilmenau 129

Methode zum Generieren und Archivieren von Zuverlässigkeitsdaten aus unvollständig dokumentierten Produktdaten
Henrik Schnegas
Hochschule Wismar 139

Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese und Auslegung von Konstruktionslösungen
Markus Deimel
Polysius AG 149

Design for Variety – Ein Ansatz zur variantengerechten Produktstrukturierung
Thomas Kipp, Dieter Krause
Technische Universität Hamburg-Harburg 159

Herausforderungen der interdisziplinären Produktentwicklung
Robert Watty, Hansgeorg Binz
Universität Stuttgart 169

Produktentwicklungsprozesse und ihre Auswirkungen auf PLM-Architekturen
Michael Bitzer, Martin Eigner, Niklas Hochstein, Michael Vielhaber
Technische Universität Kaiserslautern, Daimler AG 179

Beitrag der Produktentstehung zur Nachhaltigkeit
Rainer Stark, Kai Lindow, Robert Woll, Christian Kind
Technische Universität Berlin, Fraunhofer IPK 191

Pattern Languages als Framework zur Erstellung eines Entwicklungsleitfadens
Jörg Feldhusen, Frederik Bungert
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen..... 201

Gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten - Verantwortung und Einfluss seitens der Produktentwicklung
Dirk Hanusch, Herbert Birkhofer
Technische Universität Darmstadt 211

Know-How-Schutz der Produktmodelle in der Virtuellen Produktentwicklung
Michael Abramovici, Valentin Meimann
Ruhr-Universität Bochum..... 221

Untersuchung der Kontaktspannungen bei der Métaizeau-Nagelung
Der Kompromiss zwischen Stabilität und Nekrose
Hans-Peter Prüfer
Ruhr-Universität Bochum..... 231

Kopplung von Mehrkörpersimulation und experimenteller Untersuchung von Gelenkendoprothesen
Christian Kliewe, Klaus Brökel, Rainer Bader, Christoph Wörnle
Universität Rostock 241

Strength Scaling in Composite Laminate Design
Ahmad Rehan, Karl-Heinrich Grote, Christiane Beyer
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 251

Untersuchung des Stabilitätsverlustes einer elastischen Kupplung mit ringförmigem elastischem Gummielement
Vilhelm Milkov Hadzhiyski
University of Food Technology Plovdiv, Bulgarien 263

Neue methodische Ansätze zum Beherrschen von Störeffekten
Markus Deimel
Polysius AG 271

Berücksichtigung der Reinigung im konstruktionssystematischen Prozess
Bernd Künne, Tim Richard
Technische Universität Dortmund 281

Aktuelle Probleme der numerischen Simulation des hydrodynamischen und hydrostatischen Verhaltens von Spaltströmungen
Roland Wegmann, Klaus Brökel
Universität Rostock 291

Spezifik von Reverse Engineering in der Kleinserienfertigung des Streichinstrumentenbaus - Produktionstechnische Aspekte
Christine Schöne, Ralph Stelzer, Robert Jung
Technische Universität Dresden 305

Erweiterte Startmodelle zur Produktbeeinflussung der Karosserie aus Sicht der Produktionsplanung
Henrich Brockmeyer, Andreas Lucko, Frank Mantwill
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg 315

Anforderungen und Beispiele für durchgängiges Komplexitätsmanagement
Rupert Deger
Parametric Technology GmbH 327

Konstruktionsmethodik – und was man für den Entwurf von PLM-Lösungen daraus lernen kann
Michael Vielhaber, Michael Bitzer, Martin Eigner
Daimler AG, Technische Universität Kaiserslautern 339

Einbindung von Lieferanten in die Produktentwicklung durch Konzeptwettbewerbe am Beispiel Flugzeugbau
Stefan List, Jan Göpfert
Airbus Deutschland GmbH, ID-Consult GmbH 351

Produktentwicklung optimieren unter Nutzung von Künstlichen Neuronalen Netzen und grafischer Visualisierung der Anforderungen (PONNGA)
Jörg Feldhusen, Arun Nagarajah
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen..... 361

Diskussion der Gültigkeit des Allgemeinen Konstruktionsprozesses in der Lehre und industriellen Praxis
Jörg Feldhusen, Alexander Brezing
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen..... 371

Integrierte Visualisierung von Simulationsergebnissen mit Virtual Reality

Ralph Stelzer, Wolfgang Steger, Bernhard Saske

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion – Konstruktionstechnik/CAD
Technische Universität Dresden, Postfach, D-01062 Dresden
Email: ralph.stelzer@tu-dresden.de; Internet: http://tu-dresden.de/imm

Inhalt: *Virtual Reality (VR) ist eine etablierte Technologie für die Beurteilung von Gestalt, Funktion und Montage zu entwickelnder Produkte. Die Entwickler profitieren von der hervorragenden Visualisierungsqualität und der einfachen Handhabung der VR-Modelle. Simulationsergebnisse, beispielsweise von FEM- oder CFD-Berechnungen, werden oftmals ohne Bezug zur Produktstruktur in separaten Softwaresystemen visualisiert. Der Beitrag beschreibt, wie VR-basierte Design Reviews Simulationsergebnisse einbeziehen können, indem ein PDM-Sytem zur Datenverwaltung genutzt wird.*

Abstract: *Virtual reality (VR) is an established technology to evaluate shape, function and assembly of products during the engineering process. Engineers can benefit from the excellent visualisation quality and ease of handling of VR models. Simulation results - e.g. from FEM or CFD calculations – are often visualised in special outstanding software systems without connection to the structure of products. The paper describes how VR design reviews can incorporate simulation results by using a PDM sytem.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, Virtual Reality, Simulationsergebnisse, Visualisierung*

Keywords: *engineering design, virtual reality, simulation results, visualisation*

1 Zielstellung

Virtual Reality (VR) ist eine für Design-Reviews attraktive und zunehmend erschwingliche Technologie. Einem breiten Einsatz, der die ausgezeichnete Visualisierungsqualität und das einfache Handling der VR-Modelle ausnutzen könnte, stehen jedoch noch immer der hohe Aufwand bei der Bereitstellung der erforderlichen Daten und die fehlende Integration in den laufenden Entwicklungsprozess entgegen.

Neben den gestaltbeschreibenden CAD-Daten und Metainformationen zum Projektablauf entstehen im Zusammenhang mit der Produktentwicklung häufig auch Simulationsdaten, beispielsweise aus CFD- oder FEM-Berechnungen. Üblicherweise werden diese mit speziellen Visualisierungstools ausgewertet, die informationstechnisch nicht in den

Entwicklungsprozess eingebunden sind. Eine Verwaltung und Visualisierung im Kontext der übrigen Produktdaten ist damit nicht möglich.

Der DMU-Prozess innerhalb der Produktentwicklung kann funktionell bereichert werden, wenn Simulationsergebnisse in die Beurteilung von Entwicklungsschritten einbezogen werden können. Dazu soll eine VR-basierte Arbeitsumgebung entstehen, mit der die einfache Verwaltung und Auswertung von Berechnungsergebnissen im Kontext der Beurteilung von Funktion und Gestalt eines Produkts möglich ist.

2 Technische Visualisierung

FEM-Berechnungen zur Kontrolle des Verformungsverhaltens oder CFD-Berechnungen für die Beurteilung des Luftwiderstandes sind oft Teil der Entwicklungsarbeit an einem Produkt. Charakteristisch für derartige Berechnungen sind aufwändige Modelle und nach deren numerischer Lösung umfangreiche Datenstrukturen, die die Ergebnisse beinhalten. Die Ergebnisse sind, bedingt durch ihre Menge und Strukturierung, nicht unmittelbar für die Bewertung eines Produktes nutzbar, sondern erst mit Hilfe grafischer Darstellungen, die durch spezielle Aufbereitungsschritte aus den Berechnungsergebnissen erzeugt werden.

Dieser Prozess ist für durchschnittliche Anforderungen im FEM-Bereich inzwischen nahezu standardisiert. Farbplots für Verformung oder Vergleichsspannung, die in die verzerrt dargestellten Geometriemodelle eingeblendet werden, sind üblich. Dazu kommen Werkzeuge wie Schnittebenen oder Selektionswerkzeuge, mit denen die Ergebnisse studiert werden können (Bild 1).

Insbesondere bei anspruchsvolleren Fragestellungen wie Crashsimulationen oder Strömungsberechnungen ist die Aufbereitung der Ergebnisse jedoch Visualisierungssystemen vorbehalten, mit denen die Visualisierung zum Teil auch in VR- Qualität möglich ist.

Beispiele für leistungsfähige Visualisierungssysteme sind AVS/EXPRESS [1] und COVISE [2].

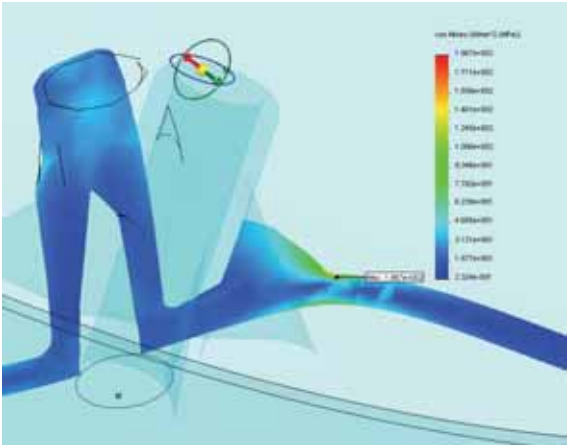


Bild 1: Analyse eines Vergleichsspannungsplots mittels Schnittebene im verzerrten Modell

Charakteristisch für die technische Visualisierung ist, dass verfügbare Werkzeuge immer abhängig von der konkreten Fragestellung angepasst und kombiniert werden müssen. Zentrale Aufgabe ist die Entwicklung und Optimierung des Visualisierungsprozesses für die aktuelle Fragestellung. Diese explorative Arbeit mit den Simulationsergebnissen ist häufig den Spezialisten vorbehalten, die auch die Berechnungsmodelle aufbauen und die Simulationen durchführen. In vielen Bereichen erfolgt die Simulation parallel zum Produktentwicklungsprozess, ohne die informationstechnische Verbindung zu den übrigen Entwicklungsschritten und Planungsvorgängen.

3 Produktentwicklung unter Nutzung der Virtual Reality

VR bietet bei der Beurteilung von Gestalt und Struktur von Produktmodellen hervorragende Möglichkeiten. Die realitätsnahe dreidimensionale Darstellung von großen Modellen aus unterschiedlichen Erzeugersystemen befördert den zunehmenden Einsatz für Design-Reviews. Vorteilhaft können typische DMU-Aufgaben, wie

- die Prüfung der geometrische Passfähigkeit von Baugruppen und Einzelteilen,
- die Erprobung von Montage- und Demontageabläufen oder
- die Prüfung von Bewegungs- und Arbeitsräumen erledigt werden (Bild 2).

Bild 2: Evaluierung der Sitzposition mittels Menschmodell in einer VR-Umgebung

VR-Systeme im Engineeringbereich sind durch die Orientierung ihrer Modelle an der Produktstruktur ausgezeichnet. Modellkern ist ein sogenannter Szenegraph, der die zu visualisierenden Objekte ähnlich wie ein CAD-System in einer hierarchischen Struktur verwaltet. Hervorzuheben ist, dass im VR-System keine Modifikation der geometrischen Gestalt möglich ist. Dies bleibt den dafür vorgesehenen CAD-Systemen vorbehalten. Die Datenmodelle beider Systeme müssen konsistent sein. Im einfachsten Fall ist das erreichbar, indem nach Geometrieänderungen im CAD-System das VR-Modell neu aufgebaut bzw. aktualisiert wird.

Bei der Arbeit mit dem VR-System werden über Benutzungsfunktionen Objekte des Szenegraphen manipuliert und der aktualisierte Szenegraph anschließend wieder visualisiert. Die mögliche Variation der Visualisierung wird durch die implementierten Funktionen definiert und ist vom Nutzer nicht beeinflussbar.

Ein typisches, für den Einsatz im Engineering vorgesehenes VR-System, ist die VDP (Visual Decision Platform) der Firma ICIDO [3]. An den Systemkern mit Szenegraph-Modell und Renderer sind verschiedene Module (Montage/Demontage, Menschmodell, flexible Bauteile, …) angelagert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit zur Entwicklung und Einbindung eigener Module.

4 Lösungsansatz für die integrierte Visualisierung

4.1 Datentechnische Integration

Im Ergebnis des Engineeringprozesses entsteht die für die fertigungstechnische und betriebswirtschaftliche Handhabung notwendige Produktbeschreibung. Grundlegendes Ordnungsmerkmal ist die hierarchisch aufgebaute Produktstruktur die sich auch in Softwarewerkzeugen wie CAD-Systemen wiederfindet.

Die Verwaltung der Produktstruktur und damit die Verknüpfung aller am Entwicklungsprozess beteiligten Systeme erfolgt mit einem PDM-System, das die mit unterschiedlichen Werkzeugen generierten Datenbestände in Beziehung setzt. Die Verwaltung von Simulationsdaten im Kontext Produktstruktur mittels PDM-System ist noch nicht durchgängig etabliert, aber Gegenstand aktueller Arbeiten in der Industrie [4]. Darauf aufbauend ist ein Konzept zu entwickeln, mit dem Berechnungsergebnisse und Produktstruktur im PDM-System verknüpft sowie in einem VR-System gemeinsam mit den Geometriedaten präsentiert werden.

In den letzten Jahren wurde von den Autoren eine integrierte Arbeitsumgebung entwickelt, in der Design-Prozesse sehr effizient abgewickelt werden können [5]. Jeder Produktentwickler soll neben CAD auch VR nutzen können, ohne sich Gedanken über die Datenaufbereitung, das Erstellen von VR-Szenen oder die Aktualität der Modelle machen zu müssen. Voraussetzung dafür ist die konsistente Verwaltung von Produktstruktur, nativen CAD-Files und allen VR-Daten in einem PDM-System wie mySAP/PLM [6]. Bei der Umsetzung wurde auf die Integrationsplattform J2xPLM des Dresdner Unternehmens xPLM zurückgegriffen. Erweitert wurde die Plattform um einen VR-Connector. Dieser steuert aus dem CAD-System (z.B. SolidWorks, CATIA) das VR-System (z.B. ICIDO) und erlaubt die direkte Kommunikation zwischen VR- und CAD-System. Die für die Visualisierung benötigten VR-Files werden durch einen Konverter immer dann erzeugt, wenn ein CAD-File erstmals oder nach Änderungen ins PDM-System eingecheckt wird. Dieses Systemkonzept wird zum Zweck der Visualisierung von Simulationsergebnissen in VR erweitert (Bild 3).

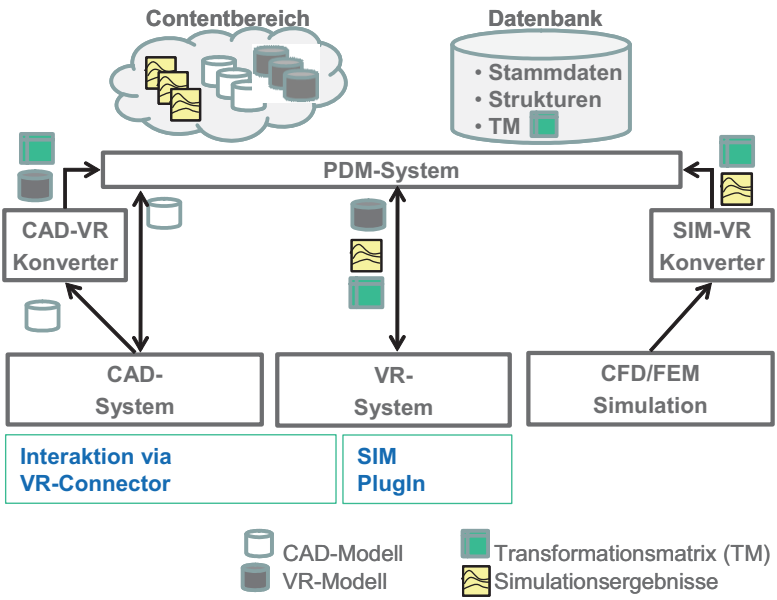


Bild 3: Architektur der CAD-VR-PLM-Integration

Die Ergebnisse von Simulationsrechnungen werden nach entsprechender Aufbereitung durch den SIM-VR Konverter im PDM gespeichert und mit der Produktstruktur verknüpft. Bei Bedarf können sie dann durch den VR-Connector schnell zusammen mit den Geometriemodellen ins VR-System geladen werden. Im VR-System werden zusätzliche Funktionen zur Darstellung der Simulationsergebnisse als PlugIn bereitgestellt, um eine Ergebnisbewertung zu erlauben

4.2 SIM-VR Konverter

Die klassische Vorgehensweise zur Visualisierung von wissenschaftlichen Daten beinhaltet verschiedene Schritte der Datenverarbeitung mit dem Ziel, aus den Ergebnisdaten der Berechnung eine geeignete grafische Repräsentation des komplexen Sachverhaltes zu erzeugen. Die einzelnen Schritte der so genannten Visualisierungspipeline werden mit Filtering, Mapping und Rendering bezeichnet.

Je nach Untersuchungsaufgabe müssen die Parameter der Visualisierungspipeline variiert werden. Nach dem Extrahieren, Glätten und Korrigieren der Simulationsdaten

(Filtering) wird eine Daten-zu-Geometrie-Abbildung durchgeführt (Mapping). Hierfür werden die nichtgeometrischen Daten auf geometrische Primitive (Pfeil, Kugel, Fläche) und ihre zugehörigen Attribute wie Farbe oder Skalierung abgebildet [7].

Im Bild 4 sind die Schritte der Visualisierungspipeline den Softwarekomponenten SIM-VR Konverter und SIM Plugin zugeordnet. Diese Teilung wird vorgenommen, um Rechenzeit während der Designbeurteilung im VR-System zu sparen. Das Filtern und Mappen der Simulationsergebnisse wird in einem separaten vorverarbeitenden Prozess im Batch-Betrieb realisiert. Zur Laufzeit des VR-Systems kann der Renderingprozess auf Grundlage dieser vorverarbeiteten Daten schnell ausgeführt werden.

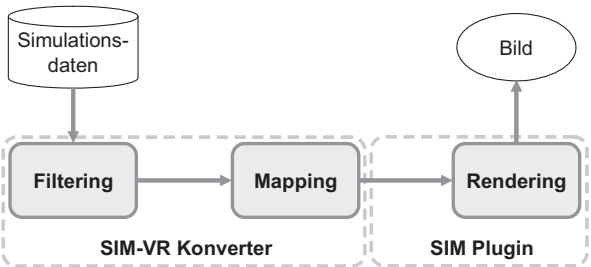


Bild 4: Visualisierungspipeline (vgl. [7])

Unter Berücksichtigung des Produktbezuges enthält die Vorverarbeitung der Ergebnisdaten ergänzend zum Visualisierungsprozess folgende Schritte:

- die Positionierung der Geometriedarstellung in Relation zur Produktgeometrie,
- die Transformation der Ergebnisdaten in eine mit der Datenstruktur des VR-Szenegraphen konforme Form,
- die Berechnung VR-konformer Darstellungen dynamischer Abläufe und
- das Speichern der vorverarbeiteten Daten im PDM.

Um einen schnellen Wechsel zwischen einzelnen Alternativen der Ergebnisdarstellung zu realisieren wird eine Auswahl verschiedener Darstellungsvarianten berechnet und gespeichert. Solche Darstellungsvarianten beinhalten beispielsweise ein Vektorfeld für die Geschwindigkeit, einen Farbplot für die Vergleichsspannung oder Iso-Flächen für Druck oder Temperatur.

Simulationsergebnisse können ein dynamischen Verhalten aufweisen. Zur Darstellung zeitlich veränderlicher Ergebnisdaten können verschiedene Lösungsstrategien verfolgt werden. Eine Möglichkeit ist die Berechnung einer kompletten Darstellung für jeden Zeitschritt. Bei der Visualisierung wird dann über das SIM Plugin ein automatisches Laden und Entladen der zeitlich aufeinander folgenden Darstellungen gesteuert und die entsprechende Funktion des VR-Systems genutzt. Für den Nutzer entsteht so der Eindruck einer animierten VR-Szene. Sollen animierte Daten für verschiedene Darstellungsvarianten bereitgestellt werden, wird für jede ein eigenes Set an Dateien erzeugt. Mit der Nutzung des PDM zur Verwaltung der konvertierten Daten bleiben die hierdurch entstehenden Datenmengen beherrschbar.

Ein andere Lösung für dynamische Darstellungen ist möglich, wenn die Topologie der Grafik (Topologie: Anzahl und Art der Geometrieprimitive) über alle Zeitschritte gleich ist und sich nur die Parameter Farbe, Größe und Lage der Geometrieprimitive (Pfeile, Kugeln, Flächen) unterscheiden. Der SIM-VR Konverter speichert die Topologie und die Parameter jeweils in einer separaten Datei ab. Während des Renderings werden die Geometrieprimitive mit den Parametern in Beziehung gesetzt und visualisiert. Die Parameterdatei wird schrittweise gelesen und die Geometrieobjekte werden entsprechend der Parameter eines Zeitschrittes transformiert. Erfolgt die Transformation der Geometrien in entsprechend schneller Abfolge, hat der Betrachter auch hier den Eindruck einer Animation.

4.3 SIM Plugin

Wesentlicher Bestandteil von Visualisierungs-Software sind Funktionen zur Untersuchung der dargestellten Daten. Mit diesen Funktionen - z.B. Zoom- oder Perspektiveinstellung, Beleuchtung - wird das Rendering der gefilterten und auf Geometrieobjekte gemappten Daten beeinflusst.

Mit der Bereitstellung der Ergebnisdaten für die VR-Umgebung ist auch die Implementierung von Funktionen zur Exploration der Daten notwendig. Das SIM Plugin nutzt dazu die Funktionen des VR-Systems, um ein speziell angepasstes Rendering der Simulationsdaten zu steuern.

Der zusätzliche Funktionsumfang zur Manipulation der Ergebnisdarstellung innerhalb des VR-Systems umfasst beispielsweise dynamisch positionierbare Schnittebenen, Funk-

tionen zur Steuerung der Sichtbarkeit einzelner Geometrieelemente oder Elementgruppen. Strömungslinien innerhalb eines Strömungsfeldes können mit punktuell erzeugten Kugeln, die sich abhängig von Größe und Richtung des Geschwindigkeitsvektors durch die virtuelle Umgebung bewegen, anschaulich visualisiert werden.

Neben den Funktionen zur Untersuchung der Simulationsergebnisse beinhaltet das SIM Plugin auch Funktionen zum Umschalten zwischen einzelnen im Rahmen der Vorverarbeitung erstellten Darstellungsvarianten.

Funktionen zur Selektion der Ergebnisdaten sind direkt in die Oberfläche des CAD-Systems durch Erweiterung des VR-Connectors zu integrieren. In diesem sind alle Funktionen konzentriert, die auf das PDM-System zugreifen. Damit kann der Konstrukteur aus seiner gewohnten Arbeitsumgebung heraus CAD-Daten und zugeordnete CFD- oder FEM-Daten wählen und an das VR-System zur Visualisierung übergeben.

5 Ausblick

Die folgenden Arbeiten am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD zur integrierten Visualisierung von Simulationsergebnissen in einer VR-Umgebung werden sich mit der Implementierung des SIM-VR Konverters als zentraler Komponente der Integrationslösung befassen. Ausgangspunkt sind Ergebnisdaten von Strömungsberechnungen, die im CGNS-Format vorliegen [8]. Als Integrationsplattform ist das Softwaresystem VDP2007 der Firma ICIDO geplant.

In einem ersten Schritt zur Implementierung des SIM-VR Konverters sind Softwaresysteme zur Verarbeitung von CFD-Daten hinsichtlich verfügbarerer Programmierschnittstellen zu evaluieren. Hierbei sind vor allem Funktionen, welche das Filtern und Mappen der Ausgangsdaten in eine separate Datei realisieren von Interesse.

Literatur

[1] http://www.avs.com/software/soft_t/avsxps.html

[2] http://www.visenso.de/leistungen/software.html

[3] http://www.icido.de/de/Produkte/VisualDecisionPlatform.html

[4] http://www.prostep.org/de/projektgruppen/simpdm/, *Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung - die Arbeitsgruppe SimPDM*

[5] Stelzer, R.; Steger, W.: *Process Integration of a CAD-VR Workstation. In Product Data Journal*, ProSTEP IVIP, 2007

[6] Stelzer, R.; Steger, W. und Saske, B.: *Produkt Lifecycle Management – Quelle und Basis AR-basierter Wartungsunterstützung in: Gausemeier, J.; Grafe, M.; Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*. HNI-Verlagsschriftenreihe Band 167; Paderborn, 2005

[7] Schumann, H.; Müller W.: *Visualisierung – Grundlagen und allgemeine Methoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000

[8] Rumsey, C.; Poirier, D.; Bush, R; Towne, C.: *CFD General Notation System – A Users's Guide To CGNS.* Document Version 1.1.12, CGNS Version 2.5, http://www.cgns.org

Wasserkraft – Ein konstruktiver Blick in die Zukunft

Jana Hadler, Klaus Brökel

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD, Universität Rostock
Albert-Einstein-Straße 2, D-18059 Rostock
jana.hadler@uni-rostock.de; klaus.broekel@uni-rostock.de
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Die Energie von fließendem Wasser ist der Mensch versucht, sich immer wieder zu Nutze zu machen. Ein Blick in die Historie zeigt, dass dieses über Jahrhunderte auf vielfältige Weise versucht wurde und mit zum Teil erstaunlichen Ergebnissen auch gelang. Im Zusammenhang mit dem EU-Projekt* ***HYLOW****, bewilligt über das 7. Europäische Rahmenprogramm zum Punkt Energie, wird die Thematik „Wasserkraft" neu aufgerollt.* ***HYLOW*** *bedeutet „Hydropower converters for very low head differences" und grenzt die Forschungsarbeit auf Kleinwasserkraft mit Fallhöhen bis 2,5 m ein. Das ist nicht unbedingt neu, jedoch ist die Forschung mit Hinblick auf die zur Neige gehenden natürlichen Ressourcen zwingend notwendig. Einschränkungen sind nicht nur in der Fallhöhe, sondern auch in der Fließgeschwindigkeit und in der Verwendung des Materials zu erwarten. Gepaart mit der Forderung nach Mobilität, wird ein komplexes Produkt entstehen, welches in ökonomischer, ökologischer und natürlich konstruktiver Hinsicht überzeugt.*

Abstract: *Man is always tempted to utilize the energy created by streaming water. Looking back into history, this has been tried in various ways (in the last centuries) and at times achieved with surprising results. The EU-project* ***HYLOW****, approved by the Seventh Framework Programme for Research and Technological Development (FP7) in the section "Energy", revives the idea of waterpower.* ***HYLOW****, short for Hydropower converters for very low head differences focuses its research on small hydropower plants with head differences of up to 2.5 m. This is not an entirely new research topic, but of undeniable importance in view of declining natural resources. Apart from very low head differences, restraints concerning flow velocity and the usage of material can also be expected. Taking into account the postulation for mobility, the idea is to create a complex product, with convincing features in terms of economy, ecology and of course technical realisation.*

Stichwörter: *Wasserkraft, Kleinwasserkraft, Wasserrad, geringe Fallhöhen*

Keywords: *Hydropower, Small Hydropower, Waterwheel, very low head differences*

1 Ein historischer Kurzüberblick

Die Energie des Wassers in Bächen und Flüssen begann der Mensch schon früh für sich zu nutzen. Ursprünge dieser Energienutzung liegen weit vor Beginn der Zeitrechnung.

Erste Konstruktionen antiker Wasserräder sind in den Abhandlungen von Vitruv (römischer Architekt, Ingenieur und Schriftsteller – um 1 v.u.Z.) beschrieben.

Auch schwimmende Wasserkraftanlagen mit geringen Fallhöhen, wie im Projekt HYLOW vorgesehen, sind prinzipiell keine neue Erfindung. Schiffsmühlen, auf schwimmenden Plattformen errichtet, wurden über Jahrhunderte hinweg an den strömungsstärksten Stellen in vielen Flüssen fixiert. Zu jenen Zeiten für die Energieversorgung beim Mahlvorgang genutzt, soll heute die durch schwimmende Wasserkraftanlagen erzeugte Energie umgewandelt, weitergeleitet und anderen Abnehmern zugeführt werden. Um den Wirkungsgrad im Vergleich zu den Schiffsmühlen zu erhöhen, bedarf es einiger konstruktiver Veränderungen.

2 Was will HYLOW?

Zusammen mit neun anderen europäischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist die Universität Rostock an einem Projekt beteiligt, welches innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogrammes von der Europäischen Union gefördert wird und auf 4 Jahre angelegt ist. Mit dem Titel „Hydropower converters with very low head differences“ identifiziert sich die Entwicklung von Kleinwasserkraftanlagen für folgende drei Anwendungsbereiche:

- Hydropower Machine: Einsatz in Flüssen mit Fallhöhen < 2,5 m
- Free Stream Energy Converter: Einsatz in Freistromumgebungen
- Micro Turbine: Einsatz in Wasserversorgungssystemen

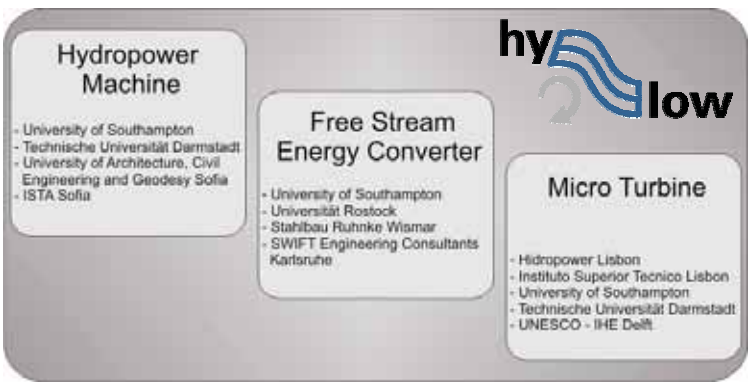


Bild 1: Anwendungsbereiche mit jeweiligen Partnern

Bild 1 bietet eine Übersicht der Anwendungsbereiche mit den jeweiligen Projektpartnern.

Im Folgenden wird der Anteil der Universität Rostock an der Entwicklung des Free Stream Energy Converters (FSEC) betrachtet.

Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD der Universität Rostock ist gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Meerestechnik für den geometrischen Entwurf des Großmodells zuständig. Die permanente konstruktive Begleitung für diesen Entwurf ist dabei ebenso erforderlich wie die Überwachung des Verhaltens des ausgebrachten Modells im Feld. Die Standortsuche und - analyse ist eine Aufgabe des Küstenwasserbaus der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Für den ersten Forschungsstandort wird die nähere Umgebung Rostocks bevorzugt, um einerseits eine permanente Überwachung zu gewährleisten. Andererseits kann damit eine schnelle Reaktion auf ungünstige Modellausführungen erfolgen. Der Ausbringungstermin wird im März 2010 liegen, um die im Frühjahr erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten zu nutzen (ca. 1 – 1,5 m/s). Das in Rostock erprobte Großmodell wird zum späteren Projektzeitpunkt ebenfalls unter Einfluss von Gezeiten und Schiffsverkehr getestet.

Ein Hauptthema in diesem Projekt ist die Forderung nach dem Einsatz einer mobilen Wasserkraftanlage in wirtschaftlich unterentwickelten Ländern. Zielsetzung in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung eines Prototypen, der sowohl die konstruktiven Bedingungen erfüllt als auch die Herstellung und anschließende Instandhaltung im Low-Budget-Bereich ermöglicht.

3 Bisher Erreichtes - Zwischenergebnisse

Damit die bisherigen Erfolge eingeordnet werden können, bedarf es zunächst einiger Vorbetrachtungen:

Kleinwasserkraft mit geringen Fallhöhen ist eine bedeutende Energieressource, deren ungenutzte Potentiale in Großbritannien auf 600 bis 1000 MW und in Deutschland auf mehr als 500 MW geschätzt werden [1]. Im Großen und Ganzen sind gegenwärtig genutzte Verfahren weder ökonomisch zu betreiben noch ökologisch zufriedenstellend. Um diese Lücke zu schließen, erfolgt die Entwicklung und Optimierung einer mobilen Wasserkraftanlage (Leistungsbereich von 50 bis 1000 kW) zur Nutzung geringer

Fallhöhen, mit bestmöglichem Kosten - Nutzen - Verhältnis und der Konformität mit heutigen Umweltschutzanforderungen.

3.1 Auf dem Weg - Erste Versuche

Zur besseren Veranschaulichung der Dimensionen des ersten Versuchsmodells dienen an dieser Stelle die Parameter: Raddurchmesser (500 mm) und - breite stehen im Verhältnis 3:1; die Gesamtbreite der Anlage beträgt 450 mm und der Kanal wird zu beiden Seiten um jeweils ein Drittel im Querschnitt verringert. Das Modell ist 1400 mm lang.

Bild 2: Auslaufseite eines Versuchsmodells

Theoretische Vorbetrachtungen und Berechnungen zu der in Bild 2 abgebildeten Modellanlage (ein ca. 1:9 großes FSEC - Modell) in Southampton ergaben, dass der Wirkungsgrad durch die Nutzung von hydrostatischen Druckunterschieden erhöht werden kann.

Das grundsätzliche Funktionsprinzip ist in Bild 3 veranschaulicht.

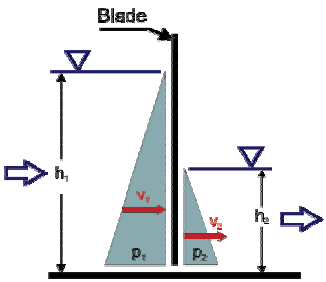


Bild 3: Geschwindigkeits- und Druckverteilung am Wasserrad-Blatt

Die gemessenen Leistungen erreichten bisher lediglich zwei Drittel der theoretisch angenommenen Leistungen. Versuche mit unterschiedlichen Parametereinstellungen, mit geometrisch veränderten Ein- und Ausläufen sowie verschiedenen Spaltbreiten und Radeintauchtiefen widerlegten zum Teil vorangestellte Betrachtungen und führten zu neuen Annahmen, die es im Weiteren praktisch zu untersuchen gilt. Empfehlungen zur Beachtung der Auftriebsproblematik, der Anbringung von Abrisskanten zur Minimierung von Verwirbelungen, der Materialaussparung bei den Seitenwänden des Wasserrades zur besseren Belüftung sind zu berücksichtigen und im Detail zu präzisieren. Völlig offen ist die Integration der Schwimmkörper, der Mess- und Überwachungstechnik sowie der Lastabnahme.

3.2 Arbeit mit Studenten und Ergebnisse

Im Rahmen der Lehrveranstaltung *Integrierte Produktentwicklung* im SS 2008 haben Studierende im 6. Fachsemester an der Universität Rostock die Aufgabe zur Entwicklung einer Vorrichtung zur Energieerzeugung mittels Wasserkraft bearbeitet. Vorgegebene Eckdaten aus dem HYLOW - Projekt sowie die Bedingung, sich nur mit dem Schwimmkörper inklusive Ein- und Ausströmkanal zu befassen, brachten bemerkenswerte Ergebnisse. Neben der Ermittlung des Standes der Technik über Literatur- und Patentrecherchen, der Erstellung einer Anforderungsliste, der Erarbeitung von Varianten und Bewertung dieser erfolgte die Modellierung der optimalen Variante in Pro/ENGINEER.

Ausgewählte Ponton - Modelle teilweise mit Wasserrad sind nachfolgend in den Bildern 4 - 6 dargestellt:

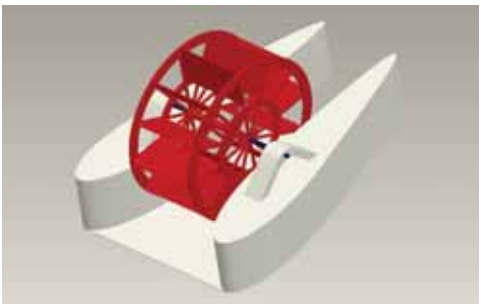


Bild 4: Darstellung des Pontons mit Rad und Welle

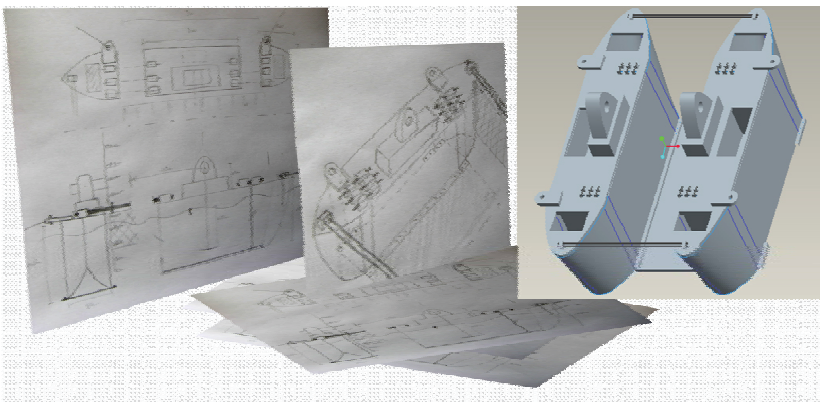


Bild 5: Entwurfsskizzen und modellierter Ponton

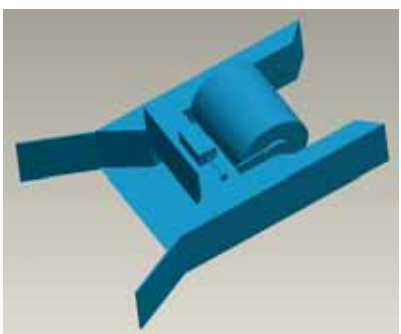


Bild 6: Ponton mit vertikal verschiebbarem Schott und Stellgatter

3.3 Modellversuche in der Strömungshalle

Die numerische Modellierung und Simulation des strömungstechnischen Verhaltens von Schwimmkörpern und die Verifikation der Ergebnisse mit experimentellen Untersuchungen stellen ein komplexes Problem dar. Die Annäherung an eine optimale gestalterische Lösung erfolgt durch eine modular aufgebaute und damit beliebig variierbare Wasserkraftanlage, bestehend aus Steck- und Schraubverbindungen. Bei den verwendeten Materialien handelt es sich größtenteils um Stahlblech, wobei das Grundmodell bei Bedarf um strömungsverbessernde Elemente aus Kunststoff oder Holz erweiterbar ist.

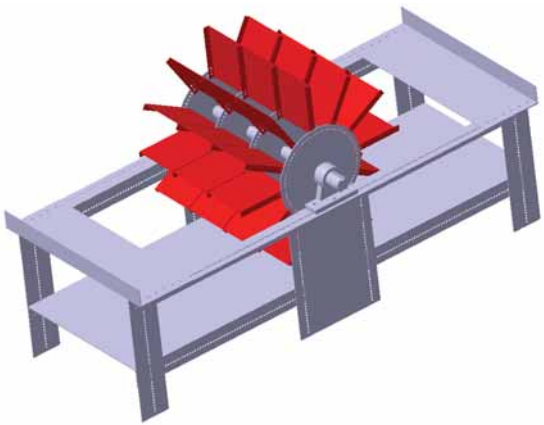


Bild 7: Modell ohne Schwimmkörper für Versuche im Strömungskanal in Rostock

Das in Bild 7 dargestellte Modell wird im August 2008 in der Strömungshalle der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik erprobt. Es können Länge und Breite, Rad- und Schaufelstellung sowie die Anzahl der Schaufeln verändert werden. Die Anbringung ergänzender Bauteile zur Strömungsoptimierung sowie transparenter Kunststoffwände zur Kanalisierung und Beobachtung des Wassers ist problemlos umsetzbar. Sind alle möglichen Zusammenbauvarianten getestet worden, wird die Schwimmkörperdimensionierung vorgenommen.

4 Zusammenfassung

Es ist unbestreitbar, dass Wasserkraftwerke in naher Zukunft wieder immens an Bedeutung gewinnen. Hauptgründe dafür sind zum einen der natürliche Wasserkreislauf, der die Wasserkraft zu einem permanenten Energieträger macht, und zum anderen wird damit eine Verzögerung des Versiegens anderer natürlicher Ressourcen herbeigeführt.

HYLOW befindet sich bei dem FSEC - Projekt in der Phase der Grundlagenversuche. Es sollen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und geringen Fallhöhen möglichst hohe Wirkungsgrade erzeugt werden. Theorien dazu gibt es viele, jedoch sind nicht alle unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen praxistauglich. Mit der Auswertung unserer Versuchsreihe im Strömungskanal wird ein Konzept für das Großmodell, welches im Feld zum Einsatz kommt, erarbeitet und umgesetzt.

Literatur

[1] Seventh Framework Programme, Theme [FP7-Energy-2007-1-RTD]: *Annex I – „Description of Work“*. Project Full Title: Hydropower converters with very low head differences, Grant agreement no.: 212423

Strategische Projektbewertung in der Vorentwicklung produzierender Unternehmen

Stephan Oertelt, Karl-Heinrich Grote

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Inhalt: *Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Bewertung von Projektvorschlägen im Innovationsmanagement der automobilen Produktion. Ziel ist die Festlegung eines strategieorientierten Projektprogramms innerhalb eines budgetären Verfügungsrahmens. Unterstützt wird diese Aufgabe durch einen systematischen Ansatz, welcher sich phasendurchgängig von der Innovationsstrategie bis zum Transfer erstreckt und ganzeinheitlich Prozesse, Methoden, Instrumente, Führung und Kommunikation mit einbezieht. Zur Anwendung kommen Bewertungsmethoden wie Nutzwertanalyse, ABC-Analyse, Paarweiser Vergleich bei gleichzeitiger Nutzung der Expertendiskussion. Diese Verfahren strukturieren die Informationsvielfalt und verringern die Komplexität der Entscheidungsfindung. Das zentrale Element zur Unterstützung der Entscheidungsfindung ist eine Bewertung, bei der alternative Projekte nach ihren Potenzialen und ihren Risiken dargestellt werden. Eine exemplarische Validierung des entwickelten Ansatzes findet an Hand eines Fallbeispiels im Innovationsmanagement der Automobilindustrie statt.*

Abstract: *This paper focuses on the evaluation of project proposals within the innovation management of manufacturing industries. The goal is to define a strategy-oriented project program within a budgetary framework. This task requires a systematic approach which structures the wide range of information and makes the complexity of decision making controllable. Within the process framework of decision preparation and decision making, a coherent combination of adequate methods, processes, tools, communication and leadership is indispensable. For this reason, a set of standardized methods comprised of ABC-analysis, value analysis, portfolio analysis, paired comparison and expert discussion is suggested. Moreover, the central decision-making supporting element is the evaluation of alternative projects with regard to their potential and risk.*

Stichwörter: *Vorentwicklung, Methoden und Prozesse, Strategisches Projektcontrolling, Innovationsmanagement, Multiprojektmanagement.*

Keywords: *Pre-development, methods and processes, strategic project controlling, innovation management, multiproject management.*

1 Herausforderungen an das Innovationsmanagement

Zu den heutigen Herausforderungen an produzierende Unternehmen zählen die Globalisierung der Märkte, die verschärfte Wettbewerbersituation, ein Trend zur Inhomogenität der Kundenstrukturen, die zunehmende Kapitalintensität von Forschung, Entwicklung und Produktion, die gesteigerte Komplexität und Vernetzung der Technologien und Prozesse, die differenzierten Share- und Stakeholder-Interessen sowie die Verkürzung der Innovationszyklen [1,2]. Innovationen werden in diesem Zusammenhang als ein Instrument zur Stärkung der Marktposition, für zukünftiges Wachstum sowie zur Kostenreduktion angesehen [30]. Das Grundmodell des Managements von Innovationen umfasst deren Evolutionsstufen an Hand fünf aufeinander aufbauender Phasen [3,4,5,6,7,8]: Identifikation des Innovationsbedarfs, Ideengenerierung, Bewertung der Ideen, Umsetzung und Kontrolle des Projektprogramms sowie Ergebnistransfer der abgeschlossenen Innovationsprojekte. Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt auf der dritten Phase, der „Inventionsbewertung“ (Bild 1). Diese frühe Phase im Produktentwicklungsprozess ist geprägt von einer hohen Unsicherheit der vorliegenden Erkenntnisse, welche eine einheitliche Bewertung und Vergleichbarkeit der Inventionen erschwert. Boutellier verdeutlicht diesen Zustand an Hand eines Entwicklungstrichters [9,10], der die Veränderung der Anzahl und Strukturiertheit der Innovationen bei dem Durchlauf durch die verschiedenen Phasen des Innovationsprozesses aufzeigt:

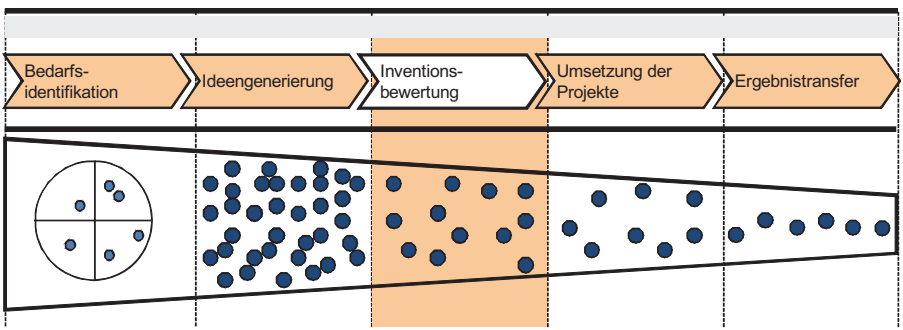


Bild 1: Innovationsphasen und Entwicklungstrichter (in Anlehnung an [9])

2 Probleme und Anforderungen bei der Inventionsbewertung

Ausgangspunkt der Inventionsbewertung ist ein Überangebot an Erfolg versprechenden Projektideen (Inventionen), die sich um knappe Unternehmensressourcen bewerben [17]. Ziel des Verfahrens ist die Identifizierung des übergreifenden Gesamtoptimums für das Unternehmen hinsichtlich eines strategiekonformen Innovationsprogramms. Diesbezüglich ergeben sich die globalen sowie operativen Herausforderungen an das zu entwickelnde Konzept:

2.1 Einseitige Förderung kurzfristiger Innovationen

Innovationen [11 et al.] differenzieren sich hinsichtlich ihres Neuheitsgrads (*Innovationsgrads)* [12,14], der sich auf einer kontinuierlichen Bandbreite von inkremental bis radikal erstreckt. Niedrige Innovationsgrade bzw. inkrementale Innovationen [12] benötigen in der Regel kürzere Entwicklungszeiten bis zur Serienreife. Die alleinige Betrachtung des Innovationsgrads führt jedoch zu keinem Rückschluss auf einen späteren Erfolg der Innovation [5,6,14]. Innovationen jeglichen Neuheitsgrads können gleichermaßen zum Unternehmenserfolg beitragen, wenn eine optimale Verteilung von Innovationsarten vorliegt [3]. In der Unternehmenspraxis erfolgt jedoch eine überproportionale Zuteilung von Finanzmitteln zu Gunsten inkrementeller Weiterentwicklungen [15] und kurzfristiger Erfolge [31]. Dies unterstreicht den Bedarf nach einer Bewertungsmethodik, die eine ausgewogene Verteilung der Innovationen unterstützt.

2.2 Wertorientierter Ressourceneinsatz

Eines der Ziele bei der Bewertung von Innovationen ist die Identifikation ihres Wertbeitrags für das Unternehmen [9]. Die Einschätzung, welches Projekt „das Richtige“ ist, orientiert sich an einer Vielzahl von Kriterien, wie z.B. der strategischen Ausrichtung des Unternehmens oder an den Potenzialen, die ein Innovationsprojekt verspricht. Der langfristige Erfolg des Unternehmens hängt von den Entscheidungen ab, die in dieser frühen Phase gefällt werden [11]. Ein frühzeitiges Herausfiltern der falschen Projekte vermeidet zusätzlich das progressive Entstehen von Kosten, die in den weiteren Entwicklungsphasen eines Projekts anfallen [16]. Eine Anforderung an den zu entwickelnden Ansatz ist daher die Priorisierung von Innovationsprojekten unter

Berücksichtigung von strategischen Rahmenbedingungen und wertorientierten Erfolgskriterien.

2.3 Risikointegrierte Projektbewertung

Trotz der Chancen, die eine Innovation längerfristig verspricht, führt ihre Entwicklung anfänglich zu einer Steigerung der Komplexität, des Konfliktgehalts und der Unsicherheit [12]. Ein zunehmender Neuheitsgrad ist gekoppelt mit einer sinkenden Reife und steigenden Risiken. Häufig anzutreffende Reaktion in der Praxis ist jedoch die Vermeidung jeglicher Risiken aus Angst vor den Konsequenzen bei Fehlschlägen [18]. Diese Vorgehensweise ist kontraproduktiv, da Risiko und Unsicherheit integrale Bestandteile des Innovationsmanagements sind [32]. Ein projektübergreifend eingesetztes Risikomanagement, welches nach einheitlichen Kriterien arbeitet, fördert die Transparenz von Risiken und eine unternehmensweite „Risikokultur“, die lernt mit Risiken umzugehen, anstatt diese per se zu vermeiden. Zusätzlich zu wertorientierten Kriterien müssen demnach Risikokriterien Bestandteil der Inventionsbewertung sein [14].

2.4 Komplexitätsreduzierung

Gemäß den oben beschriebenen Anforderungen muss eine Bewertung von Innovationen nach einer Vielzahl von Kriterien, wie der Strategiekonformität, den Innovationspotenzialen und -risiken erfolgen. Zusätzlich sind in einer Multiprojektlandschaft Projekte verschiedener Fachdisziplinen und unterschiedlicher Innovationsgrade vertreten. Trotz dieser Diversität sind die Innovationen objektiv miteinander zu vergleichen. Die Bewertung von Inventionen im Innovationsmanagement ist daher ein komplexer Informationsverarbeitungsprozess, der die Datenverarbeitungskapazitäten menschlicher Entscheidungsträger in zunehmendem Maße beansprucht [17]. Der Einsatz systematischer Verfahren strukturiert die Informationsvielfalt, quantifiziert die Entscheidungsparameter und verringert somit die Komplexität der Entscheidungsfindung. Ein formalisiertes Vorgehen gewährleistet bei einer steigenden Anzahl von Auswahlmöglichkeiten ein objektiveres Ergebnis und führt zu einer höheren Entscheidungsqualität [20].

2.5 Operative Anforderungen

Die vorgestellten, globalen Anforderungen an die Konzeption einer Bewertungsmethodik werden ergänzt um Anforderungen aus der Unternehmenspraxis. Diese „weichen“ Faktoren in Unternehmen sind von Bedeutung für eine erfolgreiche Umsetzung von Projekten [11,27]. Zu diesen gehören die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung bei der Auswahl von Innovationsprojekten und die Kommunikation der Vorgehensweise, um die Akzeptanz der Entscheidung zu gewährleisten.

3 Hypothese der Befähigergrößen und Zielsetzung

Aus diesen Anforderungen lassen sich die wesentlichen Befähigergrößen für die Inventionsbewertung ableiten: Prozess, Methode, Instrumente, Kommunikation und Führung. Vor dem Hintergrund der oben dargestellten Herausforderungen ist es das übergeordnete Ziel dieser Untersuchung, ein Konzept zur Bewertung von Projekten zu entwickeln, welches im Innovationsmanagementprozess sowohl prozessphasenübergreifend wirkt (horizontale Durchgängigkeit) als auch die Befähigergrößen integriert (vertikale Integrität). Die Befähigergrößen übernehmen im vorliegenden Interaktionsprozess zwischen den Ebenen des strategischen Managements und des operativen Projektmanagements [28] die Brückenfunktion:

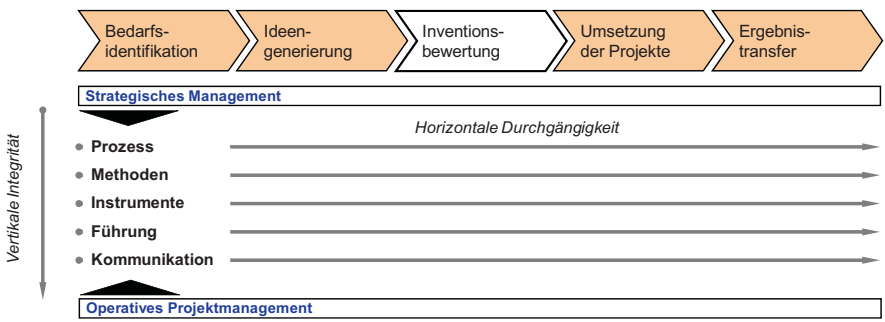


Bild 2: Horizontale Durchgängigkeit und vertikale Integrität

Die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundgedanken zu den Befähigergrößen werden in dem folgenden Absatz kurz dargestellt. Die weiterführende Konzeption beschränkt sich auf die Beschreibung der zwei Befähigergrößen *Prozess* und

Methoden und zeigt deren Wechselwirkungen in der Inventionsbewertungsphase exemplarisch auf.

3.1 Prozess und Methoden

Der *Prozess* ist das tragende Gerüst im Zusammenspiel der Befähigergrößen und gibt die logische und zeitliche Abfolge dieser vor. *Bewertungsmethoden* lassen sich allgemein in drei Ausprägungen unterteilen: Die qualitativen Verfahren beschreiben den Zielerreichungsbeitrag in nominaler Form, wie z.B. „weniger/mehr als vorher“. Zu diesen gehören z.B. die ABC-Analyse und der Paarweise Vergleich. Quantitative Verfahren erzeugen Aussagen, die durch Messung oder Berechnung einen exakten Zahlenwert liefern. Für die Bewertung von komplexen und unsicherheitsbehafteten Zusammenhängen in der frühen Phase kommen mehrdimensionale Bewertungsverfahren zum Einsatz [12]. Derartige Verfahren zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie zur Bewertung mehrerer Alternativen quantitative als auch qualitative Faktoren bei der Entscheidungsfindung berücksichtigen. Diese Verfahren werden somit den semiquantitativen Verfahren zugeordnet, deren qualitative Aussagen zwecks einer übergreifenden Vergleichbarkeit in Zahlenwerte transferiert werden [2,3]. Zu den Verfahren dieser Kategorie gehören z.B. die Wertanalyse und die Portfolioanalyse.

3.2 Instrumente

Mit *Instrumenten* sind in diesem Zusammenhang Informationssysteme und Softwaretools gemeint, die vor dem Hintergrund zunehmend standortübergreifend agierender Projektteams eine wesentliche Hilfestellung leisten. Als Beispiel können die Inventionen als *Steckbriefe* in einer standortunabhängig zugänglichen Datenbank beschrieben werden, in denen alle entscheidungsrelevanten Informationen zusammengetragen werden. Die Steckbriefe geben durch ihre vorgegebene Struktur einen Leitfaden bei der Ideenbeschreibung vor, gewährleisten die Vollständigkeit der Dokumentation und geben für den Entscheidungsprozess relevante Daten bedarfsgerecht wider.

3.3 Führung

In der frühen Phase der Produktentwicklung ist auf Grund des niedrigen Konkretisierungsgrades eine Führung mit visionären Vorgaben vorteilhaft. Führung schafft ein gegenseitiges Vertrauen und damit Abbau von unnötigen Kontrollmechanismen, Bürokratien und innerbetrieblichen Störeinflüssen. Dies beeinflusst die Kultur in einem Unternehmen, welche maßgebend ist für den Umgang mit Kreativität, Risiko, Wissensweitergabe und dem non-invented-here-Syndrom [27]. Klassische Führungsgrößen im Zusammenhang mit der Projektarbeit sind z.B. auch das Mentoren- oder Promotorenprinzip [29].

3.4 Kommunikation.

Die *Kommunikation* ist wie die *Führung* keine autarke Größe, sondern verbindet und verstärkt als Katalysator die synergetische Wechselwirkung zwischen den übrigen Befähigergrößen. Die Kommunikation von relevanten Informationen führt z.B. zu einem einheitlichem Verständnis oder einer Teilnahmebereitschaft und erleichtert damit die Bewertung und spätere Durchführung von Innovationsprojekten [33].

4 Gesamtprozess (horizontale Durchgängigkeit)

Für die Konzeption der horizontalen Durchgängigkeit ist die Festlegung von Schnittstellengrößen aus den Vorgängerphasen *Bedarfsidentifikation* und der *Ideengenerierung* notwendig, welche im folgenden inklusive ihrer Prozessschritte und Methoden beschrieben werden:

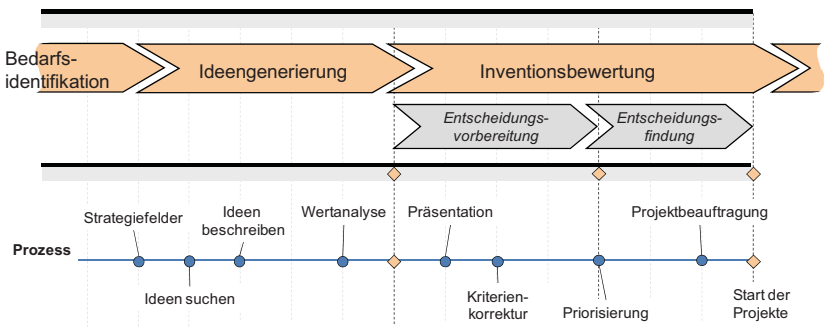


Bild 3: Prozessschritte

4.1 Bedarfsidentifikation

Der Innovationsprozess beginnt mit der Identifikation der Bedarfe für die nachfolgenden Teilprozesse, die als Eingangsgrößen in die *Ideengenerierung* und *Inventionsbewertung* eingehen:

Strategiefelder

Entscheidende Bedeutung kommt hierbei dem Wissen über die zukünftige Entwicklung des Umfeldes und der Ableitung von strategischen Herausforderungen für das Unternehmen zu. Unterstützt wird dieser Prozess durch geeignete Prognosemethoden [1,6], die die Komplexität der Unternehmensumwelt in kommunizierbare Strategien auflöst. Diese *Strategiefelder* sind ein Element der Innovationsstrategie und geben die Suchfelder vor, in denen Ideen generiert werden sollten.

Bewertungskriterien

Gemäß den Anforderungen erfolgt eine Bewertung von Inventionen an Hand von Potenzial- und Risikokriterien. Mögliche Potenzialkriterien zur Bewertung von Ideen könnten unter anderem sein: Wirtschaftlichkeit, Zeitersparnis, Flexibilitätssteigerung, Qualitätssteigerung oder Ressourceneffizienz bei der Fertigung, Bauraumgewinn, Emissions- oder Gewichtsreduzierung bei der Fahrzeugarchitektur. Für die Risiken eines Vorentwicklungsprojekts bieten sich beispielhaft folgende Faktoren an: Integrationsfähigkeit der Innovation in vorhandene Produkt- und Fertigungsstrukturen, Neuheitsgrad der Innovation sowie technische und zeitliche Zielerreichungswahrscheinlichkeit.

4.2 Ideengenerierung

Strategische Suchfelder geben die Leitplanken für die Ideenfindung vor. An Hand geeigneter Kreativitätstechniken [6,18] werden Ideen gesucht und einer groben Vorauswahl unterzogen. Erfolg versprechende Ideen, die *Inventionen* [12], qualifizieren sich für die nächste Prozessphase.

Wertanalyse

Mit Hilfe der Wertanalyse nach Zangemeister [21] lässt sich die Zweckmäßigkeit einer Invention gegenüber anderen konkurrierenden Alternativen durch einen dimensionslosen

Zahlenwert (Nutzwert) ausdrücken. Die Bewertung erfolgt durch ein mehrdimensionales Kriteriensystem, in dem die Inventionen an Hand einer Ordinalskala nach vereinbarten Kriterien bewertet werden. Durch Addition der so ermittelten Teilnutzwerte lässt sich der Gesamtnutzwert jeder Invention bestimmen und somit alle Alternativen in eine Rangfolge bringen. Entsprechend den Anforderungen wird die ursprünglich nur nach Erfolgskriterien ausgerichtete Nutzwertanalyse um eine weitere Dimension, den Risikowerten, ergänzt. Dieser Ansatz verspricht eine sowohl Erfolgs- als auch Risiko-orientierte Inventionsbewertung.

4.3 Entscheidungsvorbereitung und Entscheidungsfindung

Die Ergebnisse der Prozessschritte und Methodenbausteine der *Bedarfsidentifikation* und *Ideengenerierung* fließen als Eingangsgrößen in die Inventionsbewertung ein. Die Teilphase der *Entscheidungsvorbereitung* widmet sich der Aufbereitung, Plausibilisierung und Präsentation der relevanten Entscheidungsgrößen vor einem Entscheidungsgremium. Die Präsentation der Invention dient sowohl der inhaltlichen Diskussion als auch der Korrektur der vom Inventor ausgewiesenen Potenziale und Risiken, der Zuordnung zu einem der Strategiefelder und die notwendigen Ressourcenbedarfe. Im Zuge der iterativ stattfindenden Projektvorstellungen plausibilisiert sich das eingangs inhomogene Gefüge der Wertkriterien zu einem objektivierten Gesamtbild. Zur Entlastung der nachfolgenden Entscheidungsfindung kann eine Vorfilterung der Themen an Hand einer ABC-Analyse [26] vorgenommen werden. Die plausibilisierten Entscheidungsgrößen werden aus der *Entscheidungsvorbereitung* in die Phase der *Entscheidungsfindung* überführt. Diese Phase hat zum Ziel, in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Ressourcen eine priorisierte Auswahl an Inventionen in Form von Vorentwicklungsprojekten zu beauftragen.

Portfolioanalyse

Portfolios [22,23,24,25 et al.] erlauben eine ganzheitliche Betrachtung von bestimmten Sachverhalten bei gleichzeitiger Veranschaulichung komplexer Zusammenhänge. Für die vorliegende Problematik der Entscheidungsfindung bietet sich das Portfolio als visuelle Ergänzung der Wertanalyse an. Die Ergebnisgrößen der Wertanalyse werden über einen Algorithmus zusammengesetzt und auf die zwei Dimensionen der Matrix aufgetragen. Die Position einer Invention im Portfolio wird bestimmt durch den Risikowert auf der Abszisse und dem Potenzialwert auf der Ordinaten [9]. Soll eine Priorisierung alternativer

Inventionen erfolgen, so lässt sich dies an Hand einer Positionsdifferenz im Portfolio argumentieren. In der klassischen Portfolioanalyse wird die Matrix zur Ableitung von Handlungsempfehlungen in mehrere Segmente eingeteilt, denen jeweils Normstrategien unterliegen.

Das hoch aggregierte Niveau der Wert- oder Portfolio-Analyse birgt das Risiko, dass die vielfältig existierenden Potenziale eines Projekts nur unzureichend Berücksichtigung finden [17]. Die Genauigkeit der getroffenen Aussagen zu den Bewertungskriterien variiert Themen- und Neuheitsgrad-spezifisch [15] und mindert damit die die Aussagekraft der Verfahren. Es bietet jedoch einen Mehrwert bei der Visualisierung der abschätzbaren Kriterien, reduziert die Komplexität der Informationen und unterstützt durch ein schrittweises, strukturiertes Vorgehen. Die ausschließliche Verwendung semiquantitativer Methoden wie der Portfoliomethode oder der Wertanalyse ist für eine automatisierte Priorisierung jedoch nicht sinnvoll. Die eigentliche Entscheidungsfindung sollte im Rahmen einer Expertendiskussion stattfinden.

Paarweiser Vergleich

Für diese Diskussion bietet sich der *Paarweise Vergleich* [26] an, bei dem die Vor- und Nachteile jeder Invention gegeneinander abgewogen werden. Die Anwendung dieser Methode ist sinnvoll bis zu einer bestimmten Anzahl von Themen. Bei einer höheren Anzahl empfiehlt sich eine Vorfilterung durch ABC- Analyse [26] oder eine selektive Auswahl mit Hilfe der Portfoliosegmente. Ausgangsprodukt dieser Methode ist eine Rangliste an Themen, die den Abschluss der Priorisierungsphase bildet.

5 Zusammenfassung

Der Vorteil, den semiquantitative Verfahren zur Bewertung bieten, liegt zum einen in der besseren Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung begründet. Zum anderen bieten sie die Möglichkeit, dass die Argumente für eine Projektrealisierung einer genauen Prüfung unterzogen werden. Dies führt zu einer strukturierten und systematischen Diskussion während des Entscheidungsprozesses mit Blick auf die entscheidenden Faktoren. Mit Hilfe der visuellen Portfoliodarstellung kann darüber hinaus eine komplexitätsreduzierende Vergleichbarkeit hergestellt werden. Durch zusätzliche Verwendung intuitiv betonter Methoden lassen sich die Schwächen dieser Verfahren ausgleichen. Ergebnis dieser kombinierten Vorgehensweise ist eine objektivierte

Bewertung, bei der „Bauchentscheidungen“ deutlich reduziert sind und somit zur Akzeptanz der Entscheidungen beiträgt. Als zusätzlichen Erfolgsfaktor im Innovationsmanagement bestätigte sich zudem das synergetische Zusammenspiel der identifizierten Befähigergrößen.

Literatur

[1] Gausemeier, J., Fink, A., Schlake O., 1996, „Szenario-Management“, Hanser Verlag Wien

[2] Specht, G., Beckmann C., 1996, „F und E-Management“, UTB Verlag, Stuttgart

[3] Gerpott, T.J., 2005, „Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement“, Schäffer-Pöschel, Stuttgart

[4] Abernathy W.J, Townsend P.L, 1975, “Technology, Productivity and Process Change”, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 7, pp.379-396

[5] Brockhoff, K., 1999, „Forschung und Entwicklung. Planung und Kontrolle“, München

[6] Corsten, H., 2006, „Grundlagen des Innovationsmanagements“, Vahlen Verlag München

[7] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H., 2006, „Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung“, Springer Verlag Berlin

[8] Schlaak, T.M., 1999, „Der Innovationsgrad als Schlüsselvariable“, Wiesbaden

[9] Boutellier R., Völker R., Voit E., 1999, „Innovationscontrolling“, Hanser Fachbuch Verlag München

[10] Wheelright, S.C., Clark,K.B, 1992, “Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency, and Quality”, Free Press, New York

[11] Cagan, J., Vogel, C.M., 2002, “Creating Breakthrough Products: Innovation from Product Planning to Program Approval”, Financial Times Prentice Hall, Upper Saddle River

[12] Weule, H., 2001, „Integriertes Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Grundlagen, Strategien, Umsetzung“, Hanser Fachbuch

[13] Eversheim, W., 2002, „Innovationsmanagement für technische Produkte”, Springer Verlag, Berlin

[14] Hauschildt J., Salomo, S., 2007, „Innovationsmanagement“, Vahlen Verlag, München

[15] Christensen, C. M., 1999, “Innovation and the General Manager”, McGraw-Hill, Irwin, p.217

[16] Geschka, H., 1993, „Wettbewerbsfaktor Zeit“, Landsberg/Lech

[17] Hirzel, M., Kühn, F., Wollmann, P., 2006, „Projektportfolio-Management“, Gabler Verlag München, p.94, p.168

[18] Horsch, J., 2003, „Innovations- und Projektmanagement“, Gabler Verlag Wiesbaden, p.116

[19] Grote, K.-H., Gausemeier, J., Meerkamm, 2007, in: Krause, F.-L., Franke, H.-J., Gausemeier, J.,: „Innovationspotenzial in der Produktentwicklung“, Hanser Verlag, München, p.183

[20] Little, Arthur D., 1988, Innovation als Führungsaufgabe, Campus Verlag Frankfurt / New York

[21] Zangemeister, C., 1976, „Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen“, Ph.D thesis, TU Berlin

[22] Möhrle, M.G., 1988, „Das F&E Programm-Portfolio“, Technologie und Management Vol. 37, pp.12-19

[23] Pfeiffer, W., Weiß, E., 1995, „Methoden zur Analyse und Bewertung technologischer Alternativen“, Zahn: Handbuch Technologiemanagement, Schäffer-Pöschel. Verlag, Stuttgart, pp.663-679

[24] Michel, K., 1987, „Technologie im strategischen Management- Ein Portfolio-Ansatz zur integrierten Technologie- und Marktplanung“, Erich Schmidt Verlag, Berlin

[25] Krubasik, 1982, „Technologie- Strategische Waffe“, Wirtschaftswoche Vol.36, pp.30-46

[26] Lindemann, U., 2004, „Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden“, Springer Verlag, Berlin

[27] Oertelt, St., Grote, K.-H., 2006, “Resolving the obstacles concerning inter-team collaboration in a Design-Engineering environment”. In: Production Engineering. Proceedings of the PE2006 conference, Wroclaw: Politechniki Wroclawskiej, pp.367-378.

[28] Fiedler, R, 2005, Controlling von Projekten, Vieweg Verlag

[29] Betriebshütte, S.4-21

[30] Geschka, H., Innovationsmanagement, 1983, p.823

[31] Christensen, C.M., 05/2008, “Innovationskiller Kennzahlen”, in: Harvard Business Manager, p.60

[32] Littkemann, J., 2005, „Innovationscontrolling“, Vahlen Verlag, München, p.289

[33] Lühring, N., 2003, In: Herrstatt/ Verworn: „Management der frühen Innovationsphasen“, Gabler Verlag Wiesbaden, pp.117-144.

Simulationsmethoden und -werkzeuge der Kunststoffkonstruktion – Simulationskopplung mittels ICROS

Bettina Alber-Laukant, Andreas Dörnhöfer, Jochen Zapf, Frank Rieg

Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth
Universitätsstr. 30, D-95440 Bayreuth
Email: konstruktionslehre.cad@uni-bayreuth.de;
Internet: http://www.uni-bayreuth.de/departments/konstruktionslehre

Inhalt: *Durch die einfache und schnelle Formgebung werden immer mehr Konstruktionen aus Kunststoffen verwirklicht. Die Werkzeuge, die zur Produktentwicklung verwendet werden, stammen aber zumeist aus dem Bereich der metallischen Werkstoffe. Um die Effizienz des Produktentwicklungsprozesses bei Kunststoffen zu steigern, ist es essentiel,l CAx-Werkzeuge zu nutzen. Es wird der richtige Simulationseinsatz für Kunststoffe diskutiert. Zusätzlich werden materialspezifische Simulationen, wie Prozesssimulationen, mit werkstoffunspezifischen Simulationen, wie Strukturoptimierungsverfahren kombiniert. Am Beispiel eines neuartigen Lufterfrischerkonzeptes wird eine Gestaltoptimierung mit einer Prozesssimulation und einer Struktursimulation gekoppelt. Mit der Methode ICROS (Intelligent Cross-linked Simulations) wird die ideale Abfolge der zur Verfügung stehenden Methoden und Werkzeuge diskutiert.*

Abstract: *Due to simple and fast manufacturing for more and more products polymers are used. Tools used for product development mostly originate from the sector of metal like materials. In order to raise efficiency of the product development process of polymers the use of CAx-tools is essential and necessary. The proper use of polymer-simulations is discussed. Additionally material-specific simulations, like process-simulations, are combined with material-unspecific simulations, like structure optimization methods. The approach will be clarified by the example of a new concept of an air freshener. Within shape-optimization is linked to process simulation and topology-optimization. The optimal progression of available methods is analyzed by the ICROS-method (Intelligent Cross-linked Simulations). Utilized programs are ABAQUS, MOLDEX 3D and TOSCA.*

Stichwörter: *Kunststoff, FEA, Optimierung, ICROS, ABAQUS, MOLDEX 3D, TOSCA*

Keywords: *polymers, FEA, optimization, ICROS, ABAQUS, MOLDEX 3D, TOSCA*

1 Einleitung

Thermoplastisch verarbeitbare Kunststoffe substituieren in vielen Bereichen metallische Werkstoffe. Durch den, im Vergleich zu Metallen, völlig anderen atomaren Aufbau der Kunststoffe ergeben sich jedoch gänzlich verschiedene Materialeigenschaften. Eine gezielte konstruktive Ausnutzung ist deshalb nur durch die genaue Kenntnis dieser

Eigenschaften möglich. Das Materialverhalten ist bei Kunststoffen stark vom Herstellungsprozess, den Umgebungsbedingungen und den eintretenden Lastfällen abhängig und ist zudem innerhalb eines Bauteiles nicht homogen. Trotz dieser nachteiligen Eigenschaften sind Kunststoffe kostengünstig mit hohem Automatisierungsgrad, selbst bei komplexen Geometrien, produzierbar.

Die geschickte Auswahl geeigneter Softwarewerkzeuge für den Einsatz in rechnergestützten Produktentwicklungsprozessen sowie deren konsequente und optimale Nutzung beeinflussen maßgeblich die späteren Produktfertigungen und hiervon abhängig die anfallenden Produktionskosten. Die richtige Kopplung der Vielzahl an computergestützten Methoden ist gerade im Bereich der Kunststoffe nicht hinreichend charakterisiert. Aus diesem Grund wird zunächst auf die möglichen CAx-Methoden eingegangen und später eine sinnvolle Kopplung dieser dargestellt. Als Veranschaulichung dient das Fallbeispiel eines Lufterfrischers im Kraftfahrzeugbereich.

2 Der Einsatz von CAx-Werkzeugen in der Kunststoffkonstruktion

2.1 Computer Aided Process Engineering – CAPE

Spritzgegossene Bauteile haben zusätzlich zu den Materialeigenschaften spezifische Bauteileigenschaften, die durch den Prozess der Formgebung entstehen. Diese Verarbeitungseinflüsse können mit Hilfe einer Prozesssimulation (Spritzgusssimulation), welche Aufschlüsse über die Strömungsvorgänge im Bauteil gibt, berücksichtigt werden. Prinzipiell muss in zwei verschiedene Arten der Spritzgusssimulation unterschieden werden, die Mittelflächenmodellierung, auch 2½D-Simulation genannt und die Volumenmodellierung, 3D-Simulation genannt.

Der Vorteil der 2½D-Simulation ist die kurze Rechenzeit. Allerdings sind die Aussagen der Methode nur bei sehr dünnen Bauteilen zutreffend, da ausgehend von einer generierten Mittelfläche des Bauteils die Eigenschaften über die Dicke interpoliert werden und eine reine 2D-Hele-Shaw-Strömung angenommen wird, also keine Fließgeschwindigkeit in der z-Richtung existiert. Dies ist besonders bei Lufteinschlüssen, Bindenähten oder dem sogenannten Eckeneffekt (Vorauseilen der Schmelze an Rippen), bedingt durch die Quellströmung und Freistrahlbildung, fragwürdig.

3D-Simulationen berücksichtigen diese Effekte, allerdings sind für präzise Rechnungen sehr feine Netze nötig, was zu sehr hohem Rechenaufwand während der Struktursimulation führt.

2.2 Finite-Elemente-Analyse – FEA

Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) ist heute wohl das am meisten verwendete und universelle Hilfsmittel des Konstrukteurs zur Lösung komplexer Probleme in der Festigkeitsrechnung. Durch sie ist eine näherungsweise Berechnung des Verhaltens mechanischer Strukturen möglich. Basis der FEA nach dem Verschiebungsgrößenverfahren ist die Lösung des Gleichungssystems

$$K_{ij} u_j = F_i \tag{1}$$

mit dem Kraftvektor F_i, dem Verschiebungsvektor u_j und der Gesamtsteifigkeitsmatrix K_{ij}. Unter Einbeziehung der Geometrie, der äußeren Kräfte sowie der bestehenden Randbedingungen wird also die Verschiebungsantwort des Systems bestimmt [1]. Aus dieser lassen sich dann die Verzerrungen, Spannungen und Knotenkräfte herleiten. Die klassische FEA geht von linearem Systemverhalten aus. Bei der Belastung von Kunststoffkonstruktionen durch größere Lasten treten jedoch oft große Verformungen sowie nichtlineares Materialverhalten auf. Daher muss zur Verbesserung der Simulationsgüte eine FEA mit geometrischer und materieller Nichtlinearität gewählt werden. Die Beschreibung von Materialnichtlinearität erfolgt durch Materialmodelle des verwendeten Werkstoffs, im Fall des in dieser Arbeit verwendeten Polyamids z.B. durch ein elastisch-plastisches Verformungsmodell aus der Plastizitätstheorie. Dieses basiert auf der Annahme der Unabhängigkeit der Fließgrenze vom hydrostatischen Druck und dem Einsetzen von plastischem Fließen bei Überschreiten einer Fließgrenze. Grundlage der Kalibrierung des Materialmodells sind die elastischen Materialkonstanten Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl sowie die Spannungs-Dehnungs-Kurve im einachsigen Zugverhalten.

2.3 Computer Aided Optimization – CAO

Mittels Computer Aided Optimization (CAO) lassen sich im Gegensatz zu reinen Analysewerkzeugen wie der FEA in einem Syntheseprozess neue Strukturen erzeugen

[4]. Verfahren der Strukturoptimierung basieren auf der Definition einer geeigneten Zielfunktion für die Optimierungsaufgabe und deren Minimierung oder Maximierung unter Veränderung von Designvariablen. Zielfunktion kann z.B. die Steifigkeit oder die Eigenfrequenz des Bauteils sein. Der Optimierungsprozess geschieht immer unter Berücksichtigung von Randbedingungen, die die Restriktionen der Optimierung darstellen [3]. Je nachdem, welche Designvariablen definiert sind bzw. welche Parameter zur Optimierung der Zielfunktion verwendet werden, lassen sich unter anderem folgende CAO-Verfahren unterscheiden, die auch an unterschiedlichen Stellen der Prozesskette zum Einsatz kommen können:

- Topologieoptimierung: Die Steifigkeit der Finiten Elemente (FE) des Bauteilmodells wird in Form einer Dichtefunktion angepasst.
- Gestaltoptimierung: Die Knotenkoordinaten an der Oberfläche des FE-Netzes werden verschoben.

Die Topologieoptimierung geht von einem Bauraum aus, der die maximale räumliche Ausdehnung des späteren Bauteils kennzeichnet. Während des Optimierungsprozesses werden einzelne Bereiche dieses Bauraums schrittweise ausgeblendet, bis am Ende die in Abhängigkeit von Optimierungsziel, Randbedingungen und gewünschtem Restvolumen optimale Geometrie erhalten bleibt. Im Gegensatz dazu stellt die Basis der Gestaltoptimierung bereits ein endkonturnaher Entwurf des späteren Bauteils dar. Dieser wird z.B. zur Spannungsreduktion nur noch in gewissen Grenzen verändert. CAO-Verfahren mit Annahme linearen Materialverhaltens sind in der konstruktiven Praxis Stand der Technik und werden stoffklassenübergreifend eingesetzt. Bei der Anwendung auf Kunststoffkonstruktionen muss jedoch der Validierung der Optimierungsergebnisse vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden [5]. Zum einen tritt speziell bei Thermoplasten unter größeren Belastungen schnell plastisches Fließen auf und die Anforderungen der optimierten Geometrie hinsichtlich der Optimierungsziele werden u.U. nicht mehr erfüllt. Zum anderen verfügt das Ergebnis der Topologieoptimierung über eine sehr unebene Oberfläche und muss durch Glättungsalgorithmen vor der Weiterverarbeitung in der Prozesskette geglättet werden. Hierbei können Abweichungen von der optimalen Bauteilgeometrie auftreten [2].

3 Fallbeispiel Lufterfrischer

Im dargestellten Fallbeispiel soll ein neuartiges System der Raumerfrischung in Fahrzeugen entwickelt werden. Vorgabe ist die Befestigung eines gefüllten Röhrchens an der Lüftungsdüse eines Kfz. Das Anschlussstück an das Rohr und an die Arretierung im Lüftungsgitter ist zu optimieren.

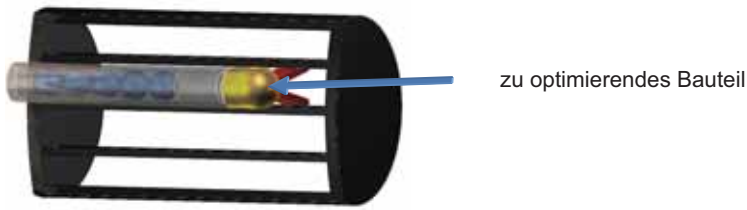


Bild 1: Virtueller Prototyp eines neuartigen Kfz-Lufterfrischers

Um die zur Verfügung stehenden CAx-Pakete optimal bei der Konstruktion und Entwicklung von Kunststoffkomponenten einsetzen zu können, findet die ICROS-Methode Anwendung (Intelligent Cross-linked Simulations). Dabei werden Analyse- und Synthesewerkzeuge an die geforderte Konstruktionsaufgabe angepasst und intelligent in einer Prozesskette integriert (Bild 2). Der Konstrukteur durchläuft diese Prozesskette im Entwicklungsprozess und findet so durch Simulation leichter und schneller zu einem besseren Endprodukt. Ein Durchlauf muss dabei nicht statisch stattfinden, sondern kann Iterationen und Rücksprünge enthalten. Der Einfluss durch äußere Größen ist in der Prozesskette ebenso enthalten wie Empfehlungen hinsichtlich des Datenaustausches zwischen den einzelnen Werkzeugen.

Zu Beginn der Prozesskette des Fallbeispiels Lufterfrischer steht eine analytische Dimensionierung des Einschnappvorgangs des Kugelgelenks. Bestimmend dafür ist die Auslegung von Kugelinnen- und -außendurchmesser in Abhängigkeit der aufzuwendenden Einschnappkraft. Diese richtet sich als äußere Vorgabe nach zumutbaren Bedienkräften. Zur Dimensionierung steht das Berechnungsprogramm SNAPS der Firma BASF zur Verfügung. In Abhängigkeit der räumlichen Begrenzung durch Fahrzeuglüftungsgitter und andere Komponenten des Lufterfrischers wird der Bauraum in einem 3D-CAD-System festgelegt. Der Bauraum kennzeichnet die maximal mögliche Größe des späteren Bauteils

und dient als Eingangswert der Topologieoptimierung. Durch diese lässt sich die optimale Bauteilgeometrie in Abhängigkeit verschiedener Lastfälle und Randbedingungen finden.

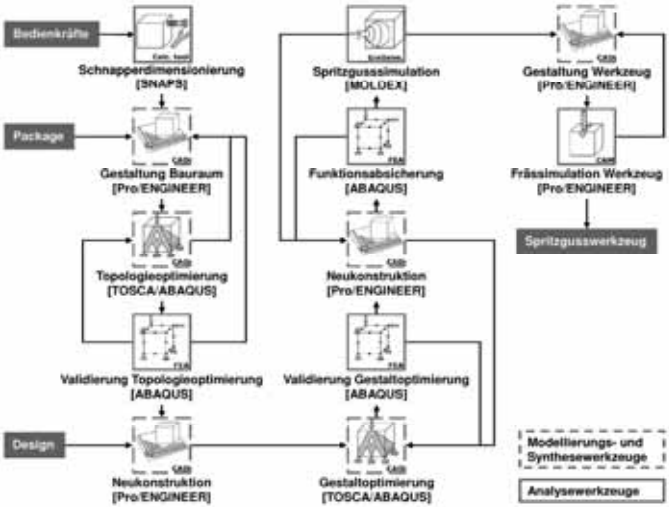


Bild 2: Prozesskette des Fallbeispiels Lufterfrischer

Beim hier betrachteten Fallbeispiel Lufterfrischer findet die Optimierung auf fünf verschiedene Lastfälle hin statt, die sich aus dem Gebrauch des Bauteils ergeben: Biegung um positive und negative x- und y-Achse sowie der Einschnappvorgang (Bild 3).

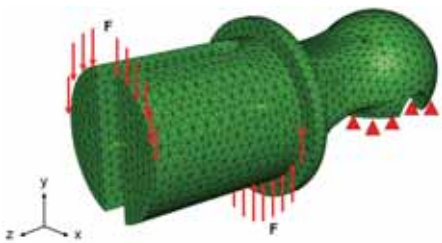


Bild 3: Aufbau des Finite-Elemente-Modells (Lastfall Biegung um die +x-Achse)

Die Festhaltung bei den Biegebelastungen erfolgt an der Kugelinnenfläche, wobei die Lastaufgabe auf die Randbereiche des geschlitzten Zylinders die Einbausituation in einem Rohr widerspiegelt. Das Optimierungsziel ist die Maximierung der Steifigkeit des Bauteils

bei vorgegebenem Zielvolumen. Dieses orientiert sich am Bauteilvolumen einer Ausgangskonstruktion, die vor Anwendung der Strukturoptimierungsverfahren als Vergleich ohne Simulationsunterstützung durch einen Konstrukteur angefertigt wurde. Die Validierung der Ergebnisse in einer FEA schließt den Schritt der Topologieoptimierung ab. Das geglättete und aufbereitete Optimierungsergebnis bildet neben Designaspekten des Marketings die Grundlage einer fertigungsgerechten Neukonstruktion in einem CAD-System. Da diese manuelle Neukonstruktion nur eine Annäherung an die Optimierungsergebnisse darstellen kann, schließt sich daran eine Gestaltoptimierung zur Spannungsreduktion im Bauteil an.

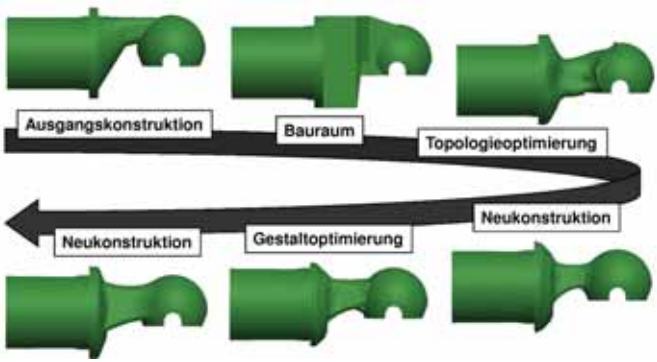


Bild 4: Entwicklung der Bauteilgeometrie entlang der Prozesskette

Eine Validierung der Ergebnisse dieser Strukturoptimierung dient wiederum zum besseren Verständnis und der Analyse des Bauteils und stellt die Basis einer erneuten Neukonstruktion in 3D-CAD dar. Durch Anwendung parametrischer CAD-Systeme und Weiterverwendung der ersten Neukonstruktion lässt sich dieser Schritt erheblich vereinfachen. Die virtuelle Funktionsabsicherung durch Finite-Elemente-Analyse schließt den konstruktiven Prozess ab und leitet zu Fertigungsaspekten über. Wird die Geometrie des Bauteils von der Ausgangskonstruktion bis zur Neukonstruktion nach der Gestaltoptimierung betrachtet, so fällt besonders der unterschiedliche Ansatzpunkt des Übergangs zwischen Kugelkopf (rechts) und Schlitzhülse (links) auf (Bild 4). Darüber hinaus verändert sich auch die Querschnittsgeometrie dieses Bereiches hin zu einem U-förmigen Profil.

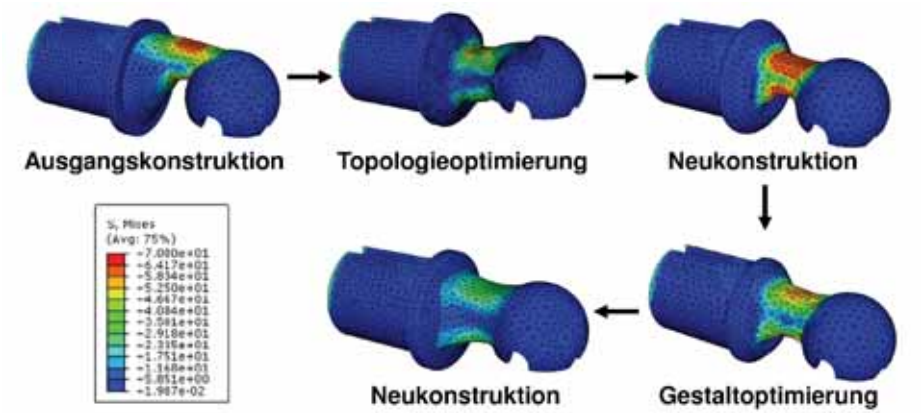


Bild 5: Analyse der auftretenden Vergleichsspannungen in den verschiedenen Prozessschritten

Werden die auftretenden Vergleichsspannungen nach Gestaltänderungsenergiehypothese im Lastfall „Biegung in y-Richtung“ bei Berechnung mit elastisch-plastischem Materialverhalten und geometrischer Nichtlinearität in den einzelnen Prozessschritten bis zum fertigen Bauteil betrachtet, so fällt die homogenere Spannungsverteilung bei der Neu- im Vergleich zur Ausgangskonstruktion auf (Bild 5). Die Bereiche mit sehr hohen bzw. niedrigen Spannungen konnten deutlich reduziert werden.

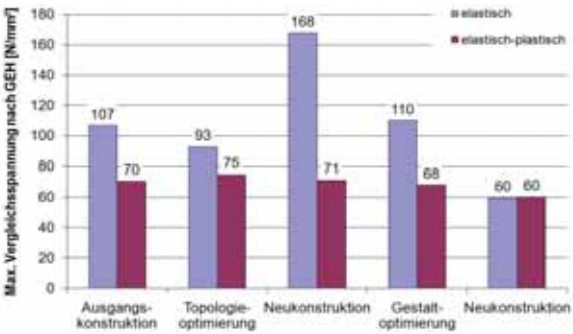


Bild 6: Maximale Vergleichsspannungen in den verschiedenen Prozessschritten

Deutliche Unterschiede zwischen linear-elastischer und elastisch-plastischer FEA bei Beaufschlagung des Modells mit der Missbrauchslast F = 30 N deuten auf große Bereiche mit plastischer Verformung hin (Bild 6). Erst bei der Neukonstruktion am Ende der

Prozesskette liegen die Spannungen in der Größenordnung der Fließgrenze des verwendeten Polyamids.

Die Topologieoptimierung und deren Neukonstruktion in der Mitte der Prozesskette führen zu den höchsten auftretenden Spannungen. Grund dafür sind einerseits Kerbspannungsspitzen an Übergängen zu bei der Optimierung festgehaltenen Bereichen hin und andererseits Abweichungen zwischen Optimierungsergebnis und Neukonstruktion. Um diese Spannungen zu reduzieren, wurde die Gestaltoptimierung in der Prozesskette eingeführt. Gegenüber der Ausgangskonstruktion liegen die maximalen Vergleichsspannungen des fertigen Bauteils um 14 % niedriger. Bei Betrachtung der maximalen Verschiebungen in Biegerichtung beim Lastfall „Biegung in y-Richtung“ zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie bei den Vergleichsspannungen (Bild 7).

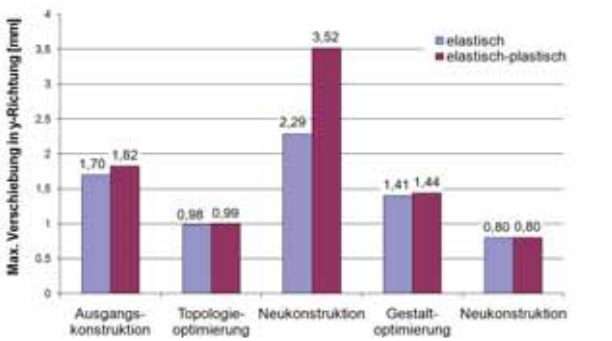


Bild 7: Maximale Verschiebungen in y-Richtung in den verschiedenen Prozessschritten

Auch hier liefert die Neukonstruktion nach der Topologieoptimierung vergleichsweise schlechte Ergebnisse. Grund dafür sind zu große Abweichungen vom Optimierungsergebnis, die aus Design- und Fertigungsgründen stammen können. Am Ende der Prozesskette ergeben sich im Bauteil bei elastisch-plastischer Rechnung Verschiebungen, die nur noch 44 % der Ausgangswerte ohne Anwendung der Simulationsmethoden betragen.

Die an die Optimierung anschließende Spritzgusssimulation zeigt ein wesentlich homogeneres Füllverhalten der optimierten Form. Zusätzlich kann die Füllzeit um 20 % gegenüber der nicht optimierten Form reduziert werden (Bild 8). Der Vergleich des

Verzugsverhaltens zeigt ebenfalls ein homogeneres Bauteilverhalten hinsichtlich Schrumpf und Verzug bei der optimierten Form.

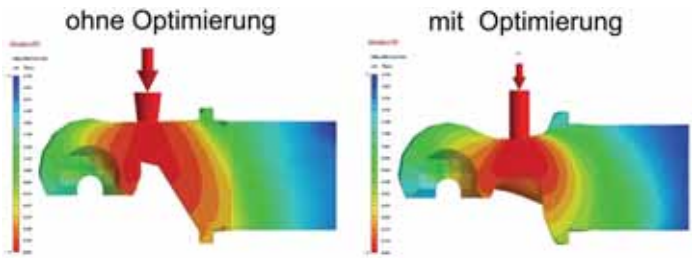


Bild 8: Darstellung der Fließfronten während des Füllvorganges in der Spritzgusssimulation

Mit Hilfe der Kopplung der CAx-Werkzeuge gelang hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und Prozessführung eine deutliche Verbesserung der Bauteileigenschaften gegenüber der Ausgangskonstruktion.

Literatur

[1] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 2. Aufl. München: Hanser, 2003.

[2] Dörnhöfer, Andreas; Rieg, Frank; Kröninger, Hans-Rainer: *Leichtbau durch Einsatz von Topologieoptimierung*. In: 5. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Dresden, 2007.

[3] Bendsøe, Martin P.; Sigmund, Ole: *Topology Optimization*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2004.

[4] Harzheim, Lothar: *Strukturoptimierung – Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt/Main: Harri Deutsch, 2008.

[5] Dörnhöfer, Andreas: *Leichtbau mit partikelverstärkten Magnesiumlegierungen – Integration von virtueller Werkstoffentwicklung und Topologieoptimierung in den Produktentwicklungsprozess*. (Diss.) Universität Bayreuth, 2008

[6] Alber-Laukant: *Struktur- und Prozesssimulation zur Bauteildimensionierung mit thermoplastischen Kunststoffen – Validierung von Werkstoffbeschreibungen für den technischen Einsatz*. (Diss.) Universität Bayreuth, 2008.

[7] Alber, B.; Hackenschmidt, R.; Dolsak, B.; Rieg, F.: *ICROS - The Selective Approach to High-Tech Polymer Product Design*. In: Design 2006, Bd. 1, Marjanovic, D. (Hrsg.). Dubrovnik: S. 417-424, 2006.

[8] Zachert, J.: *Analyse und Simulation dreidimensionaler Strömungsvorgänge beim Spritzgießen*. (Diss.) Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung, Band 79, 1998.

Design für Investitionsgüter

Frank Drechsel

Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD, Zentrum Technisches Design, TU Dresden
Sitz: August-Bebel-Straße 20, 01219 Dresden
Post: TU Dresden, KTC/Technisches Design, 01062 Dresden
Email: frank.drechsel@tu-dresden.de; Internet: www.tu-dresden.de/design

Inhalt: *Das Forschungsvorhaben ist auf den Produktentwicklungsprozess von Investitionsgütern fokussiert. Es zielt an dieser Stelle darauf, das Zusammenwirken von Konstruktion und Industriedesign zu untersuchen. Fokussiert soll in der Untersuchung die Frage geklärt werden, welchen Stellenwert das unterschiedliche Vorgehen beider Disziplinen im Problemkomplex einer Designintegration für Investitionsgüter besitzt. Als Ziel sollen bestehende Hemmnisse in der Interaktion zwischen beiden Disziplinen identifiziert und innerhalb konkreter Fallstudien Ansatzpunkte für ein effektives Zusammenwirken aufgezeigt werden. Im vorliegenden Tagungsbeitrag soll der Zwischenstand der 2007 begonnenen Studie vorgestellt und diskutiert werden.*

Abstract: *This research focuses on the product development process of industrial goods. There it aims at the collaboration between engineering and industrial design to clarify how the different approaches of these disciplines affect on the integration of the industrial design. In a first step existing constraints in their interaction have to be identified, followed by case studies in a second step to highlight ascertained prospects to improve their co-operation. This paper shows the preliminary research results to initiate further discussion.*

Stichwörter: *Konstruktion, Industriedesign, Design, Investitionsgüter, Integrierte Produktentwicklung, KMU, Entwicklungsprozess, Szenario*

Keywords: *engineering design, industrial design, industrial goods, integrated product development, SME, product development process, scenario*

1 Situation in der Entwicklungspraxis

1.1 Produktentwicklung als interdisziplinäre Kooperation

Im Produktentwicklungsprozess interagieren die unterschiedlichsten Fachgebiete mit dem Ziel ein optimales Produkt zu erschaffen [1]. Diese Studie fokussiert sich auf das Zusammenwirken der Konstruktion und des Industriedesigns, welche beide einen essentiellen Anteil an der Wertschöpfung der Produktentwicklung ausmachen. Hierbei wird vordergründig von einer Interaktion der Unternehmen mit externen Designdienstleistern ausgegangen, einer Konfiguration, welche auch zukünftig in mittelständischen Unternehmen erwartet wird. Im speziell betrachteten Fall der Investitionsgüter war und ist

die Entwicklung stark von der Konstruktion geprägt. Das Ziel ist, eine Lösung vorzuschlagen, wie das Produkt gemeinsam im interdisziplinären Team mit eingebundenem Industriedesign effektiv entwickelt werden kann.

1.2 Design für Investitionsgüter

Unterschiedliche Arbeiten haben das Bedeutungsspektrum des Designs für Investitionsgüter aufgezeigt und dessen Bedeutung auch unter wirtschaftlichen bzw. wettbewerbsrelevanten Gesichtpunkten näher beleuchtet [2, 3]. Als essentielle Ergebnisse wurden neben der Produktbezogenen Gestaltung die Potenziale zur Markenbildung und zur Profilierung des Firmenimages sowie die Funktion als Innovationstreiber benannt [4, 5]. Auch die dem Design typische ganzheitliche Betrachtungsweise wurde als strategisches Werkzeug hervorgehoben.

Bild 1: Beispiele für integriertes und ausbaufähiges Maschinendesign

Trotz dieser Argumentation für eine Integration des Designs bleibt vor allem die Praxis des klein- und mittelständischen Maschinen- und Anlagenbaus hinter den zu erwartenden

Möglichkeiten zurück. Im Unterschied zu Konsumgütern wird dem Industriedesign hier häufig noch ein geringeres Gewicht beigemessen. Die vorgestellte Untersuchung soll die Integration des Designs für Investitionsgüter verbessern und die damit verbundenen wirtschaftlichen Potenziale erschließen. Die Studie stellt dabei eines von mehreren geförderten Projekten dieses Themenschwerpunktes der Stiftung Industrieforschung (www.stiftung-industrieforschung.de) dar.

2 Fokus der Untersuchung

2.1 Problemkomplex Designintegration

Betrachtet man den Komplex der Designintegration, so offenbart sich eine Fülle von potenziell möglichen Barrieren [6, 7, 8]. Unterscheiden lassen sich diese Hinderungsgründe in solche, welche vor allem Reibung mit der Disziplin Konstruktion verursachen und solche, welche vermehrt zu anderen Disziplinen hin auftreten. Die Untersuchung wird sich auf den ersten Fall konzentrieren.

Innerhalb dessen spannen sich Problemkategorien auf, welche von sich unterscheidenden Entwurfsdarstellungen bis zu Konflikten hinsichtlich Werten und Prinzipien reichen [6]. Ebenso zählen ein zu gering ausgeprägtes Verständnis der jeweils anderen Disziplin, eine mangelhafte Kommunikation untereinander und unausgereifte Fähigkeiten der Reflektion über das eigene Vorgehen zu den registrierten Ursachen. Die Bedeutung des charakteristischen Vorgehens der beiden Disziplinen in der Interaktion wird die zentrale Untersuchungsbasis darstellen. Die gegenseitige Akzeptanz und Wertschätzung beider Partner wird hierbei als essenziell vorausgesetzt, wobei die Nutzung einer gemeinsamen Sprache oder die Formulierung gemeinsamer Ziele dagegen nicht als selbstverständlich angesehen werden können. Mit einer Fokussierung auf die potenziellen Hemmnisse einer Integration ergibt sich gleichwertig die Frage wer mit den Ergebnissen adressiert werden soll. Dies muss im Rahmen der Identifikation der Hemmnisse zwischen den beiden Fachgebieten beantwortet werden. Zuletzt gibt ein Adressat Randbedingungen für die konkret zu entwickelnde Transferstrategie der Ergebnisse in die Praxis vor.

2.2 Regionaler Maschinenbau

Der Begriff des Investitionsgutes muss hinsichtlich der anvisierten Fragestellung spezifiziert werden. Der Fokus der Untersuchung wird auf Maschinen und Anlagen als Objekte hoher technischer und gestalterischer Komplexität liegen.

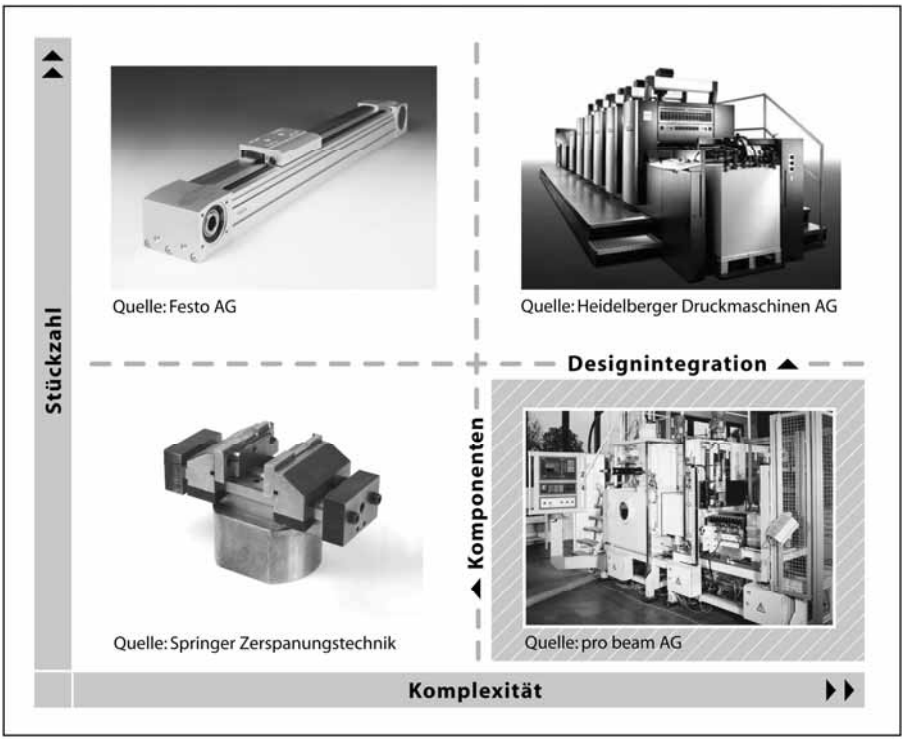


Bild 2: Geringe Designintegration im Sondermaschinenbau

Tendenziell zeigte sich bei den beteiligten Partnerfirmen, dass die Integration des Industriedesigns vor allem bei Maschinen geringer Stückzahlen kritisch betrachtet wird. Dieser Bereich ist für die Fragestellung besonders interessant, weil hier die angespannteste Interaktion zwischen beiden Disziplinen erwartet wird und die Probleme vermutlich am offensichtlichsten zu Tage treten. Hinsichtlich einer breiten wirtschaftlichen Bedeutung sollte trotz dieser Fokussierung versucht werden, die spezifischen

Erkenntnisse dieser Untersuchung (Abschnitt 4.1) so weit wie möglich auf weitere technisch stark dominierte Objekte zu verallgemeinern.

3 Interdisziplinäre Vorgehensunterschiede

3.1 Entwerfen als kooperativer Prozess

In dieser Studie ist die Entwurfsphase im Entwicklungsprozess von zentralem Interesse. Essentielle Fragen nach einer effektiven Interaktion tauchen auf, wenn man betrachtet, dass beide Fachgebiete am Produkt konkrete Gestaltungsentscheidungen treffen, dabei aber unterschiedlichen Zielstellungen folgen. Dass diese unterschiedlichen Ziele übergeordnet zur Deckung gebracht werden müssen, ist nachvollziehbar. Offen ist an dieser Stelle, wie das unterschiedliche Vorgehen günstig aufeinander abzustimmen ist.

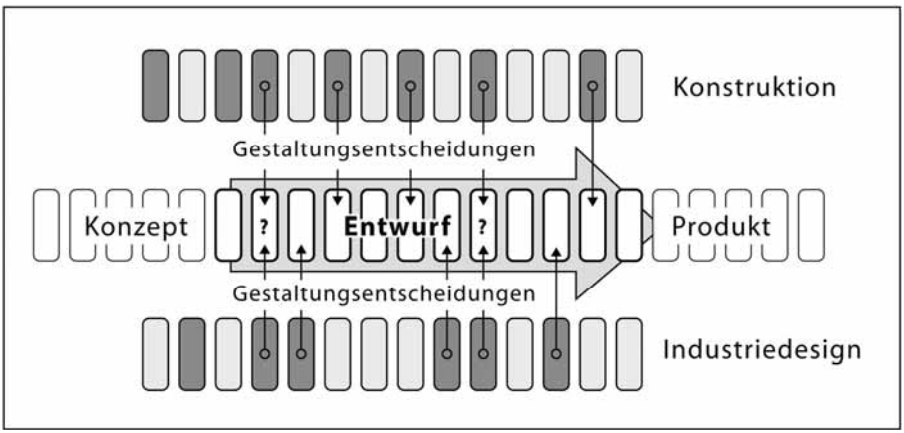


Bild 3: „Genom“ der gestaltenden Disziplinen

Als ein beispielhafter Unterschied kann hier angeführt werden, dass das Vorgehen in der Konstruktion vorwiegend problemorientiert geprägt ist, während dem Design eine lösungsorientierte Arbeitsweise zugeschrieben wird [9]. In der unternehmerischen Praxis zeigen viele Indizien, dass dieser Unterschied häufig eine Integration erschwert. Folglich werden in der vorliegenden Studie die unterschiedlichen Herangehensweisen beim Entwerfen als eine Ursache für das suboptimale Zusammenwirken der Fachgebiete Konstruktion und Design angesehen. Tiefer gehend bleibt zu klären, was die relevanten

Unterschiede sind, welche eine Kooperation erschweren und wie diese Unterschiede die Kooperation beeinflussen. Übergeordnet soll mit dieser Fragestellung verdeutlicht werden, welchen allgemeinen Stellenwert das unterschiedliche Vorgehen beider Disziplinen im Problemkomplex der Designintegration für Investitionsgüter besitzt

3.2 Entwerfen als mentaler Prozess und Teamprozess

Im Industriedesign spielt der Mensch eine zentrale Rolle hinsichtlich der Zielstellung der Gestaltung. Blickt man auf den Entwurfsprozess als einen mentalen Prozess, so kann man den Menschen als eine relativ konstante Größe nutzen, die Vorgänge beim Entwerfen besser zu verstehen. Ein möglicher Ansatz liegt hier in der Beschreibung der Entwurfshandlungen durch die Handlungsregulationstheorie nach Hacker [10]. Interessant an diesem Ansatz ist der Fakt, dass die Vorgehensweisen verschiedener Entwerfer unter einem gemeinsamen Blickwinkel beschrieben werden können, unabhängig welcher Disziplin sie angehören.

Betrachtet man den multidisziplinären Entwicklungsprozess aus Sicht der Teamarbeit und des Teamzusammenhaltes, ergeben sich interessante Sichtweisen auf Konflikte in der Entwicklungspraxis. Demnach ist eine differenzierte Bewertung der Konfliktsituationen bedeutsam [11], um gerade die Konflikte zu adressieren, welche eine fruchtbare Reibung zwischen den Disziplinen bewirken. Solche fachlichen Konflikte bilden ihrerseits den Nährboden für innovative Lösungen.

4 Untersuchungsmethoden

4.1 Interview: Besonderheiten der Investitionsgüterentwicklung

In einem ersten Schritt wurden die Partnerunternehmen hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Erfahrungen zur Designintegration befragt. Neben einer Annäherung an die systematische Klärung der Fragestellung erwies sich dieser Schritt als wichtige vertrauensbildende Maßnahme. In Verbindung mit bereits veröffentlichten Studien kristallisierten sich einige Besonderheiten der Investitionsgüterentwicklung heraus. So besteht im Unterschied zum meist anonymen Markt der Konsumgüter häufig eine konkrete Kundenkenntnis [5] welche die Möglichkeit eines gezielten Designs begünstigt. In vielen Fällen konnte innerhalb der Unternehmen eine deutliche Technologiespezialisierung

ausgemacht werden, welche ein Bündel an charakteristischen Gestaltungsmerkmalen der Produkte zur Folge haben könnte. Dem gegenüber erschweren übliche „Fall zu Fall Entscheidungen“ eine konsistente Entwicklungs- und Designstrategie. Hinsichtlich des Zeitpunktes einer Designintegration ist zu bemerken, dass es zum Teil sogar notwendig ist schon einen konkreten Maschinenentwurf zur Angebotserstellung zu generieren, was eine Einbeziehung des Designs „zu Beginn“ wesentlich erschwert. Auch typisch für das Investitionsgüterdesign ist dessen Vielschichtigkeit in der Gruppe der Adressaten eines Designs, betrachtet man allein die Beteiligten an der Kaufentscheidung eines Investitionsgutes [12].

Verallgemeinert ließe sich aus den bestehenden Erkenntnissen vorsichtig zusammenfassen, dass die Funktionen eines „guten Designs“ in den Unternehmen bekannt und diese grundsätzlich dort wertgeschätzt sind. Jedoch wird eine Integration dieser Disziplin in den Produktentwicklungsprozess nicht uneingeschränkt akzeptiert sowie als nicht selbstverständlich bzw. unproblematisch erwartet.

4.2 Entwurfsdokumentation: Begleitung von Studentenprojekten

Neben den Interviews in den beteiligten Partnerfirmen werden im Rahmen der Untersuchung studentische Entwurfsprojekte eingebunden. Diese dienen vor allem dem Test und der Evaluierung von Untersuchungsmethoden. Beispielhaft wurde anhand dieser eine Dokumentationsweise getestet, welche die Entwürfe beider Disziplinen differenziert beschreibt und vergleichbar abbildet. Die Entwurfsprojekte des Technischen Designs an der TU Dresden sind hierfür besonders geeignet, da sowohl konstruktive wie auch gestalterische Fragestellungen gleichberechtigt in den Entwürfen behandelt werden. Die Auswertung dieser Teiluntersuchung steht noch aus.

4.3 Interaktionsszenarien: Problemidentifikation

Mittels eines beschreibenden Szenarios soll die Zusammenarbeit, die darin enthaltene Fülle an Informationen und mögliche Ansatzpunkte abgebildet werden. Dies fordert die unterschiedlichen Aspekte des Vorgehens beider Disziplinen klarer zu benennen und bildet die Grundlage relevante Aspekte der Interaktion zu bündeln und zu abstrahieren.

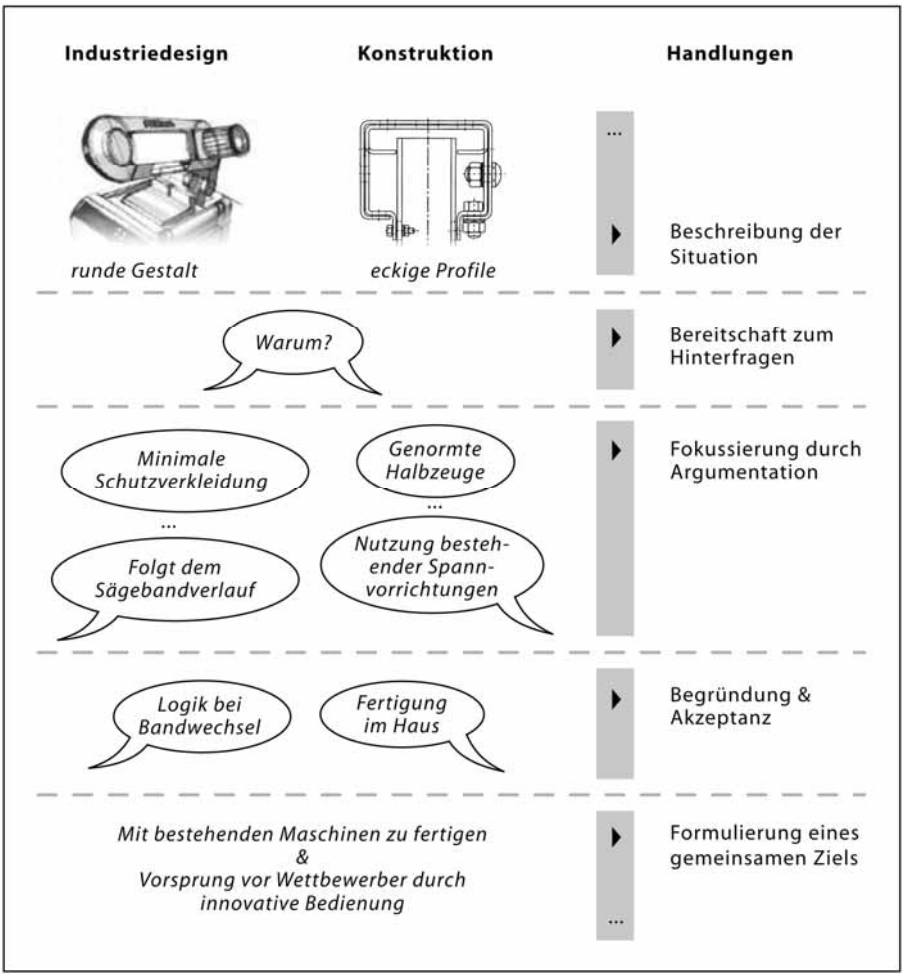


Bild 4: Beispiel eines fiktiven Szenarios mit abstrahierten Etappen

Weiterhin dient das Szenario als Kommunikationsmittel und Diskussionsgrundlage und unterstützt die Modellbildung der Entwurfs- und Interaktionsprozesse. Mit diesem lassen sich auch prototypische Abläufe der Entwicklungsprozesse der Partnerfirmen darstellen und vergleichen, genauso wie Kriterien für eine Erfolgskontrolle ableiten. Es ist vorgesehen, zu Beginn drei verschiedene unterschiedliche Szenarien auf Grundlage des

bestehenden Wissensstandes zu erstellen. Diese bilden die Grundlage für die Diskussion mit den Partnerfirmen und den Startpunkt für eine gezielte Analyse. Unterschiedliche Szenarien sollen dabei die Möglichkeit offerieren eigene Erfahrungen einzubringen. In einem zweiten Schritt werden die Szenarien dazu dienen ein möglichst reales Bild der Situation in der Praxis abzubilden. Gleichzeitig wirken diese unterstützend bei der Formulierung von individuell abgestimmten Zielen mit den Partnerfirmen. Dies scheint aufgrund der heterogenen Erfahrungen, Vorstellungen und Ansichten zum Design innerhalb der Untersuchungsgruppe sinnvoll. Neben der Befragung der eingebundenen mittelständischen Partnerunternehmen ist ebenso vorgesehen externe Designdienstleister aus diesem Bereich einzubeziehen.

5 Ausblick

Mit der Untersuchung soll dem Ziel Rechnung getragen werden, die Situation und die Probleme um die Designintegration in den Investitionsgüterentwicklungsprozess besser zu verstehen. In der Grundorientierung einer effektiven Kooperation zwischen den Disziplinen geht es nicht vordergründig darum neue fachspezifische Arbeitsmethoden zu entwickeln. Vielmehr sollen die Vorgehensweisen beider Fachgebiete gezielt zusammengeführt werden. Der Wissenstransfers wird dabei durch die Außensicht des Autors auf das Unternehmen, die Anregung zur Reflektion und die genutzten Visualisierungen in der Kommunikation unterstützt. In aktiver Interaktion mit den Partnerunternehmen sollen die Erkenntnisse der Studie möglichst direkt für die Unternehmen zu verwerten sein. Dabei erscheint der praktische Entwurf als ein wirksamer Transferweg. Innerhalb der Untersuchung sind Produktstudien und exemplarische Produktentwicklungen geplant, um mit diesen auch die Wirksamkeit eines vorgeschlagenen Designintegrationsweges einzuschätzen. Diese Strategie könnte im Nachgang dieser Untersuchung ein breiteres Spektrum an Unternehmen adressieren. Die Durchführung von Workshops und die Idee eines Transferzentrums [13] erscheinen viel versprechend.

Literatur

[1] Ehrlenspiel, K. (2007): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. aktualisierte Aufl. München: Hanser.

[2] Lenzen, T. (1993): Industriedesign als Erfolgsfaktor für mittelständische Unternehmungen. Mit Fallbeispielen. Bamberg: Difo-Dr.

[3] Mayer, S. (1996). Wettbewerbsfaktor Design: Zum Einsatz von Design im Markt für Investitionsgüter. KulturKommerz, 4. Hamburg: S + W Steuer- und Wirtschaftsverl.

[4] Herrmann C., Moeller G. (2008): Markenbildung durch Industriedesign. Konzepte für kleinere und mittlere Investitionsgüterhersteller, Berichtsband 1. Oestrich/Winkel: European Business School.

[5] Steinmeier, I. (1998): Industriedesign als Innovationsfaktor für Investitionsgüter. Ein Beitrag zum designorientierten Innovationsmanagement. Frankfurt am Main: Verl. Form (Form-Theorie)

[6] Eujin P.; Campbell R.; Evans M. (2008): Building a Common Ground. In: Proceedings of the 2008 Design Research Society Conference. Sheffield.

[7] Reese, J. (2005): Der Ingenieur und seine Designer. Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design. Berlin: Springer-Verlag.

[8] Brezing, A. (2006): Planung innovativer Produkte unter Nutzung von Design- und Ingenieurdienstleistungen. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, 1. Aachen: Shaker.

[9] Uhlmann, J. (2005): Die Vorgehensplanung Designprozess für Objekte der Technik. Dresden: TUDpress.

[10] Hacker, W. (1998): Allgemeine Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. Berlin Göttingen Toronto Seattle: Verlag Hans Huber.

[11] Badke-Schaub, P.; Frankenberger, E. (2003): Management kritischer Situationen. Produktentwicklung erfolgreich gestalten. Berlin: Springer.

[12] Kutschker, M.; Kirsch, W. (1978): Verhandlungen in multiorganisationalen Entscheidungsprozessen. E. empir. Unters. d. Absatz- u. Beschaffungsentscheidungen von Investitionsgütern. München: Planungs- und organisationswissenschaftliche Schriften.

[13] Drechsel, F. (2008): Transferzentrum Technisches Design. Sammelband 2. Symposium Technisches Design. München: Verlag Dr. Hut.

Effizient vom Megatrend zur Produktidee – das Bahnhofsmodell

Ingo Schulz, Andreas Kern-Trautmann

SKF GmbH, Application Engineering / New Business, Industrial Division Central Europe
Gunnar-Wester-Str. 12, D-97421 Schweinfurt
Email: ingo.schulz@skf.com; andreas.kern-trautmann@skf.com; Internet: http://www.skf.de

Inhalt: *Das Bahnhofsmodell für Innovationsworkshops führt zu einer deutlichen Effizienzsteigerung bei deren Vorbereitung und Durchführung. Durch den vorgegebenen Prozess ist es möglich, in einem ersten Gespräch zweifelsfrei festzustellen, in welchem „Bahnhof" in den Prozess der Ideenfindung eingestiegen werden soll. Damit können Missverständnisse vermieden, aber auch das Bewusstsein für den durchzuführenden Workshop geschärft werden. Durch das allgemeine Workshopmodell sind der Prozess, die zu erzeugenden Daten und die benötigte Organisation vordefiniert, sodass in der Praxis die Dauer der Vorbereitung eines Workshops signifikant reduziert und die Ergebnisqualität deutlich erhöht werden kann.*

Abstract: *The Train Station Model for Innovation Workshops leads to a significant increase in efficiency of preparing and conducting the workshop. Due to the given process of idea generation it is possible to determine the right "Station" to enter the process of idea generation. This avoids misunderstandings and sharpens the awareness for the task to do. By the general Workshop Model all processes, data and the needed organization are predefined, so that in practice the time to prepare a workshop is reduced as well as the quality of the output is increased considerably.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, Innovation, Ideenfindung, Workshop-Modell, Methodik*

Keywords: *Product Development, Innovation, Idea Generation, Workshop Model, Methodology*

1 Einleitung

Für die langfristig erfolgreiche Produktentwicklung ist es notwendig, sowohl die richtigen Megatrends zu identifizieren als auch aus diesen Trends die für das jeweilige Unternehmen richtigen Produktideen abzuleiten. Solche Innovationen stellen einen wesentlichen Baustein zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen dar.

Der Weg von einem Megatrend zu einer konkreten Produktidee ist jedoch sehr weit, sodass ohne ein methodisches Vorgehen der Erfolg höchst unsicher wird. Statt den Prozess mit einer konkreten Idee für ein neues Produkt zu verlassen, werden zahlreiche Ressourcen, von Arbeitszeit über Raummieten bis Reisekosten, ohne nachhaltiges Ergebnis verschwendet.

Um die Wahrscheinlichkeit für erfolgreiche Produktideen deutlich zu erhöhen, wurde bei SKF eine Vorgehensweise entwickelt, die anhand von Innovationsworkshops eine systematische Ideengenerierung ermöglicht. Hierbei werden Meilensteine dazu genutzt, sowohl den genauen Ausgangspunkt für den Workshop zu bestimmen als auch das angestrebte Ziel eindeutig festzulegen. Aufgrund dieser definierten Stationen wird diese Vorgehensweise als „Bahnhofsmodell“ bezeichnet.

2 Megatrends, Methoden und Methodiken der Ideenfindung

Megatrends als Rahmen globaler Entwicklung

Megatrends wurden von dem Zukunftsforscher John Naisbitt zur Charakterisierung besonders nachhaltiger, tief greifender Veränderungen in Gesellschaft und Technologie eingeführt [1]. Als ein Ausgangspunkt zur Identifikation zukünftiger Entwicklungen können Megatrends der Anstoß für Strategien sein, die einem Unternehmen über sehr lange Zeiträume als Geschäftsgrundlage dienen können. Ein Ideengenerierungsprozess, der geeignet sein soll, neue Betätigungsfelder für ein Unternehmen aufzudecken, muss auf der Ebene der Megatrends beginnen.

Methoden der Ideenfindung

Ideenfindungsmethoden können den heuristischen Methoden zugeordnet werden [2][3]. Wesentliches Merkmal dieser Methoden ist, dass sie keinen Algorithmus zur Erzeugung des Ergebnisses verwenden, wie z. B. eine Berechnungsvorschrift für Maschinenelemente. Vielmehr wird die Situation des Anwenders so beeinflusst, dass dieser möglichst kreative Ideen erzeugen kann.

Die heuristischen Methoden wiederum können in intuitive und diskursive Methoden unterteilt werden. Intuitive Methoden sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine unbefangene, spontane Ideenfindung ermöglichen. Zu ihnen zählen z. B. das Brainstorming oder auch einige TRIZ-Methoden, wie z. B. der Operator MZK. Diskursive Methoden versuchen, durch eine logische Abfolge von Einzelschritten den Ideenfindungsprozess zu leiten. Häufig bauen diskursive Methoden auf Erfahrungswissen auf, wie z. B. die Funktions-/Effektstrukturen nach Koller oder die Widerspruchsmatrix der TRIZ [4][5].

Methodiken der Ideenfindung

Häufig werden Ideenfindungsmethoden isoliert voneinander verwendet, eine Strukturierung des Ablaufs unterschiedlicher Methoden findet meist nicht statt. Vielmehr wird ein „Ideenfindungsworkshop“ einberufen, wenn es nötig erscheint, und nicht im Rahmen eines strukturierten Vorgehensplans.

Während für die Produktentwicklung zahlreiche standardisierte Prozesse zur Verfügung stehen, wie z. B. die Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 oder das Design for Six Sigma (DfSS), ist der Prozess der Ideengenerierung durch eine heterogene, wenig aufeinander aufbauende Methodenlandschaft gekennzeichnet [6][7]. Methodiken für die Produktplanung, wie etwa die InnovationRoadMap nach Eversheim, orientieren sich sehr stark an den Modellen der Produktenwicklung, legen aber bereits einen stärkeren Fokus auf intuitive Methoden [8]. Einen ersten Ansatz, eine Methodik des Ideenfindens zu kreieren, besitzt die TRIZ mit dem Algorithmus des erfinderischen Problemlösens (ARIZ) [5]. Ebenso strukturiert die „Ideenfabrik“ durch die Abfolge unterschiedlicher Kreativitätstechniken sowie der Auswahl und Ausarbeitung besonders vielversprechender Ideen den Ideenfindungsprozess [9]. Beide Methodiken unterstützen allerdings nicht unmittelbar den Weg von einem abstrakten Megatrend hin zu einer konkreten Produktidee.

3 Aufgabenstellung

In einem industriellen Umfeld ist der Mangel an Vorgehensmodellen, die von einem übergeordneten Megatrend hin zu einer konkreten Produktidee führen, besonders aus der Perspektive des Lean Managements sehr unbefriedigend. Mit der immer wiederkehrenden Aufgabenstellung, neue Ideen zu erzeugen, werden auch immer wieder die gleichen Aspekte der Auswahl der richtigen Methoden oder der Organisation des Workshops diskutiert. Gleichzeitig herrscht oft Unklarheit darüber, was genau der Ausgangspunkt des Workshops und was das Ziel ist, d. h., was genau ist das angestrebte Ergebnis. Sind diese Randbedingungen geklärt, gibt es Methoden und Methodiken, um Ideen zu generieren. Diese auf eine Idee fokussierten Vorgehensweisen in eine systematische Abfolge zu bringen, ist jedoch noch kaum ausgearbeitet.

Daher wird hier ein Modell vorgestellt, welches einen Rahmen bietet für eine Abfolge von Ideenfindungsworkshops. Damit kann der frühe Produktentwicklungsprozess deutlich effektiver und effizienter gestaltet werden. Ziel ist es, eine Struktur vorzugeben, in der zum

einen eine eindeutige Zielstellung erarbeitet wird und zum anderen sollen möglichst viele Routinearbeiten durch Vorlagen rationalisiert werden. Damit wird Freiraum und Zeit für die individuelle Methodenauswahl und -vorbereitung für den eigentlichen Workshop gewonnen.

4 Das Bahnhofsmodell

Um von den allgemeine Transformationsprozesse beschreibenden Megatrends zu konkreten Produktideen zu gelangen, kann ein vierstufiger Prozess genutzt werden, der von Megatrends über Handlungsfelder und Technologien zu Produktideen führt. Dieses „Bahnhofsmodell“ wurde in der SKF aufbauend auf den Erkenntnissen der Zukunftsforschung [10] und den Erfahrungen mit Innovationsworkshops entwickelt. Das Bahnhofsmodell baut wiederum auf einem allgemeinen Workshopmodell auf, das von einem Produktmodell der Produktentwicklung abgeleitet wurde, welches sich aus dem soziotechnischen Handlungsmodell der Systemtheorie herleitet [3].

Die Bezeichnung „Bahnhofsmodell“ ist von der Vorstellung inspiriert, dass auf dem Weg von einem allgemein beschriebenen Megatrend zu einer konkreten Produktidee einem vorgezeichneten Pfad gefolgt werden muss, der bestimmte Stationen miteinander verbindet. Bei jeder Station können Personen den Weg verlassen oder hinzukommen, je nach dem, welche Kompetenzen benötigt werden, um die nächste Station zu erreichen.

4.1 Allgemeines Workshopmodell

Das allgemeine Workshopmodell orientiert sich an dem Produktmodell der multimethodischen Arbeitsumgebung für die Produktentwicklung und besteht aus drei Teilmodellen (Bild 1) [3]. Diese Teilmodelle sind im Einzelnen:

Workshop-Prozessmodell

Das Workshop-Prozessmodell bildet die Vorgehensweise bei der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung eines Workshops ab. Ähnlich eines Produktentwicklungsprozesses kann die Durchführung eines Workshops als die Entwicklung eines Produkts, in diesem Fall einer Dienstleistung, aufgefasst werden. Hierbei sind grundsätzlich die Phasen der Aufgabenklärung, der Ablaufstrukturierung, der Methodenauswahl und der eigentlichen Durchführung vorzusehen, die die Teilschritte der

Ideenerzeugung, -bewertung und -beurteilung beinhalten kann. Als letzter Schritt sind nach dem Workshop die Ergebnisse aufzubereiten und ein Erfahrungsbericht zu verfassen.

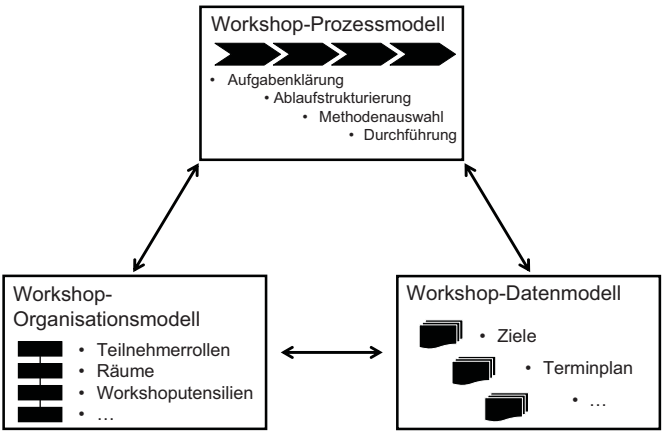


Bild 1: Allgemeines Workshopmodell

Workshop-Datenmodell

Das Workshop-Datenmodell dient als eine Schablone, die Platzhalter für die zu erzeugenden Daten enthält, und für den konkreten Workshop angewendet werden kann. Anderl spricht im Zusammenhang der Produktentwicklung von der Intantiierung des Produktdatenmodells, um daraus das Produktmodell zu erzeugen [11]. Diese Daten sind z. B. die Teilnehmer, der Terminplan oder auch jede erzeugte Idee. Repräsentiert wird das Datenmodell z. B. durch Dokumentenvorlagen oder auch Datenbanken.

Das Befüllen des Datenmodells wird durch die Umsetzung der Prozesse des Prozessmodells und die Bestimmung der Instanzen des Organisationsmodells erreicht. Damit wird deutlich, dass ein Teilmodell allein nicht ausreichend sein kann, um die gesamte Komplexität eines Workshops zu erfassen.

Workshop-Organisationsmodell

Das Workshop-Organisationsmodell bildet die Ressourcen ab, die für die Durchführung des Workshops notwendig sind. Hierzu zählen auf der einen Seite die Personen, die als Organisatoren, Auftraggeber und Teilnehmer an dem Prozess beteiligt

sind, aber auch die benötigten Hilfsmittel, wie z. B. Räume, Präsentations- und Workshoputensilien.

Es ist zu berücksichtigen, dass sich die Anforderungen an die Teilnehmer während des Bahnhofsmodells ändern, je nachdem, welches Ziel mit einem Workshop verfolgt wird. Bei der Festlegung eines Megatrends, der als Grundlage des Geschäftsmodells des gesamten Unternehmens dienen soll, werden vor allem organisatorisch-strategische Kompetenzen gefordert, während bei der Findung einer konkreten Produktidee die fachlich-operative Kompetenz im Vordergrund steht.

4.2 Umsetzung des Workshopmodells im Bahnhofsmodell

Das Bahnhofsmodell etabliert eine Workshopabfolge, die aus 4 einzelnen Schritten besteht (Bild 2). Jeder einzelne dieser Schritte basiert auf dem allgemeinen Workshopmodell und stellt eine eigene, geschlossene Einheit dar. Durch diese strikte Trennung der einzelnen Schritte kann der Prozess mit einem der späteren Schritte gestartet werden. Diese Vorgehensweise stellt den Normalfall dar, da auf höchster strategischer Ebene die für das Unternehmen wichtigsten Megatrends identifiziert werden. Anschließend werden, ähnlich einer hierarchischen Dekomposition, die Megatrends in zahlreiche Handlungsfelder, diese in einzelne Technologien und schließlich in konkrete Produktideen aufgespalten.

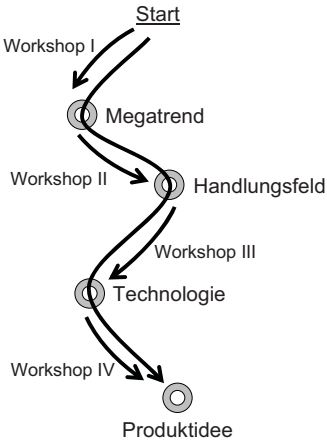
Workshop I

Das Bahnhofsmodell beginnt mit dem Wunsch, ein neues, zukünftige Märkte bedienendes Produkt zu entwickeln. Hierzu wird in einem ersten Workshop die Frage gestellt, welcher Megatrend für das Unternehmen relevant ist und daher als Grundlage von Produktideen dienen soll. Dieser Workshop findet auf höchster strategischer Ebene statt, sodass die Teilnehmer der strategischen Führungsebene angehören müssen.

Workshop II

Nachdem ein Megatrend ausgewählt wurde, müssen innerhalb dieses sehr allgemeinen Felds abgeschlossene Handlungsfelder identifiziert werden. Diese Handlungsfelder fokussieren üblicherweise auf das bestehende Produktspektrum des Unternehmens, können aber auch den Einstieg in einen neuen Geschäftsbereich

bedeuten. Damit wird deutlich, dass auch dieser Workshop auf strategischer Ebene stattfindet.



WS I	Identifizieren von Megatrends auf höchster strategischer Ebene
WS II	Umsetzen eines Megatrends in technische Handlungsfelder auf strategischer Ebene
WS III	Identifizierung technischer Potentiale oder Probleme einer innovativen Technologie innerhalb eines Handlungsfelds auf strategischer und operativer Ebene
WS IV	Entwicklung konkreter Produktideen für eine innovative Technologie auf operativer Ebene

Bild 2: Das Bahnhofsmodell zur Erzeugung von Produktideen

Workshop III

Nachdem ein Handlungsfeld definiert wurde, wird im dritten Workshop eine diesem Feld angehörende Technologie ausgewählt, in der entweder technische Potenziale oder Probleme erkannt wurden, die den Einsatz innovativer Lösungen fordern. Aufgrund der Betrachtung konkreter Technologien, der Abschätzung des Zukunftspotenzials und der Identifikation von Problemen sollten an diesem Workshop sowohl Teilnehmer der strategischen als auch der operativen Unternehmensebene teilnehmen.

Workshop IV

Wurden die Potenziale und Probleme einer Technologie festgelegt, erfolgt im letzten Workshop die Erzeugung innovativer Produktideen. Der Teilnehmerkreis sollte hier aus operativ tätigen Ingenieuren bestehen, die in der Lage sind, innovative Ideen zu entwickeln und umzusetzen.

5 Zusammenfassung & Ausblick

Das Bahnhofsmodell ist eine systematische Abfolge von Workshops zur Erzeugung von Ideen. Hierbei können die Ideen sowohl der strategischen, abstrakten als auch der

operativen, konkreten Ebene angehören. Durch die eindeutige Zielstellung jedes einzelnen Workshops hinsichtlich der Zugehörigkeit der Ideen zu einer der genannten Ebenen wird vermieden, dass z. B. strategisch orientierte Ideen in einem operativ ausgerichteten Workshop diskutiert werden. Damit wird der gesamte Prozess der Ideengenerierung deutlich effektiver.

Die Gründung des Bahnhofsmodells auf dem allgemeinen Workshopmodell unterstützt insbesondere die Implementierung in einem datenbankgestützten Datenmanagementsystem. Dadurch kann ein hoher Grad an Standardisierung in der Organisation des Workshops, der Auswahl der Teilnehmer etc. erreicht werden, sodass deutlich mehr Zeit für die individuelle Ausarbeitung des eigentlichen Workshops zur Verfügung steht.

Literatur

[1] *Naisbitt, J.: Megatrends 2000 - Ten New Directions for the 1990´s*. William & Morrow Company, Inc., 1990

[2] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007

[3] Schulz, Ingo: *Multimethodische Arbeitsumgebung für die Produktentwicklung*. Aachen: Shaker, 2008. ISBN 978-3-8322-7260-9

[4] Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 4. Aufl., Berlin: Springer, 1998

[5] Altschuller, G. S.: *Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme*. 2. Aufl., Cottbus: PI – Planung und Innovation, 1998

[6] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth, 1993

[7] Creveling, C. M.; Slutsky, J. L.; Antis, D.: *Design for Six Sigma – in Technology and Product Development*. 1. Aufl., Upper Saddle River: Pearson Education, 2003

[8] Eversheim, W., Hrsg.; *Innovationsmanagement für technische Produkte*. VDI-Buch, Berlin: Springer, 2002

[9] Görs, J.; Horton, G.; Chelvier, R.: *Homepage der Zephram GbR, Magdeburg*. www.zephram.de, aufgerufen am 10.08.2008

[10] Burmeister, K.; Neef, A.: *Vom Megatrend zum Produkt - oder was Sie schon immer über die Trend und Zukunftsforschung wissen wollten*; z-Punkt, 2007

[11] Anderl, R.: *Produktdatentechnologie C – Produkt- und Prozessmodellierung*. Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion, TU Darmstadt, 2005

Fluidtronic
Entwicklungsumgebung für fluidtechnisch-mechatronische Systeme

Günther Schuh, Michael Lenders, Jochen Müller, Christopher Nussbaum

Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen
Email: G.Schuh@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

1 Einleitung

Die Fluidtechnik hat am immer stärker wachsenden Gesamtumsatz des deutschen Maschinen- und Anlagebaus einen bedeutenden Anteil. Mit einem Welthandelsanteil von 33% ist sie innerhalb des Maschinen- und Anlagebaus die bedeutendste Branche und weist seit Jahren ein überdurchschnittliches Wachstum auf /1/. Geprägt wird die Fluidtechnikbranche, neben einigen Großunternehmen, die ein breites Produktspektrum abdecken, vor allem durch kleine und mittlere Unternehmen, die spezielle fluidtechnische Komponenten anbieten oder sich auf Systeme für dedizierte Anwendungen spezialisiert haben.

Diese Anwendungen sind heute in beinahe allen Bereichen der Industrie vertreten. Stellten fluidtechnische Maschinen und Anlagen früher noch gesteuerte mechanische Systeme dar, so haben sie sich heute zu komplexen mechatronischen Produkten mit hydraulischen, pneumatischen, mechanischen und signalverarbeitenden Komponenten gewandelt. Erst diese Kombination der hydraulischen Antriebe mit elektronischer Steuerungstechnik ermöglicht komplexere Abläufe und steigert somit die Effizienz des Gesamtsystems /2/.

Da fluidtechnische Anwendungen heutzutage von allen Bereichen der Industrie genutzt werden, werden sie demzufolge meist auf Basis von spezifischen Kundenanforderungen und in geringen Losgrößen hergestellt. Damit der Betrieb dieser Anlagen zuverlässig verlaufen kann, ist nicht nur die richtige Abstimmung aller Komponenten sowie deren Eigenschaften nötig, sondern auch eine effiziente Zusammenarbeit spezialisierter KMU als Zulieferer und OEM unabdingbar. Bisher werden die heutigen Anforderungen in Entwicklungsprozessen allerdings nur unzulänglich

berücksichtigt. Beispielsweise kommt es bei der Zusammenarbeit der Disziplinen aufgrund der mangelhaften Vernetzung und Synchronisation während der Entwicklung häufig zu funktionalen Problemen bei den Maschinenmodulen, welche erst zu einem späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess entdeckt werden: Dies erfordert eine angepasste Entwicklungsumgebung zur Absicherung der Produktzuverlässigkeit in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Darüber hinaus ist auf Grund unstrukturierter Informationsflüsse ein Ableiten von Anforderungen an einzelne Komponenten anhand der vorgegebenen Randbedingungen an das Gesamtsystem nur mit Hilfe der Erfahrung aus vorherigen Projekten möglich. Dies gilt vor allem für Material und System betreffende Unverträglichkeiten, welche nicht frühzeitig im Entwicklungsprozess erkannt werden und daher auf Grund des späteren Auftretens ein kostenintensives, iteratives Vorgehen zur Behebung des Problems erfordern. Auch der Einsatz von fluidtechnischen Simulationssystemen findet derzeit nicht entwicklungsbegleitend statt, sondern kommt nur zum Einsatz, sollte die erfahrungsbasierte Auslegung nicht ausreichen. Durch diesen mangelhaften Einsatz fluidtechnischer Simulationstools innerhalb des Entwicklungsprozesses ist eine planmäßige Inbetriebnahme daher zunehmend aufwändiger und erschwert das Verständnis für das Gesamtsystem.

2 Vorstellung des Verbundprojektes Fluidtronic

Fluidtechnische Systeme haben sich zu komplizierten mechatronischen Produkten gewandelt. Allerdings bildet die klassische Definition der Mechatronik laut Richtlinie VDI 2206 nur die Integration von Mechanik, Elektronik und Informatik. Der Bereich Fluid wird laut der Definition in der VDI 2206 der Mechanik untergeordnet und lässt somit viele Aspekte unbeleuchtet, welche allerdings einen großen Einfluss auf das dynamische Verhalten der fluidtechnischen Komponenten und somit auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems haben.

Da es das Hauptziel des Verbundprojektes Fluidtronic ist, eine zuverlässigere, schnellere Inbetriebnahme und eine Anlagenfunktion über die komplette Produktlebensdauer zu gewährleisten, müssen inhärente Systemrisiken bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess mit einer mechatronischen Entwicklungsumgebung erkannt und behoben werden. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, die Zusammenarbeit aller beteiligten Fachdisziplinen und Unternehmen besser zu synchronisieren, zu takten und zu

integrieren. Dies soll mittels einer unternehmensübergreifenden mechatronischen Entwicklungsumgebung für fluidtechnisch-mechatronische Systeme erreicht werden.

In Bild 1 sind der Zusammenhang und die Wirkbeziehungen zwischen den im Projekt betrachten Elementen in einer integrierte Entwicklungsumgebung für fluidtechnisch-mechatronischer Systeme aufgezeigt.

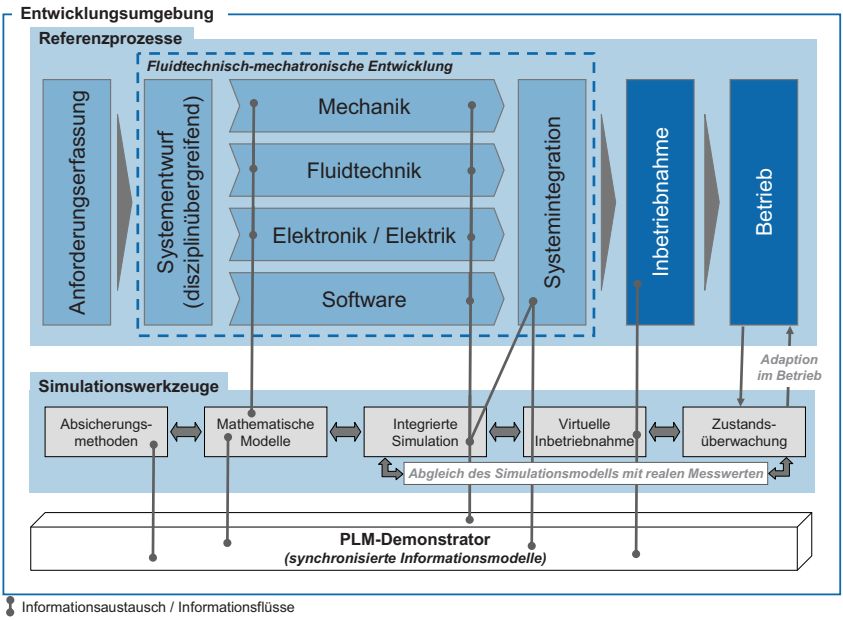


Bild 1: Integrierte fluidtechnisch-mechatronische Entwicklungsumgebung

Diese Entwicklungsumgebung umfasst alle Disziplinen und Aktivitäten innerhalb des Produktentwicklungsprozesses, sowie die darin genutzten Methoden, Werkzeuge und IT-Systeme. Darüber hinaus beinhaltet sie sowohl die zugehörigen Produkt- und Prozessinformationen vom Systementwurf bis hin zur Inbetriebnahme, sowie die Rückkopplung der Betriebsdaten während des Produktlebenszyklus.

3 Zentrale Herausforderungen für die Entwicklung

Aufgrund der mangelhaften Berücksichtigung heutiger Anforderungen an moderne Entwicklungsumgebungen kommt es zu Defiziten bei der Entwicklung, der Auslegung und

der Inbetriebnahme fluidtechnischer-mechatronischer Systeme. Dies liegt an der Tatsache, dass sich fluidtechnisch-mechatronische Systeme nicht nur durch eine enge Vernetzung der Disziplinen, sondern auch durch komplexe Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten auszeichnen. Aufgrund der vorliegenden engen Vernetzungen der Teilsysteme untereinander und der komplexen Strukturen kommt der Absicherung der Produktzuverlässigkeit in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eine bedeutende Rolle zu.

Diese Absicherung der Produktzuverlässigkeit muss mit Hilfe einer mechatronischen Entwicklungsumgebung, welche bereits früh im Entwicklungsprozess zum Einsatz kommt, erfolgen. Bisher erfolgt eine Simulation der Wechselwirkung einzelner Systemkomponenten nur in Ausnahmefällen und nur zu einem sehr späten Zeitpunkt innerhalb des Entwicklungsprozesses. Dies verlängert die Entwicklungsdauer fluidtechnisch-mechatronischer Produkte ungemein.

Die komplexen Wechselwirkungen einer durchgängigen Vernetzung der Disziplinen Mechanik, Elektronik, Fluidtechnik und Software können allerdings nur in Einklang gebracht werden, wenn ein Entwicklungsteam bereits in den frühen Phasen der Systemauslegung eng miteinander zusammenarbeitet. Der mechatronische Entwicklungsprozess in der industriellen Fluidtechnik ist heute jedoch noch stark durch die mechanische Disziplin geprägt, die zeitliche Einbindung der weiteren Disziplinen erfolgt sehr spät. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Produktentwicklung die Wechselwirkungen zwischen den Disziplinen nur unzureichend berücksichtigt. Die auftretenden Interaktionen zwischen den verschiedenen fluidtechnischen Disziplinen werden aber aufgrund der zunehmenden räumlichen Integration der Komponenten immer komplexer und führen bei Nichtbeachtung zu Verzögerungen bei Produktentwicklung und Inbetriebnahme /3/.

Darüber hinaus ist die Produktentwicklung in den Unternehmen aufgrund von gewachsenen Strukturen immer noch durch eine sequentielle Bearbeitung gekennzeichnet. Beispielsweise wird die Funktionsweise eines Moduls innerhalb nur einer Disziplin entwickelt und erst anschließend zur Weiterentwicklung an die nächste weitergegeben, da die sequentiell organisierten Entwicklungsprozesse den Informationsaustausch zwischen den beteiligten Fachleuten und die Interaktionen zwischen den Disziplinen hemmen.

Weitere Gründe für den mangelhaften Informationsaustausch und der damit verbundenen Synchronisation sind isolierte Begriffswelten, Vorgehensmodelle, Methoden und Werkzeuge innerhalb der unterschiedlichen Disziplinen der Produktentwicklung, welche die Zusammenarbeit in der frühen Phase stark einschränken. Diese führen zu Missverständnissen aufgrund unterschiedlicher Bedeutungen für gleiche Begriffe, die wiederum zeitaufwändige Iterationsschleifen zur Folge haben, und zu Medienbrüchen, welche oft nur recht kostspielig behoben werden können.

Im übergeordneten Entwicklungsprozess treten weitere Schwachstellen in Form einer mangelnden Dokumentation der Anforderungen, einer unzureichende entwicklungsbegleitenden Dokumentation, einer fehlenden Durchgängigkeit und eines unstrukturierten Vorgehens auf. All die genannten Schwachstellen führen letztendlich zu einer unvollständigen Umsetzung der Kundenanforderungen in das Produkt. Die damit verbundenen auftretenden Probleme werden derzeit vor allem durch zusätzliche zeitaufwändige Iterationsschleifen im Entwicklungsprozess behoben, mit dem Ziel die einzelnen Teilsysteme zu einem konsistenten, funktionsfähigen Gesamtsystem zusammenzuführen.

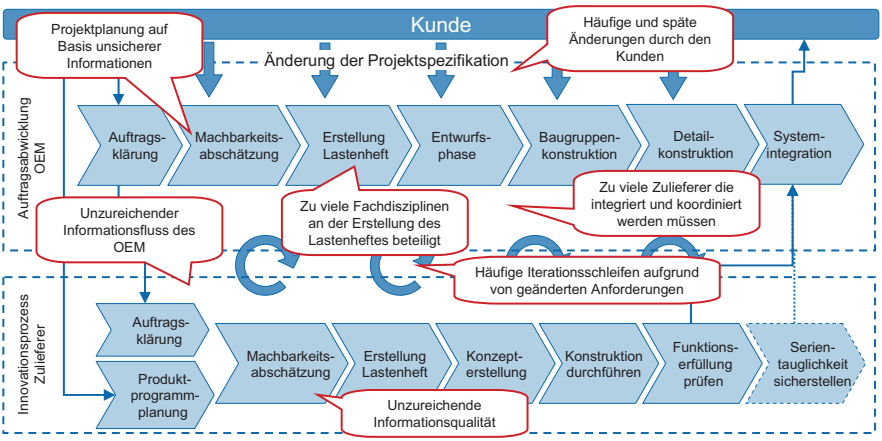


Bild 2: Ablauf und Schwachstellen der aktuellen Produktentwicklung

Die Schwachstellen der aktuellen mechatronischen Produktentwicklung sowie die Interaktion der Projektpartner bei der Entwicklung eines fluidtechnisch-mechatronischen Produktes werden in Bild 2 visualisiert.

4 Motivation

Die Verkürzung der Entwicklungsdauer und eine Verbesserung der Termintreue bilden den größten Stellhebel zur Effizienzsteigerung eines mechatronischen Entwicklungsprozesses im Maschinen- und Anlagebau. Um die Entwicklungsdauer aufgrund der vorliegenden, engen Vernetzungen der Teilsysteme untereinander und der Interdisziplinarität innerhalb einer mechatronischen Entwicklung senken zu können, müssen die Produktfunktionen durch die Integration der einzelnen Fachbereiche in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses realisiert werden. Dafür müssen die Anforderungen von allen Beteiligten (Kunden, Fachbereiche, Lieferanten) innerhalb einer mechatronischen Entwicklungsumgebung gesammelt und gemeinsam durch die betroffenen Disziplinen (Mechanik, Elektrik, Software und Fluidtechnik) bewertet und priorisiert werden. Basierend auf den Produktanforderungen entsteht anschließend ein disziplinübergreifendes, abgestimmtes Konzept entstehen, welches Produktskizzen und eine Strukturierung auf konzeptioneller Ebene (z.B. Funktionsstruktur) beinhaltet. Das disziplinübergreifende Produktkonzept und die konzeptionelle Produktstruktur bilden die Brücke zwischen der frühen Phase der Anforderungsdefinition und der Phase der Konstruktion und legen damit die Basis für den darauf aufbauenden disziplinspezifischen Entwurf fest /4/.

Innerhalb dieser Entwicklungsumgebung verringert dann anschließend eine verbesserte Simulationsumgebung in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses den Anpassungsbedarf der entwickelten Regleralgorithmen mechatronischer Produkte. Eine darin integrierte Hardware-in-the-Loop Simulation ermöglicht einen verbesserten Austausch der Entwicklungsparameter zwischen Projektpartner und OEM bei der virtuellen Auslegung neuer mechatronischer Produkte und steigert somit die Effizienz des Entwicklungsprozesses. Hardware-in-the-Loop stellt eine Simulationsmethode, bei welcher ein eingebettetes System (z.B. ein reales elektronisches Steuergerät oder eine reale mechatronische Komponente) über seine Ein- und Ausgänge an ein angepasstes Gegenstück, welches als Nachbildung der realen Umgebung des Systems dient, angeschlossen wird, dar. Mittels Hardware-in-the-Loop ist es möglich eingebettete Systeme zu testen und abzusichern, um sowohl die Entwicklung als auch eine vorzeitige Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen zu unterstützen. Der Austausch der Entwicklungsparameter kann nur dann ermöglicht werden, wenn das Expertenwissen als

Grundlage für eine optimale Auslegung des mechatronischen Produkts in der Entwicklungsumgebung genutzt wird. Zum Schutz des spezifischen Expertenwissens wird findet der Austausch der Entwicklungsparameter zwischen OEM und Projektpartner in Form von Black Box Modellen statt. Mit Hilfe der Einbindung einer über den Entwicklungsprozess hinweg integrierten und parallel verlaufenden Simulation sowie eines iterativen Austausches bei der virtuellen Auslegung ist somit die Funktionssicherheit neu entwickelter mechatronischer Produkte bereits frühzeitig zu gewährleisten.

5 Anforderungen an die Entwicklungsumgebung

Die in diesem Forschungsvorhaben zu gestaltende Entwicklungsumgebung besteht einerseits aus einer Simulationsumgebung und andererseits aus definierten Workflows der Entwicklungsprozesse.

Mit Hilfe einer Simulationsumgebung soll das dynamische Verhalten eines mechatronischen Gesamtsystems schneller und präziser vorhergesagt und optimiert werden, um dadurch eine effektivere und effizientere Abwicklung sowohl in der Entwicklung als auch in der Inbetriebnahme zu erzielen. Dabei soll es ermöglicht werden, dass der OEM auf erweiterte Parameter bezüglich des Komponentenverhaltens im Zuge der Entwicklung zugreifen kann. Eine möglichst wirklichkeitsnahe virtuelle Inbetriebnahme soll am Ende der Entwicklungsphase ermöglicht werden. So können eventuelle Fehler noch vor der tatsächlichen Inbetriebnahme entdeckt und behoben werden bevor überhaupt kostspielige Änderungen an der Hardware notwendig werden.

Der Datenaustausch zwischen OEM und Zulieferer muss dafür standardisiert werden. Für den Zulieferer muss dabei eindeutig sein, welche dynamischen Randbedingungen seitens des Gesamtsystems auf seine Komponente einwirken und welches Subsystemverhalten der Zulieferer mit seiner Komponente erzielen soll.

Für den OEM wiederum ist es entscheidend, dass er das dynamische Verhalten der einzelnen Subsysteme der verschiedenen Zulieferer möglichst präzise in einer Gesamtsystemsimulation abbilden kann. Aus dieser lassen sich Wechselwirkungen bzw. Unverträglichkeiten zwischen den Komponenten des Gesamtsystems vorhersagen. Des Weiteren soll eine Kopplung von Simulations- und Projektierungsmanagement sichergestellt werden. Die Komponentenauswahl, die sich aus der Systemsimulation ergibt soll direkt in Form von technischen Unterlagen festgehalten werden, um so parallel

planende Arbeitsvorgänge von der Angebotsphase bis hin zur Inbetriebnahme zu unterstützen.

Ein besonders wichtiger Aspekt für die Zulieferer ist der Schutz seines komponentenspezifischen Know-hows. Die Beschreibung des dynamischen Komponentenverhaltens darf daher beim Datenaustausch innerhalb der Simulationsumgebung nicht mit der Preisgabe des systemspezifischen Know-hows einher gehen und ist strikt voneinander zu trennen.

Ein geeigneter Entwicklungsprozess für fluidtechnisch-mechatronische Produkte hingegen synchronisiert alle disziplinspezifischen Abläufe mit klaren, vordefinierten Informationsflüssen, von der Anforderungserfassung und dem disziplinübergreifenden Systementwurf bis hin zur Systemintegration. Basierend auf einem disziplinübergreifenden Konzept (Systementwurf) werden fachspezifische Vorgehensmodelle, Methoden und Werkzeuge für die Erzeugung von Produktinformationen eingesetzt. Anschließend werden die disziplinspezifischen Ergebnisse zu einem Gesamtsystem integriert und die Systemeigenschaften abgeglichen /5/.

6 Simulationsumgebung

Eine Simulationsumgebung muss von den Konstrukteuren einfach zu handhaben sein und verlässliche Aussagen über das spätere Systemverhalten in Hinblick auf Zuverlässigkeit und Systemperformance zulassen /6/. Innerhalb des Verbundprojektes Fluidtronic werden daher neue Modelle und Methoden entwickelt, die aktuell vorhandene Lücken in der Simulation fluidtechnisch-mechatronischer Systeme schließen und eine verlässliche virtuelle Auslegung der Anlage überhaupt erst ermöglichen.

Beispielsweise stellt Reibung innerhalb der als Aktor wirkenden Zylinder einen dominierenden Einfluss auf das Systemverhalten von fluidtechnischen Maschinen und Anlagen dar. Die Zylinderreibung musste bei bisherigen Auslegungen immer in einem sehr weiten Feld angenommen werden und konnte in Simulationen, wenn überhaupt, nur sehr grob abgeschätzt oder lediglich über nicht greifbare oder empirische Daten parametriert werden. Eine exakte Vorhersage des Systemverhaltens und demzufolge auch eine vorherige, angepasste Auslegung der Steuerungsalgorithmen war folglich nicht möglich. Um dieses weite Feld, in dem man die Reibung bisher annehmen musste, zu schmälern und um eine verständliche Bedatung zu gewährleisten wird ein Reibkraftmodell entwickelt,

welches im Gegensatz zu bisher bekannten Ansätzen weitere relevante Einflussgrößen berücksichtigt und durch bekannte Geometrie bzw. Stoffdaten bedatet werden kann. So soll das Modell die Reibkraft in Abhängigkeit vom verwendeten Dichtungstypen innerhalb des Zylinders, vom Kolben- und Stangendurchmesser sowie von der Oberflächenbeschaffenheit der Zylinderlaufbahn abbilden, und das unter Berücksichtigung der systeminternen Zustandsgrößen Verfahrgeschwindigkeit, Kammerdrücke und Viskosität des verwendeten Fluids.

Mit der Einbettung dieses Reibkraftmodells in vorhandene Systemsimulationsprogramme können virtuelle Anlagenuntersuchungen und -auslegungen für bestimmte Betriebspunkte zu festen Zeitpunkten sehr gut durchgeführt werden. Aber gerade die Themen Zuverlässigkeit, Standzeit und Veränderung des Systemverhaltens über dem gesamten Produktlebenszyklus bleiben von den bisher am Markt verfügbaren Systemsimulationsprogrammen noch unberücksichtigt. Diese Themen mit Hilfe von Simulationen abbilden zu können, ist ein Hauptaugenmerk des Forschungsvorhabens. Im Fokus stehen hier die Ölalterung, die verschleißbedingte Veränderung des Systemverhaltens und die Verschmutzung innerhalb fluidtechnischer Systeme.

Als erstes wurde hierfür innerhalb des Verbundprojektes eine Simulation von Partikelverteilungen in fluidtechnischen Systemen entwickelt. Mit Hilfe von Modellen für Partikelquellen, Partikelsenken und entsprechenden Übertragungsgliedern können so die Verteilungen von unterschiedlichen Partikeln, zum Beispiel in Größe oder Stoffeigenschaften, dargestellt werden. Partikelquellen bringen Partikel in ein System ein, während Partikelsenken diese wieder aus dem System filtern. In fluidtechnischen Systemen können Partikel zum Beispiel über die Bewegung der Zylinderstange oder über den Belüftungsfilter in das System hereingetragen werden. Aber auch der interne Verschleiß von Komponenten, wie Pumpen, trägt zu einem Eintrag von Partikeln bei. Die Ablagerung von Partikeln über Senken erfolgt einerseits gezielt durch Filter, findet aber auch an den Böden von Tankbehältern oder dergleichen statt. Die Simulation von Partikelverteilungen in fluidtechnischen Systemen eröffnet vielfältige neue Möglichkeiten. Der Anwender erlangt aber vor allem ein besseres Verständnis von den Vorgängen der Verteilung und Vermischung unterschiedlicherer Partikelklassen im System. Mit der Simulation von Partikelverteilungen können zum Beispiel unterschiedliche Filtrationskonzepte analysiert und speziell auf die jeweilige Anwendung abgestimmt werden. Auch ist es mit Hilfe der Simulation möglich Partikelverteilungen durch geschickte

Annordnung von Leitungen und Filtern so steuern zu können, dass speziell im Bereich von schmutzempfindlichen Komponenten hohe Fluidreinheiten erzielt werden, während das übrige System mit normalen Reinheiten betrieben wird. Die Analyse der Verteilung unterschiedlicher Partikelklassen ermöglicht auch Vorhersagen über den Verschleiß oder sogar drohenden Ausfall von Komponenten und kann so als Hilfsmittel zur Auslegung von Condition Monitoring-Strategien herangezogen werden.

Einen weiteren Punkt stellt die virtuelle Vorhersage der Ölalterung dar. Mit Hilfe von Ölalterungsmodellen, die in die Simulation integriert werden, können so anhand der Betriebszustände der Anlage qualitative Aussagen darüber getroffen werden, wie sich verschiedene konstruktive Änderungen am System auf die Ölalterung auswirken. In Zeiten immer weiter steigender Rohölpreise ist die optimale Ausnutzung der Ölstandzeit ein wichtiges Auslegungskriterium und vor allem ein nicht zu unterschätzendes Kaufargument gegenüber dem Anlagenbetreiber. Denn vor allem große hydraulische Anlagen, wie zum Beispiel Schmiedepressen, fassen durchaus 30000l und mehr des wertvollen Rohstoffes und sollten die Ölstandzeit daher optimal ausnutzen.

Mit Hilfe aller zuvor genannten Erweiterungen können damit zuverlässige Simulationen über die gesamte Lebensdauer einer Anlage erfolgen. Solche Simulationen können außer für die Auslegung eines fluidtechnisch-mechatronischen Systems auch für die virtuelle Inbetriebnahme einer Anlage dienen. Bei einer solchen virtuellen Inbetriebnahme wird die Steuerung ebenfalls bereits in der Software abgebildet und es lassen sich optimale Steuer- und Regelalgorithmen, ohne die Gefahr einer Beschädigung der realen Anlage, erproben. Der gesamte Auslegungsprozess kann also virtuell erfolgen, was neben Zeit- und Kostenvorteilen auch die Erprobung völlig neuer Konzepte ermöglicht, da die Erprobung unterschiedlicher Varianten sehr schnell erfolgt.

Durch die Anbindung der realen Steuergeräte an das virtuelle Modell der Anlage, die sogenannte Hardware-in-the-Loop Simulation, können in einem letzten Schritt die Hardwarebausteine der Steuerung optimiert werden und die Regelung optimal auf die Anlage abgestimmt werden, so dass bei der späteren realen Inbetriebnahme nur noch Feinjustierung nötig sind. Auch die Verkabelung der Schaltschränke kann so bereits im voraus abgeprüft werden. Die Funktionen der Steuerung sowie die optimalen Regelparameter müssen nicht mehr vorsichtig an der realen Anlage herausgefahren werden, um eine Anlagenbeschädigung zu vermeiden, sondern können bereits am virtuellen Modell erprobt werden.

7 Entwicklungsprozess innerhalb der Entwicklungsumgebung

Den Einstieg in die mechatronische Produktentwicklung stellt die Erfassung der Anforderungen seitens des OEM dar. Zuvor legt der Kunde die Anforderungen an das mechatronische Produkt innerhalb eines Lastenheftes zusammen mit dem OEM fest. Hierbei kommt es seitens des OEMs zum Einsatz eines vorher definierten Wertesystems. Das Wertesystem stellt einen Ordnungsrahmen zur Abbildung einer Zielhierarchie zur Verfügung, aus der die Anforderungen sowohl an das Produkt als auch an den Prozess abgeleitet werden können. In einem Wertesystem werden zu Beginn eines jeden Projektes Ziele für und mit allen Anspruchsgruppen systematisch hergeleitet und durch eine gemeinsame Gewichtung und Priorisierung zu einer Zielhierarchie formiert, da die Produkteigenschaften nur durch eine transparente, am Wertverständnis aus Kundensicht ausgerichtete Zielhierarchie konsequent wertorientiert und verschwendungsfrei gestaltet werden können /7/.

Basierend auf dem Lastenheft wird ein Pflichtenheft erstellt, das mit dem Kunden abgestimmt werden muss, um zu klären, inwiefern die Anforderungen seitens des Kunden ausreichend umgesetzt werden. Im darauf folgenden Schritt muss mit diesem Pflichtenheft nun in Verbindung mit der Produktarchitektur das Produktkonzept festgelegt werden. Aufgrund mehrerer möglicher Kombinationen einzelner Komponenten zur Erreichung der Anforderungen des Kunden ist eine weitere Abstimmung zur Festlegung des zu verfolgenden Konzepts erforderlich. Das in Abstimmung mit dem Kunden festgelegte Konzept bildet nun den Ausgangspunkt der Zusammenarbeit zwischen dem OEM und den Zulieferern. In einem nächsten Schritt werden die Komponenten in einer Wechselwirkungsmatrix gegenübergestellt. Diese Wechselwirkungsmatrix bildet nun die Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten bezüglich Ihrer Funktionen ab. Anhand dieser Wechselwirkungsmatrix erfolgt eine Priorisierung der Komponenten hinsichtlich der Beeinflussbarkeit durch andere Komponenten sowie der Einflussnahme auf andere Komponenten. Diese Priorisierung bildet die Reihenfolge in der die Anforderungen an die jeweilige Komponente an den dafür zuständigen Zulieferer geleitet werden. Der Austausch der Daten mit den Zulieferern erfolgt unter Zuhilfenahme einer Black Box Logik. Das bedeutet, dass die bereits bekannten Anforderungen, also Input und Output seitens des Gesamtsystems bezüglich der jeweiligen Komponente an den Zulieferer geleitet werden. Der Zulieferer prüft zuerst, ob die geforderte Funktion an seine Komponente zu erfüllen ist.

Ist dies nicht der Fall, so signalisiert der Zulieferer dem OEM, dass eine Funktionserfüllung mit der angeforderten Komponente nicht möglich ist und eine Optimierung bzw. eine Neuentwicklung der Komponente notwendig ist. Die Erstellung bzw. die Optimierung der geforderten Komponente verläuft innerhalb der Simulationsumgebung mit Hilfe der spezifischen Simulationstools des Zulieferers, die die aktuell noch vorhandenen Lücken innerhalb der Simulation fluidtechnisch-mechatronischer Anlagen mittels internem Expertenwissen beheben können und somit das dynamische Verhalten der Komponente kontinuierlich abbilden können. Ziel ist es, das dynamische Verhalten der Komponente möglichst wirklichkeitsgetreu abzubilden und virtuell zu testen. Das dynamische Subsystemverhalten wird mittels einer Black-Box-Logik verschlüsselt und zu einem innerhalb des Workflows festgelegten Synchronisationspunkt im Entwicklungsprozess an den OEM zurückgeschickt. Dadurch wird verhindert, dass der OEM als auch andere Zulieferer technologisches Know-how im Detail aus der Subsystembeschreibung ableiten können. Die Black Box kann jedoch an das bisherige virtuelle System angekoppelt und erste Simulationen können durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser virtuellen Systemsimulation ist es möglich, sowohl das dynamische Systemverhalten als auch kritische Funktionsbereiche sowie Wechselwirkungen im Zusammenspiel untereinander besser zu untersuchen. Verhält sich das Gesamtsystem nach der Systemsimulation stabil und muss keine Nachbesserung an einer der Systemkomponenten erfolgen, so wird die nächste Komponente dem dafür zuständigen Zulieferer übergeben. Diese Komponente enthält nun den simulierten Output der Vorherigen als Input und eine vorgegebene Anforderung bezüglich des Outputs.

Sollte es in der nachfolgenden Gesamtsimulation durch den OEM zu Problemen im Zusammenspiel der einzelnen Komponenten kommen, so ist es notwendig, den Fehler zu isolieren, zu analysieren und anschließend eine Nachbesserung der jeweils verantwortlichen Komponenten bei dem dafür verantwortlichen Zulieferer durchführen zu lassen. Der Ablauf innerhalb der Entwicklungsumgebung kann Bild 3 entnommen werden.

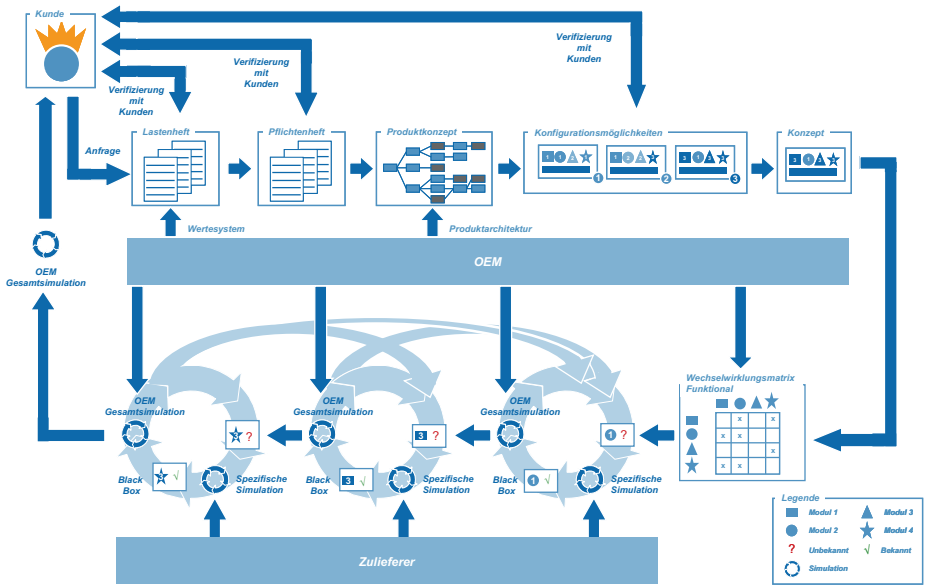


Bild 3: Ablauf innerhalb der Entwicklungsumgebung

Durch diese direktere und effizientere Zusammenarbeit sowie auf Grund der mehrfachen Iterationsschleifen zwischen dem Kunden, dem OEM und dem Zulieferern innerhalb der Simulationsumgebung ist es möglich zuverlässigere und robustere Maschinen in kürzerer Zeit zu entwickeln.

8 Zusammenfassung

Auf Grund der mangelhaften Berücksichtigung heutiger Anforderungen in Entwicklungsprozessen kommt es zu Defiziten bei der Konzeption, der Entwicklung und der Inbetriebnahme fluidtechnisch-mechatronischer Systeme. Dies beruht maßgeblich auf den komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Disziplinen und Komponenten. Um dies zu verhindern, ist eine enge Vernetzung der Disziplinen in der frühen Phase der Entwicklung zur frühen Absicherung der Produktzuverlässigkeit erforderlich. Die zu entwickelnde Entwicklungsumgebung des Verbundprojektes Fluidtronic legt daher den Schwerpunkt zum Einen auf eine stärkere Einbindung der Zulieferer im Entwicklungsprozess und zum Anderen auf eine kontinuierliche,

entwicklungsbegleitende Simulationsumgebung, die es ermöglicht, mittels Hardware-in-the-Loop die einzelnen Systemmodule kontinuierlich zu simulieren. Der Austausch der Daten innerhalb der Simulationsumgebung erfolgt über eine Black Box Logik. Zum Einen gilt es, so das Know-How der Zulieferer zu schützen und zum Anderen wird eine engere Vernetzung innerhalb des Entwicklungsprozesses zwischen Zulieferer und OEM ermöglicht.

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Fluidtronic erstellt, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ finanziell gefördert und vom PTKA in Karlsruhe als Projektträger betreut wird.

Literatur

[1] Wichers, R. *Maschinenbaukonjunktur.* Vortrag im Rahmen der Mitgliederversammlung des Forschungsfonds Fluidtechnik im VDMA am 21.06.2005 in Frankfurt

[2] Stammen, C. *Condition Monitoring für intelligente hydraulische Antriebe*, RWTH Aachen 2005

[3] Schuh, G.; Lenders, M.; Dr. Sauer, J. *Quantifizierter Nutzennachweis bei der Einführung einer innovativen CAD-/ PLM-Lösung* – Ein Erfahrungsbericht In: Konstruktion, Ausgabe 11/07

[4] Eigner, M.; Hollerith, T. *Erhöhung der administrativen Zuverlässigkeit mechanischer Produkte durch ein domainübergreifendes Konfigurationsmanagementsystems*. In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A.; Wallaschek, J. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme, Paderborn 2006

[5] Gausemeier, J.; Frank, U.*Stand und Perspektiven der Entwicklung mechatronischer Systeme.* In: Gausemeier, J.; Rammig, F.; Schäfer, W.; Trächtler, A.; Wallaschek, J. (Hrsg.): Entwurf mechatronischer Systeme, Paderborn 2006

[6] Schuh G.; Rozenfeld, H.; Assmus D.; Zancul, E.*Process oriented framework to support PLM implementation*In: Computers in Industry, Ausgabe 08/07

[7] Schuh, G.; et all.*Lean Innovation - Auf dem Weg zur Systematik* In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Aachener Perpektiven, Aachen 2008

Kostenprognose in sehr frühen Stadien der Produktentwicklung

Jörg Feldhusen, Frank Dehen

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen
Email: dehen@ikt.rwth-aachen.de; Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

Inhalt:

Schon in der Phase der Produktkonzeption legt der Konstrukteur die wichtigen Eigenschaften eines Produktes fest und definiert damit entscheidend die daraus resultierenden Herstellkosten. Die nachfolgende Fertigung und Montage bieten nur noch relativ wenig Spielraum für eine Kostensenkung. Ein Konstrukteur muss also über die Kostenwirkung seiner konstruktiven Entscheidungen informiert sein, so dass er gezielt die zu erwartenden Herstellkosten beeinflussen kann. Daher stehen geeignete Methoden zur Unterstützung der frühzeitigen Kostenprognose im Vordergrund des Forschungsinteresses. Viele Lösungsansätze für die Problematik wurden schon entwickelt und dennoch ist dieses Thema noch immer nicht zufriedenstellend erschlossen. Dieser Aufsatz gibt einen Überblick über die schon bestehenden Strategien zur Kostenprognose. Es werden die Probleme aufgezeigt, die oftmals bei deren Anwendung überwunden werden müssen. Insbesondere wird hier die rechnerunterstützte Kostenschätzung betrachtet. Doch nicht allein das Werkzeug zur Kostenschätzung ist für eine erfolgreiche Anwendung entscheidend, sondern auch die Abstimmung mit den schon verwendeten Methoden im Unternehmen müssen berücksichtigt werden, ebenso wie die spezifischen Informations- und Datenflüsse und die zumeist historisch gewachsenen Prozessabläufe im Unternehmen.

Darauf basierend wird eine Methodik für eine effektive und zukunftsfähige Kostenprognose vorgestellt. Sie ermöglicht die Beurteilung eines Entwurfs aus Kostensicht zu einem sehr frühen Zeitpunkt und zudem schlägt sie eine methodische Vorgehensweise zur Integration dieser Kostenschätzung in den Konstruktionsprozess vor.

Die in diesem Aufsatz besprochenen Erkenntnisse und Lösungsansätze basieren auf Forschungsarbeiten des ikt ([1], [2]) und dessen Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern im Rahmen von gemeinsamen Projekten und Workshops.

Abstract:

Even in the stages of product conception, the designer configures the key properties of a product, and defines in that way the resulting manufacturing costs. The subsequent stages of manufacturing and assembly only offer comparatively little scope for cost reduction. Because of this a design engineer has to be informed about the effect of his design decisions, so that he can influence systematically the expected manufacturing costs. For this reason, appropriate methods to support the cost estimation in the early design stages are a main focus of research interest. Several solutions to the problem have been developed but this subject is still

not solved satisfactory. This paper provides an overview of existing strategies. It points out the problems in handling the cost estimation systems, especially computer aided cost estimation. But a successful application depends not only on the cost estimation tool itself. Also important is the adaption of the existing methods used in companies in combination with the new method, as well as the individual information and data flows and the mostly historically grown process sequences have to be considered.

Based on this a methodology for an effective and sustainable estimation technique is introduced. It allows the cost estimation at a very early stage. In addition it offers a systematic approach for the integration into the product development process.

The expertise and approaches in this paper are based on research work of the ikt ([1], [2]) and whose cooperation with different partners of industries within the framework of projects and workshops.

Stichwörter: *Kostenprognose, Entscheidungsunterstützung,*

Keywords: *Cost estimation, Decision-making*

1 Einleitung

Charakteristisch für anspruchsvolle Bauteile ist, dass sie mit ebenso aufwendigen Fertigungsverfahren hergestellt werden müssen. Dies verursacht hohe Herstellkosten. Schon in der Phase der Produktkonzeption legt der Konstrukteur die zentralen Eigenschaften eines Produktes fest und definiert damit entscheidend die daraus resultierenden Herstellkosten [3]. Die nachfolgende Fertigung und Montage bieten nur noch relativ wenig Spielraum für eine Kostensenkung (Bild 1) [4].

Bild 1: Kostenverantwortung in der Produktentwicklung

Daher empfiehlt sich eine Einbindung des Wissens über die fertigungstechnischen Ressourcen des Unternehmens in die frühen Phasen der Konstruktion. Denn seiner hohen Kostenverantwortung kann der Konstrukteur nur gerecht werden, wenn er über die Kostenwirkung seiner konstruktiven Entscheidungen informiert ist. So können gezielt die zu erwartenden Herstellkosten beeinflusst werden. Aus diesem Grund stehen geeignete Methoden zur Unterstützung der frühzeitigen Kostenprognose schon während der Produktplanung im Vordergrund des Forschungsinteresses.

2 Stand der Technik

Die Praxis zeigt, dass bis zu 35% aller Entwürfe als nicht fertigungsgerecht an die Konstruktion zurückverwiesen werden, da das Wissen der Konstruktionsabteilungen über die vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten meist nur mangelhaft ist [5].

Einige Lösungsansätze für diese Problematik wurden schon entwickelt. Im Zentrum steht dabei immer der Bauteilentwurf als 3D-Modell. Die Grundidee ist die Kopplung einer Kalkulation mit dem CAD-System, dem zentralen Werkzeug des Konstrukteurs. Die Lösungen beruhen meist auf Feature- und Ähnlichkeitsanalyse oder auch auf Verwendung von Fuzzylogik vgl. [6]. Hierbei prüft die Kalkulationssoftware die Modellgeometrie und versucht auf dieser Basis Rückschlüsse auf die zu erwartenden Kosten zu ziehen. Diese softwaregestützten Hilfsmittel zur Bereitstellung von Kostenwissen fasst man unter dem Begriff Kosteninformationssysteme zusammen. Sie sollen dem Produktentwickler eine kostenzielorientierte Arbeitsweise durch Vergleich der Kosteninformationen mit den Zielkosten (Target Costing) ermöglichen.

Vorwiegend arbeiten Kosteninformationssysteme mit einer CAD-featurebasierten Geometrieanalyse (vgl. [7], [8]). Dabei dient eine in der CAD-Software integrierte Regelbasis zum Erkennen der Modellgeometrie. Aus den erkannten Geometriefeatures schließt die Software im nächsten Schritt auf die zu erwartenden Herstellkosten. Aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten der Geometrieerzeugung setzt dies zum einen eine sehr aufwendige Regelbasis zur Geometrieerkennung in der Kalkulationssoftware voraus. Zum anderen muss der Konstrukteur beim Konstruieren am 3D-CAD Einschränkungen akzeptieren, damit die Geometrie erkannt werden kann. Die fuzzybasierte Kostenkalkulation ist ein weiteres Kalkulationskonzept. Die noch ungenauen Angaben des Modells werden mittels Statistik verrechnet und die Kosten daraufhin abgeschätzt (vgl. [9]). Daneben gibt es die Regressionsanalyse. Hier wird die aktuelle Geometrie mit den bereits in einem Archiv vorhandenen Bauteilen verglichen. Deren Kosteninformationen dienen zum Abschätzen der zu erwartenden Herstellkosten [10].

Im Maschinen- und Anlagenbau wird meist die Methode der differenzierten Zuschlagskalkulation angewendet [11]. Dabei wird die Belegungs- oder Auftragszeit nach REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.) oder Teile davon errechnet. Die Herstellkosten ergeben sich dann aus den Fertigungszeiten plus Zuschläge

der Gemeinkosten. Auch in der Fuzzytechnologie errechnen sich die Herstellkosten aus den Fertigungszeiten [12].

Dabei muss beachtet werden, dass Fertigungsverfahren ständig optimiert werden und sich neue Fertigungsverfahren auf dem Markt etablieren. Neben den Veränderungen in der Fertigungstechnik haben sich auch die Kostentreiber im Laufe der Zeit verändert. Waren bis Ende der neunziger Jahre Fertigungszeiten von elementarer Bedeutung für die Kostenrechnung, werden heute die Kostenanteile der Faktoren Rohstoffpreis, Transport- und Montagekosten immer wichtiger [13]. Fertigungs-Know-how und Kostentreiber verändern sich folglich ständig. Daher müssen die Daten, die als Berechnungsgrundlage für die Kalkulation dienen, ebenso ständig aktualisiert werden, um die Kosten so genau wie möglich zu prognostizieren.

Vereinfacht beschrieben läuft die featurebasierte Geometrieanalyse mit anschließender Kostenanalyse folgendermaßen ab:

- Erkennen der Geometrieelemente eines 3D-Modells auf Basis der verwendeten Features
- Zuordnung der Geometrieelemente zu einem Fertigungsverfahren
- Zuordnung des Fertigungsverfahrens zu einer Maschine-Werkzeug-Kombination
- Belegungszeitberechnung auf Basis der Fertigungsparameter
- Herstellkostenberechnung auf Basis der Belegungszeiten
- Evt. Hinzufügen weiterer Kostenfaktoren (z.B. Zuschlagskalkulation)

Einzelne Geometrieelemente werden so kostenmäßig erfasst. Auch die Abhängigkeiten, die sich aus der Kombination einzelner Gestaltelemente ergeben, können so berücksichtigt werden, wie beispielsweise Rüstzeiten oder sonstige Nebenzeiten. Jedoch ist es auf diese Weise nicht möglich die Herstellkosten realistisch abzuschätzen, da die wesentlichen Kostentreiber in der Produktfertigung an anderer Stelle zu suchen sind. Vielmehr sind Faktoren wie Oberflächenbehandlung, Toleranzen für Lagerungen oder Verzahnungen und Rüst- und Transportzeiten, die die Herstellkosten eines Produktes im Wesentlichen ausmachen. Doch diese sind in einem frühen Stadium der Produktentwicklung für einen Konstrukteur nur schwer erkennbar, da die Konstruktion zu diesem Zeitpunkt meist noch unvollständig ist und somit die Zusammenhänge, bzw. die Konsequenzen einer Bauteilgestaltung noch nicht überschaubar sind. Deshalb sind viele zusätzliche Angaben für

eine Prognose erforderlich, die ein Konstrukteur zu diesem Zeitpunkt eigentlich noch nicht machen will und womöglich aufgrund der Komplexität des Bauteils noch nicht machen kann. Zusätzliche Angaben bedeuten jedoch auch zusätzlichen Aufwand, wodurch die Motivation zur Nutzung eines solchen Systems sehr gering werden kann.

Viele dieser Ansätze sind daher nicht über das Stadium einer Theorie oder eines Prototypen ausgebildet. Ein Hauptproblem dieser Konzepte ist der erforderliche Datenaustausch der einzelnen EDV-Komponenten untereinander. Wird beispielsweise eine neue Version eines 3D-CAD-Systems eingeführt, muss unter immensen Aufwand die damit gekoppelte Kalkulationssoftware angepasst werden. Daher werden heute viele dieser Programme nicht mehr oder nur noch eingeschränkt genutzt. Oder aber die Kalkulation limitiert sich auf wenige Spezialbereiche und Unternehmen (vgl.[14], [15], [16]), so dass die Software für andere Unternehmen unbrauchbar ist. Bei der Einführung von PDM-Systemen hat man erkannt, dass ein wesentliches Kriterium für den Erfolg der Software die Akzeptanz beim Softwarenutzer ist. Dies ist ein weiterer Aspekt der auch für ein erfolgreiches Konzept zur Kalkulation berücksichtigt werden muss. Erfordert die Anwendung eines neuen Hilfsmittels viel Aufwand für die Einarbeitung und muss der Nutzer seine Gewohnheiten entscheidend verändern, ist die Akzeptanz des Konzepts gefährdet. Eine neue Methode, bzw. Konzept kann also mittelfristig im Aus enden, wenn sie nicht entsprechend ergonomisch gestaltet ist [17].

Lösungsansätze für die oben aufgeführten Problembereiche gibt es bisher kaum. Erst nach der Ausgestaltung eines Bauteils stehen dem Produktentwickler zahlreiche Hilfsmittel zur Kostenabschätzung zur Verfügung. Anschließend können diese mit den Anforderungen des Target Costings abgeglichen werden. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch eine Änderung des Bauteils bereits eine zeit- und kostenintensive Aufgabe, die meist mit dem Projektplan kollidiert.

3 Lösungsansatz

Dem Konstrukteur sollen schon in der Entwurfsphase eines Bauteils auf einfachem Wege Kosteninformationen zur Verfügung stehen. Er benötigt eine Entscheidungsgrundlage auf Basis der zu erwartenden Herstellkosten für die Bewertung seines Entwurfs. Wiederkehrende Fehleinschätzungen werden so vermieden (vgl. [18]) und sicherere Aussagen hinsichtlich des Kostenziels eines neuen Produktes können getroffen werden. Der

vorliegende Aufsatz stellt darüber hinaus eine Methodik vor, die es einem Unternehmen ermöglicht, gezielt und effektiv Kostenprognosen in frühen Produktentwicklungsphasen einzusetzen.

3.1 Die frühe Entwurfsphase

Die frühen Phasen der Produktentwicklung sind durch Kreativität, Ideenfindung und dem Sammeln und Verwerfen von Konzepten charakterisiert. Im englischen Sprachraum wird diese Phase treffend „Fuzzy Front End“ (FFE) genannt, da die bis dahin entwickelten Konzepte eher ungenau (fuzzy) sind. Sie weisen meist nur wenige Details auf, sind unvollständig und/ oder auch fehlerhaft. Diese Phase endet, wenn mit einer zielgerichteten Ausgestaltung begonnen werden kann.

Das Dilemma ist, dass die frühen Phasen gleichzeitig von zentraler Bedeutung für den Produkterfolg sind. Hier wird die Entscheidung über das Produktkonzept getroffen, welches nicht nur wesentlich die Produktcharakteristika bestimmt, sondern auch direkten Einfluss auf die Faktoren Zeit & Geld des Entwicklungsprojekts und des fertigen Produkts hat. Konzeptentscheidungen beruhen daher meist auf dem individuellen Erfahrungsschatz des Entwicklers und werden vornehmlich nach Funktionalität und bestenfalls nach Machbarkeit des Konzepts getroffen. Zwar ist man sich der enormen Bedeutung der Konzeptwahl hinsichtlich der Kosten bewusst, doch sind zu diesem Zeitpunkt meist nur wenige Informationen darüber vorhanden, um zur Entscheidungsunterstützung zu dienen.

Es mangelt hier an einer durchgängigen Methodik zur Unterstützung des Entwicklers in dieser Phase. Zwar bieten Methoden und Verfahren Abhilfe an, doch meist nur für isolierte Teilarbeitsschritte, Branchen oder Produktarten. Insbesondere fehlen Ansätze für eine durchgängige methodische Unterstützung des Entwicklers für die gezielte Berücksichtigung von Informationen über Märkte und Technologien und zur Nutzung vorhandenen Wissens [19], eben um das Abschätzen der Kosten zu ermöglichen.

Klassisches Arbeitsmittel beim Konzipieren ist das Freihandskizzieren auf Papier. Computer wurden in dieser Phase bisher eher zurückhaltend verwendet [20]. Doch die Auswertung von studentischen Projektarbeiten (194 Studenten im Rahmen von Lehrveranstaltungen, Studien- und Diplomarbeiten im Zeitraum von 2003 bis 2008) zeigt, dass für die jüngeren Generationen der Ingenieure die Anwendung von Cax-Tools zur Konzipierung in frühen Phasen der Produktentwicklung immer selbstverständlicher wird. Mit fort-

schreitender Entwicklung der Softwaretools kann der Rechner schon in dieser Phase sehr effektiv eingesetzt werden. Die auf diese Weise erstellten Modelle sollen die Basis für eine Kostenprognose bilden.

3.2 Methodischer Ansatz

Im konzeptionellen Stadium sind Produkte noch unzureichend ausgestaltet (unvollständig, ungenau, fehlerhaft – s.o.). Werden Kosten für das Endprodukt vorgegeben, z.B. in Form von Target Costs, darf eine Gegenüberstellung mit der Kostenschätzung des Produktkonzepts nur als erster grober Hinweis herangezogen werden, da die Berechnungsgrundlagen beider Verfahren sich sehr voneinander unterscheiden. Für einen direkten Vergleich mit den Zielkosten müssen die Daten noch weiter konkretisiert werden und die Produktentwicklung das konzeptionelle Stadium verlassen haben. Vielmehr ist die frühe Kostenschätzung sehr gut dazu geeignet alternative Bauteil-, bzw. Konzeptvarianten miteinander zu vergleichen, zu bewerten und um auf dieser Basis eine Auswahl zu treffen. Die frühe Kostenschätzung ist daher eher ein Hilfsmittel zum kostengünstigen Konstruieren als ein Werkzeug des Controllings.

Im Folgenden wird das Konzept für eine rechnerunterstützte Kalkulation in den frühen Phasen der Produktentwicklung beschrieben. Bild 2 gibt zunächst einen Überblick über die Analyseschritte zur Ermittlung der Herstellkosten.

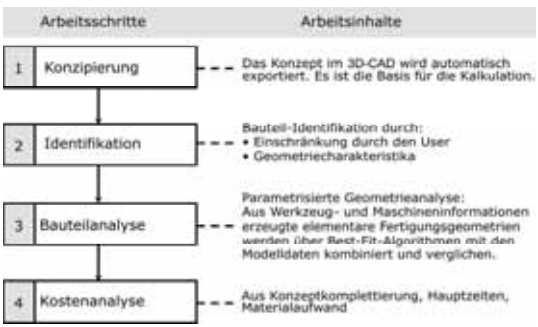


Bild 2: Konzeptanalyse - Analyseschritte

Ausgangspunkt ist die Erstellung des Konzeptmodells mit Hilfe einer 3D-Software. Im Idealfall kann die Kostenprognosesoftware in den 3D-Modellierer integriert werden, so dass der Nutzer keine zusätzliche Software für die Kalkulation benötigt. Gängige 3D CAD-

Software besitzen in der Regel eine offene Programmierschnittstelle (API - Application Programming Interface). Darüber kann ein automatischer Export des Geometriemodells programmiert werden. Durch ein Standardmenü im 3D-CAD Programm wird die Software im Hintergrund gestartet. Mit Hilfe eines Dialogs kann der Konstrukteur *optional* Einschränkungen und Bedingungen, wie beispielsweise bestimmte Fertigungsverfahren oder Stückzahlen, in die Rechnung integrieren.

Kernproblem einer Kostenkalkulation anhand des 3D-CAD-Modells ist die Erfassung der darin enthaltenden Produktdaten. Dies geschieht immer mit einer Geometrieidentifikation mit anschließender Geometrieanalyse. Das 3D-Bauteil wird automatisch aus dem CAD-System als „tote Geometrie“ (z.B. im IGES-Format) exportiert. Mit dem Verzicht auf das informationsreichere native Format erhält man eine Unabhängigkeit von der verwendeten Modelliersoftware und von der Art und Weise wie das Modell ursprünglich erstellt wurde. Wechselt ein Unternehmen die CAD-Software oder führt eine aktuellere Softwareversion ein, hat dies keinen Einfluss auf die angekoppelte Kostenprognose.

Anhand der in der Kalkulation integrierten Fertigungsinformationen wird die exportierte Modellgeometrie identifiziert. Diese Vorgehensweise wird auch in modernen CAD-CAM-Konzepten im Rahmen des Reverse Engineering zur automatischen Generierung von CNC-Code verwendet (vgl.[21]). Üblicherweise erfordert dieser Schritt aufgrund seiner Komplexität lange Rechenzeiten. Dies ist für den Wunsch einer schnellen Kostenanalyse in der kreativen Phase der Konzipierung nicht akzeptabel. In diesem Zusammenhang ist jedoch die Genauigkeit einer CNC-Pfadberechnung auch nicht erforderlich, da es um die Erfassung der Geometrie eines (noch ungenauen) Konzeptmodells geht. Aufgrund der Dynamik der Daten, die als Berechnungsgrundlage für die Prognose dienen, muss deren Aktualisierung ebenso einfach wie die Kalkulation selbst sein.

Auf Basis der Modellgeometrie lassen sich nicht alle notwendigen Variablen direkt generieren. Statistische Regeln dienen zum Komplettieren unvollständiger Modelle. Ungenaue Modelle können mit fertigungsspezifischen Regeln konkretisiert und fehlerhafte Modelle mit Standards verglichen werden. Zum Beispiel kann eine Zahnwelle standardmäßig mit zwei Lagerstellen versehen werden. Oder bestimmten Geometrieelementen wird eine entsprechende Oberflächenqualität zugeordnet. Dies sind Aspekte, die die Kosten eines Bauteils im Wesentlichen beeinflussen, aber im Konzeptstadium oft noch unberücksichtigt bleiben. Daher ist in der Geometrieanalyse eine entsprechende Regelbasis implementiert.

Bei der Umsetzung in ein Software-Tool sind einige Randbedingungen zu beachten. Auf Basis der drei Konstruktions-Grundregeln zur Gestaltung *Einfach, Eindeutig, Sicher* [4] sollten dessen wichtigste Merkmale sein:

- Transparente und kontextabhängige Ergebnisdarstellung
- Komfortable Anwendung für den Konstrukteur zur Kalkulation der Bauteile
- Frühzeitige Anwendung in der Produktplanung
- Geringer Erstellungs- und Pflegeaufwand
- Branchenspezifische Wissensbasis, die auf die unternehmensspezifischen Bedürfnisse detailliert werden kann

Durch eine Integration der Kosteninformationen in das zentrale Entwicklungswerkzeug, das 3D-CAD-System, rücken die Kosten mehr in den Aufmerksamkeitsbereich des Konstrukteurs, ohne ihn zusätzlich einzuschränken oder gar Druck auszuüben. Gleichzeitig erfordert das Konzept keine zusätzliche Konstruktionsdisziplin bei der Teile-, bzw. Modellerstellung, da alleine das plattformunabhängige Volumenmodell als Berechnungsbasis dienen soll.

3.3 Einführung einer Kostenprognose zur Unterstützung der Produktentwicklung in den frühen Phasen

Manche Kosteninformationssysteme sind nicht zuletzt daran gescheitert, dass Unternehmen falsche Erwartungen oder ungenaue Vorstellungen hinsichtlich des Einsatzzwecks einer solchen Software innerhalb ihres Unternehmens haben. Daher ist nicht allein die Software für den Erfolg entscheidend, sondern auch deren Einführung. Demzufolge ist ein strukturiertes und gezieltes Vorgehen zwingend erforderlich, um den Erfolg nicht nur während der Einführungsphase, sondern auch darüber hinaus während der gesamten anschließenden Nutzungsphase des Systems zu gewährleisten. Es müssen die spezifischen Informations- und Datenflüsse sowie die zumeist historisch gewachsenen Prozessabläufe berücksichtigt werden.

Es wird eine schrittweise Integration der Methodik vorgeschlagen (Bild 3). In Anlehnung an das generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (nach VDI 2221) sind in der Methodik Hauptarbeitsschritte vorgesehen aus denen jeweils Ergebnisdokumente hervorgehen.

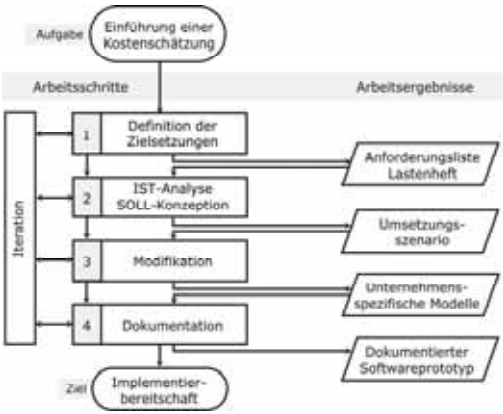


Bild 3: Integration der Kostenschätzungs-Methodik

4 Fazit

Die Etablierung einer Kostenprognose in den frühen Phasen der Produktentwicklung erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl von Randbedingungen. Von zentraler Bedeutung ist die Extraktion des Fertigungswissens, das für die Konstruktion und Gestaltung von Produkten relevant ist. Daraus lassen sich eindeutige Entscheidungsgrundlagen für die Konstruktion eines Produkts ableiten. Es kann jedoch nicht das Ziel sein die Arbeit des Konstrukteurs mit Vorgaben, bestehend aus optimierten Fertigungsgeometrien, einzuschränken. In diesem Fall wäre es ihm nur erlaubt ein Bauteil aus vorgefertigten (Fertigungs-) Bausteinen zu konstruieren. Dies nicht erstrebenswert, denn es behindert womöglich Inventionen und schränkt die Kreativität eines Konstrukteurs ein. Vielmehr soll dem Produktentwickler ein Kostenfeedback für das von ihm entwickelte Bauteilkonzept präsentiert werden. Dies ermöglicht eine Bewertung funktionsgleicher Lösungsvarianten für ein kundenspezifisches Problem aufgrund der zu erwartenden Fertigungskosten. Das Augenmerk sollte vor allem auf einer schnellen, einfachen und transparenten Bedienung und Ergebnisdarstellung liegen.

Ein Informationssystem für den Konstrukteur kann jedoch weder der Arbeitsvorbereitung vorgreifen und effektive Fertigungsreihenfolgen oder gar Produktionspläne erzeugen, sondern erlaubt vielmehr den Vergleich der Fertigungskosten bereits produzierter Geometrien mit den geometrischen Informationen des aktuellen Produktkonzepts.

Literatur

[1] Forschungsvereinigung Antriebstechnik, Forschungsvorhaben Nr. 462: *Ressourcenorientiertes Konstruieren mit dem Prozessbaukasten*, Heft 795, 2006, IKT RWTH Aachen

[2] Feldhusen, J.; Dehen, F.; Macke, N.: *Ressourcenorientiertes Konstruieren*, Antriebstechnik, 11-2006, S.6

[3] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*, 6. Auflage, Berlin [u.a.] : Springer 2007. – ISBN 978-3540442141

[4] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre*, 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3540340607

[5] Tönshoff, H. K.; Zahn, G.: *Wissensbasiertes Datenmodell für Konstruktion und Arbeitsplanung*, ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 3/99, Carl Hanser Verlag, 1999, S.108-111

[6] Leidich, E.; Jurklies, I.; Schumann, F.J.: *Fuzzybasierte Kostenprognose in der Konzeptphase*, Konstruktion, 3-2001, S.83-87

[7] Ou-Yang, C.; Lin, T.S.: *Developing an Integrated Framework for Feature-Based Early Manufacturing Cost Estimation*, Springer Verlag London Ltd, 1997

[8] Frenzel, M.; Frank, D.; Haasis, S.; Layer, A.; Schulze, H.: *Featurebasierte Kostenkalkulation in der Produktentwicklung*, VDI-Z 143 (2001), Nr.3 – März, S.75-77

[9] Kuo, T.C.; Chang, S.H.; Huang, S.H.: *Environmentally conscious design by using fuzzy multi-attribute decision-making*, Springer Verlag London Ltd, 2005

[10] Fischer, J.O.; Wutz, D.; Bartholomä, K.: *Softwaresystem zur regressionsgestützen Kostenschätzung im Konstruktionsprozess*, Konstruktion, 3-2007, S.63-66

[11] Nißl, A: *Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess*, Verlag Dr. Hut, München 2006, Dissertation, ISBN 3-899634098

[12] Wolfram, M.; Lang, M.; Ehrlenspiel, K.: *Fuzzy Kalkulation – Kostenkalkulation mit unscharfen Geometriegrößen*, VDI-Z 137 (1995), Nr. 1/2, S.53-56

[13] Festo AG & Co. KG: *Unter Druck – Einsparpotentiale aufdecken*, Konstruktion, 4-2008, S.14-16

[14] Reischl, C.: *Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase*, Verlag Dr. Hut, München 2002, Dissertation, ISBN 3-93476780X

[15] Stiefvatter, R.: *Bleche kalkulieren und konstruieren*, VDI-Z 147 (2005), Nr.5, S.34-35

[16] Fecht, N.: *Berechenbarer Erfolg*, VDI-Z, Special Werkzeug- / Formenbau, 11-2006, S.28-29

[17] Feldhusen, J., Gebhardt, B., Löwer, M.: *A holistic, methodical approach to evaluate the PDMS-capability of companies* - In: The Future of Product Development: Proceedings of the 17th CIRP Design Conference / Frank-Lothar Krause (Ed.). - Berlin: Springer. 2007. - S. 521-530

[18] Hacker, W.: *Konstruktives Entwickeln: Psychologische Grundlagen* in: „Denken in der Produktentwicklung“ von Hacker, W. (Hrsg.), Rainer Hampp Verlag, 2002, S. 16, ISBN 3-879886814

[19] Jetter, A.: *Produktplanung im Fuzzy Front End*, DUV, Aachen 2005, Dissertation, ISBN 3-835001442

[20] Schütze, M.: *Die frühen Phasen des konstruktiven Entwerfens*, Dresden 2003, Dissertation

[21] Mazakas, A.: *Real Knowledge Behind KBM*, Desktop Engineering magazine, March 2007

Simulationsgestützte Schätzung von Entwicklungsdauern und -kosten auf Basis der Design Structure Matrix

Thomas Gärtner, Norbert Rohleder*, Christopher M. Schlick, Riklef Callsen

Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen University
Bergdriesch 27, D-52062 Aachen
Email: t.gaertner@iaw.rwth-aachen.de; Internet: http://www.iaw.rwth-aachen.de

*Daimler AG
EP/ME HPC C325, D-70546 Stuttgart-Untertürkheim
Email: norbert.rohleder@daimler.com; Internet: http://www.daimler.com

Inhalt: *Entwicklungsprojekte sind gekennzeichnet durch eine parallele Ausführung von Aktivitäten, hochgradige Informationsverkopplung, häufige Iterationen, einen hohen Anteil an Nacharbeit sowie die Einbindung vieler unterschiedlicher Organisationseinheiten. Die detaillierte Planung von Entwicklungsprojekten sowie die Abschätzung der zu erwartenden Dauer und Kosten sind von essentieller Bedeutung und erfordern innovative Methoden und Werkzeuge. Das in diesem Beitrag vorgestellte Simulationsmodell auf Basis der Design Structure Matrix erlaubt es, statistische Aussagen über die Dauer und die entstehenden Kosten eines Entwicklungsprojekts zu treffen. Ferner können die Auswirkungen von Änderungen am Prozess oder dem zu entwickelnden Produkt auf die Dauer und Kosten berechnet werden. Durch systematische Parametervariation und Analyse der Simulationsergebnisse ist es möglich, gezielt Maßnahmen zur Verkürzung der Produktentwicklungszeit abzuleiten. Die Eignung des Ansatzes wird im vorliegenden Beitrag anhand der Simulation des Softwareentwicklungsprozesses eines Steuergeräts im Antriebsstrang eines Automobils demonstriert. Auf Basis einer Parametervariation werden Maßnahmen zur Prozessverbesserung aufgezeigt.*

Abstract: *Development projects are characterized by simultaneous activities, strong informational interdependencies, numerous iterations, a high percentage of rework and the participation of many organizational units. The detailed planning of development projects and the prediction of costs and duration are crucial and require innovative methods and tools. The presented simulation model is based on the Design Structure Matrix, and allows the prediction of probabilities for time and cost outcomes of development processes and the analysis of effects to these probabilities evolving from changes either to tasks or to the product. The systematic variation of parameters and the analysis of the simulation results enable the discovery of possibilities for reducing the product development time. To verify the model, the software development process of a power-train control unit is simulated and analyzed. Based on a variation of parameters, measures of process improvement are shown.*

Stichwörter: *Projektmanagement, Projektplanung, Simulation, Design Structure Matrix*

Keywords: *Project Management, Project Planning, Simulation, Design Structure Matrix*

1 Einleitung

Die detaillierte Planung sowie das effektive Management von Produktentwicklungsprojekten sind von entscheidender Bedeutung für den Erfolg eines Projekts. Ziel ist es, die Budget- und Kostenziele einzuhalten, die Qualität sicherzustellen und die Projektabläufe kontinuierlich zu verbessern.

Entwicklungsprojekte bestehen aus informatorisch voneinander stark abhängigen Aktivitäten. Dabei tritt es häufig auf, dass die Bearbeitung einer Aktivität z. B. aufgrund paralleler Bearbeitung mehrerer Aktivitäten mit Informationsannahmen begonnen wird. Wenn sich die Annahmen später als fehlerhaft oder falsch herausstellen, wird die Aktivität in einer Iterationsschleife erneut bearbeitet. Laut einer Studie von Osborne [1] entfallen 13-70% der Projektdauer auf Iterationen. Untersuchungen an aktuellen Entwicklungsprojekten zeigen, dass zudem die Tendenz besteht, dem Produkt während des Projektablaufs zusätzliche Eigenschaften und Funktionalitäten hinzuzufügen [2]. Dies führt zu einer weiteren Verlängerung der Produktentwicklungsdauer.

Zur Planung von Projekten und zur Abschätzung von Entwicklungsdauern sind klassische Methoden wie „Gantt-Charts“, die „Critical Path Method“ oder die „Program Evaluation and Review Technique“ gängig. Diese Methoden stoßen allerdings aufgrund der Komplexität der Informations- und Produktzusammenhänge an ihre Grenzen, was die Entwicklung neuer innovativer Methoden und Tools nahelegt.

In einer Kooperation zwischen dem Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen University und der Daimler AG wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das Vorhersagen zu der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Produktentwicklungsdauern und -kosten erlaubt. Das Modell, das auf der sogenannten Design Structure Matrix basiert, ermöglicht zudem die Analyse von Auswirkungen auf die Dauer und Kosten durch Änderungen an einzelnen Aktivitäten, der Prozessarchitektur oder den Bauteilen und somit auch die Optimierung von Entwicklungsprozessen.

2 Design Structure Matrix und darauf aufbauende Simulationsmodelle

Die Design Structure Matrix (DSM) wurde erstmals 1981 von Steward [3] für die Analyse von Konstruktionsbeschreibungen entwickelt und wird heute auch für die Analyse von Abhängigkeiten zwischen Produkten, Organisationseinheiten und Aktivitäten eingesetzt.

Bei dieser Form der Darstellung werden die zu untersuchenden Objekte, z. B. Entwicklungsaktivitäten, jeweils als Titel in die Zeilen und Spalten einer n x n Matrix eingetragen. Markierungen innerhalb der Matrix kennzeichnen eine Informationsverkopplung (siehe Bild 1). Unterhalb der Diagonalen der Matrix werden vorwärts gerichtete, oberhalb der Diagonalen rückgekoppelte Informationsabhängigkeiten dokumentiert [2]. Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten sowie Iterationen werden auf diese Weise übersichtlich dargestellt.

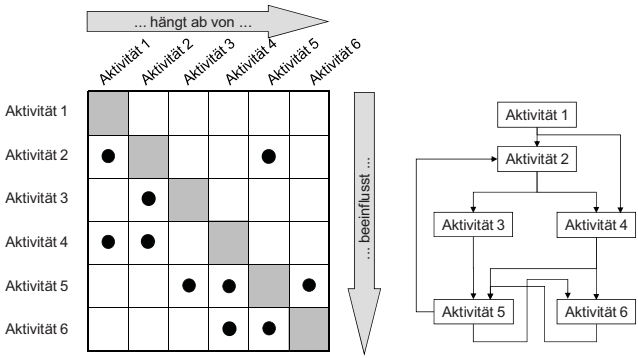


Bild 1: Abbildung von Abhängigkeiten in einer DSM (links) und einem vergleichbaren Flussdiagramm (rechts)

Mit Hilfe von Simulationen auf Basis der DSM können durch die Erfassung zusätzlicher Daten Aussagen über die Projektdauer und -kosten sowie die Ressourcenbelegung innerhalb eines Projektes getroffen werden. Zudem ermöglicht die Simulation die Risikobewertung eines Projekts. Risikoindikatoren sind die Wahrscheinlichkeit der Überschreitung gesetzter Zieltermine oder Budgets sowie die Varianz der Ergebnisse.

Smith und Eppinger [4] entwickelten auf Basis von Markov-Ketten ein Simulationsmodell, das erstmals eine DSM zur Darstellung von Iterationswahrscheinlichkeiten verwendet. Browning und Eppinger [5] entwickelten ein DSM basiertes Modell, das durch eine Monte-Carlo-Simulation Aussagen zu der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Projektdauer und -kosten liefert. In Matrizen wird die Informationsverkopplung der Aktivitäten, die Iterationswahrscheinlichkeit sowie die durch eine Iteration entstehende Mehrarbeit abgebildet. Die dabei verwendete eher generalisierte Projektdarstellung bewirkt, dass nicht für jedes Projekt ein eigenes Modell erstellt werden muss und somit die Anwendbarkeit der Methodik in der Industrie steigt. Cho und Eppinger [6] erweiterten dieses Simulationsmodell um Ressourcenbeschränkungen bei parallelen Tätigkeiten sowie um eine beschränkte Möglichkeit der Überlappung zweier Tätigkeiten.

Alle bislang entwickelten Simulationsmodelle betrachten zwar den Einfluss von Iterationen, die aufgrund fehlender oder fehlerhafter Informationen entstehen, vernachlässigen aber den Einfluss, den Produktänderungen auf die Projektdauer und -kosten haben. Weiterhin fehlt den Modellen die Berücksichtigung eines „Lerneffekts“, durch den nach einer Iteration die Wahrscheinlichkeit für weitere Iterationen womöglich sinkt.

3 Modellbeschreibung

Das im vorliegenden Beitrag beschriebene Modell verwendet als Basis das von Browning und Eppinger [5] entwickelte Modell und erweitert dieses um eine realistischere Abbildung von Iterationen und Mehrarbeit [7] sowie um die Möglichkeit, Einflüsse durch Produktänderungen abzubilden. Dazu wurden die Struktur des Modells und der in Matlab abgebildete Simulationsalgorithmus so gestaltet, dass Simulationen mit und ohne Berücksichtigung von Produktänderungen möglich sind (siehe Bild 2).

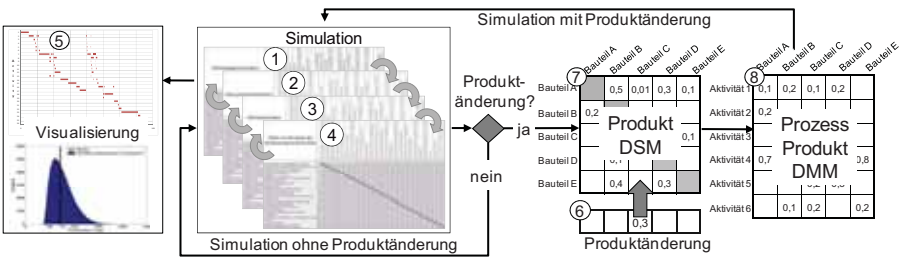


Bild 2: Aufbau des Modells mit Möglichkeit zur Simulation von Projekten mit und ohne Produktänderung

3.1 Simulation ohne Produktänderung

Ohne Produktänderungen wird die Simulation unter Einbeziehung der Dauer und Kosten der Aktivitäten, der Informationsverkopplung der Aktivitäten (1), der Wahrscheinlichkeit für Iterationen (2) und die durch Iterationen entstehende Mehrarbeit (3) sowie die Abnahme der Iterationswahrscheinlichkeit (4) durchgeführt. Dazu ist folgender Input notwendig:

Die *Dauer und Kosten* einer Aktivität werden, um die Varianz der Werte darzustellen und gleichzeitig ein hohes Maß an Praktikabilität zu wahren, in Form einer Dreiecksverteilung aus den optimistischsten, den wahrscheinlichsten und den pessimistischsten Werten abgebildet. Mittels eines sogenannten Latin-Hypercube-Sampling [6] wird das entstehende Dreieck entsprechend der Anzahl der Durchläufe in Intervalle mit gleicher Fläche unterteilt.

Bei jedem Simulationslauf wird zufällig eines der sich ergebenden Intervalle gewählt und als Input für die Simulation verwendet.

Die *Abhängigkeitsmatrix* (1) stellt die Informationsverknüpfung der Aktivitäten dar. Aktivitäten können entweder sequentiell oder parallel bearbeitet werden. Sollen unterschiedliche Prozesspfade verwendet werden, kann die Abhängigkeitsmatrix genutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der Prozesspfade anzugeben.

Werden nach der Bearbeitung einer Aktivität Fehler bzw. fehlerhafte oder falsche Annahmen erkannt, kommt es zu einem Rücksprung zu der Aktivität, in der diese Informationen erzeugt worden sind. Die Wahrscheinlichkeit für eine Iteration wird in der *Wahrscheinlichkeitsmatrix* (2) oberhalb der Hauptdiagonalen abgebildet. Die Einträge können dabei Werte zwischen Null und Eins annehmen, wobei Eins für eine 100% Iterationswahrscheinlichkeit steht. Nach der Bearbeitung der vorgelagerten Aktivität ist es möglich, dass die die Iteration auslösende Aktivität nochmals bearbeitet werden muss. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird unterhalb der Hauptdiagonalen dargestellt. Werden dabei erneut Fehler bzw. fehlerhafte oder falsche Annahmen erkannt, sind weitere Iterationen zur Korrektur nötig.

Bei einer erneuten Bearbeitung einer Aktivität muss diese nicht immer vollständig neu bearbeitet werden, sondern zumeist nur anteilig. Dies wird in der *Mehrarbeitsmatrix* (3) mit Werten zwischen Null und Eins dokumentiert, wobei Eins der vollständigen Neubearbeitung einer Aktivität entspricht.

Jede Iteration verbessert die Qualität der für die Vollendung einer Aktivität benötigten Informationen und führt somit zu einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit für das Auslösen einer erneuten Iteration. Dies wird in der *Matrix zur Abnahme der Iterationswahrscheinlichkeit* (4) mit Werten zwischen Null und Eins beschrieben. Je höher der Wert ist, desto größer ist die Abnahme der Iterationswahrscheinlichkeit. Analysen zeigen, dass beim mehrmaligen Durchlaufen einer Iterationsschleife neben der Iterationswahrscheinlichkeit auch die Bearbeitungsdauer aufgrund von Lerneffekten exponentiell sinkt. Dieses Verhalten wird im Simulationsmodell durch eine *Lernkurve* abgebildet.

Die *Visualisierung* (5) der Simulationsergebnisse ermöglicht die Analyse der Ergebnisse in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen sowie Gantt-Charts. Letztere verdeutlichen die Ressourcenbelegung innerhalb des Projekts und veranschaulichen Iterationen.

3.2 Simulation mit Produktänderung

Sollen die Auswirkungen von Produktänderungen auf den Entwicklungsprozess untersucht werden, fließen zusätzlich die Informationen des Zeitpunkts und des Einflusses der Produktänderung auf ein Bauteil (6), der Verkopplung der Bauteile (7) sowie der Einfluss der Bauteile auf die Projektaktivitäten (8) mit in die Simulation ein.

Der Einfluss der Produktänderung - z. B. auf Grund neuer Gesetzgebungen auf die im Projekt zu entwickelnden Bauteile oder Funktionen - muss zunächst abgeschätzt werden und im *Änderungsvektor* (6), der zeilenweise die Bauteile beinhaltet, dokumentiert werden.

Durch die Änderung eines Bauteils müssen auch davon abhängige Bauteile angepasst werden. Die *Produktmatrix* (7), in die zeilen- und spaltenweise die Bauteile eingetragen werden, beschreibt die Abhängigkeit der Produktentwicklungsdauer eines Bauteils von der eines anderen.

Änderungen an den Bauteilen haben einen Einfluss auf die Dauer der Aktivitäten. In der *Prozess-Produkt-Domain-Mapping-Matrix* (DMM) [8] (8) wird die Produktsicht mit der Prozesssicht verbunden. Zeilenweise werden in die DMM die Aktivitäten und spaltenweise die Bauteile eingetragen. An den Schnittpunkten wird der abgeschätzte Einfluss einer vollständigen Neubearbeitung eines Bauteils auf die Dauer einer Aktivität dokumentiert.

4 Verifikationsstudie

Die Anwendbarkeit des Simulationsmodells zur Vorhersage von Produktentwicklungsdauern wurde bereits anhand mehrerer Entwicklungsprojekte überprüft und wird hier exemplarisch anhand der Softwareentwicklung eines Steuergeräts im Antriebsstrang bei der Daimler AG demonstriert.

4.1 Simulation ohne Produktänderungen

Die Eingangsdaten für die Simulation (siehe Kapitel 3) wurden auf Basis abgeschlossener Projekte bestimmt und in Diskussionen mit den im Projekt involvierten Entwicklungsmitarbeitern verfeinert. In Bild 3 sind für den aus 26 Aktivitäten bestehenden Softwareentwicklungsprozess die Wahrscheinlichkeiten für Iterationen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass während des Entwicklungsprozesses die Detailspezifikation mehreren Änderungen unterliegen kann. Dies ist zeitaufwendig, da nach einer Änderung der Detail-

spezifikation stets die technische Umsetzbarkeit geprüft und Design- und Modellreviews durchgeführt werden müssen. Nach dem Softwaredesign und der Erstellung des Programmcodes wird die Software in Reviews, Klausuren, Prüfstandversuchen und Fahrversuchen überprüft. Bei Beanstandungen an der Software kommt es zu einem Rücksprung zum Software-Design und der Codierung. Dies führt zwangsweise zur erneuten Durchführung von Modultests, zum Review über das Software-Design und zu einer erneuten Integration und Abstimmung der entwickelten Module. Die Iterationswahrscheinlichkeit sinkt dabei aufgrund erfolgreicher Absicherungsmechanismen mit dem Projektfortschritt.

Wahrscheinlichkeitsmatrix	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Grobspezifikation	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Detailspezifikation	2	0.00	0.00	0.20	0.00	0.10	0.00	0.50	0.10	0.10	0.05	0.10	0.05	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
Anforderungsreview (techn. Umsetzbarke	3	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abschätzung Aufwand und Priorisierung	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Design- bzw. Modellreviews	5	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Spezifikation der Tests	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Software-Design und Codierung	7	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.10	0.40	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
Durchführung Modultests	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Review über Software-Design und Code	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Integration Module	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Durchführung HiL-Tests	11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Durchführung Systemtest (HiL, SiL, Fzg.)	12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Datensammlung Arbeitsparameter	13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vorbereitung Funktionsklausur	14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Funktionsklausur	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Datensammlung Erprobungsstand A	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vorbereitung Applikationsklausur	17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Applikationsklausur	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rückmeldung Baureihe	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Datensammlung Erprobungsstand C	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.10	0.10	0.00	0.05	0.00	0.00
Freigabefahrt	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Überprüfung Erprobungsstand C	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abstimmungsfahrten	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Auswertung Abstimmungsfahrten	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Datensammlung Serienstand	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
Freigabe Serienstand	26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Bild 3: Matrix mit Iterationswahrscheinlichkeiten für den Softwareentwicklungsprozess eines Steuergeräts

Die Simulation des Softwareentwicklungsprojekts ergibt eine durchschnittliche Projektdauer von 121,9 Zeiteinheiten (ZE) (σ^2 = 40,7 [ZE²]). Im Vergleich zur realen Entwicklungsdauer von 110 ZE ergibt sich ein relativer Fehler von 10,8%. Die Darstellung der Simulationsergebnisse für die erwartete Projektdauer als Wahrscheinlichkeitsverteilung (siehe Bild 4) ergibt eine logarithmische Normalverteilung. Empirische Untersuchungen kooperativer Problemlöseprojekte ergaben eine ähnliche Verteilungen [9]. Die lognormale Verteilung ist aufgrund der Iterationsschleifen im Projekt rechtsschief. Dies bedeutet, dass längere Projektdauern wahrscheinlicher sind als kürzere Dauern [10].

4.2 Simulation mit Produktänderung

Um Produktänderungen in die Simulation mit einfließen zu lassen, müssen sowohl der Zeitpunkt, der Umfang der einfließenden Änderungen, die Verkopplung der Bauteile und der Einfluss der Bauteile auf die Aktivitäten abgeschätzt werden (siehe Kapitel 3). Das betrachtete Steuergerät beinhaltet fünf Primärfunktionen („A“-„E“), die bei der Entwicklung

aufeinander abgestimmt werden müssen. In einem abgeschlossenen Entwicklungsprojekt erfolgte nach der Aktivität „Vorbereitung der Applikationsklausur“ eine aus der Baureihe induzierte 30 prozentige Änderung an der Funktion „A“. Verwendet man diese Information in Form des Änderungsvektors als Input für die Simulation, erhält man als Ergebnis den Änderungsgrad der zu entwickelnden Funktionen sowie die Abschätzung der durch die Änderung verlängerten Prozessdauer und -kosten. Aufgrund der erforderlichen Abstimmung mit den anderen Bauteilen führt die 30 prozentige Änderung zu 3,6% Änderung der Funktion „B“, zu 3,5% Änderungen der Funktion „C“, zu 6,8% Änderungen der Funktion „D“ und zu 3,4% Änderungen der Funktion „F“. Aufgrund dieser Änderungen kommt es zu Rückwirkungen auf die Funktion „A“, die um insgesamt 32,9% verändert werden muss. Das Projekt verlängert sich dadurch durchschnittlich um 19 ZE auf insgesamt 140,5 ZE (σ^2 = 47,4 [ZE²]) (siehe Bild 4), wodurch die Erfahrungswerte aus dem abgeschlossenen Projekt gut widergespiegelt werden. Die Verlängerung der Projektdauer erhöht zudem die Kosten um durchschnittlich 19%.

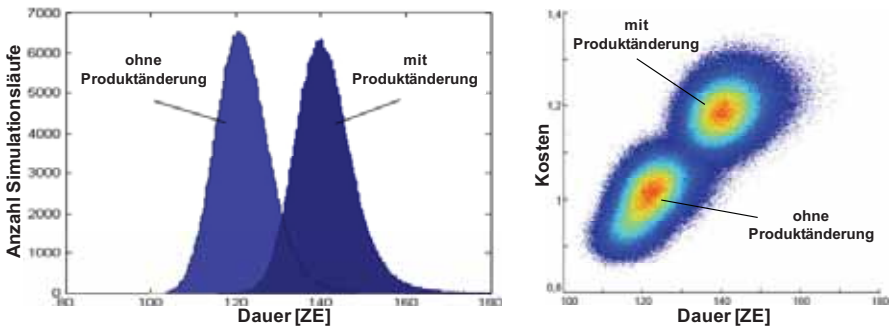


Bild 4: Vergleich der Simulationsergebnisse für die Dauer der Softwareentwicklung eines Steuergeräts ohne und mit einer Produktänderung (links) sowie die Dauer-Kosten-Verteilung (rechts)

Durch die Produktänderung erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für Iterationen im Projekt, so dass die Streuung der Ergebniswerte im Vergleich zur Simulation ohne Produktänderung zunimmt. Dies drückt sich ebenfalls in der Erhöhung der Varianz von 40,7 [ZE²] auf 47,4 [ZE²] aus. D.h. Produktänderungen bewirken neben der Verlängerung der Entwicklungsdauer und Erhöhung der Kosten eine höhere Wahrscheinlichkeit für zusätzliche Iterationen und damit ein höheres Risiko des Nichteinhaltens von Zeit- oder Budgetzielen.

Dies spricht für eine frühzeitige und detaillierte Festlegung der Anforderungen, die im Laufe des Projekts nur so wenig und so früh wie möglich geändert werden sollten.

4.3 Optimierungsmöglichkeiten des Entwicklungsprozesses

Den größten Einfluss auf die Projektdauer hat die durch Iterationen bedingte Mehrarbeit. Gelingt es, die Iterationswahrscheinlichkeiten zu reduzieren, kann die Entwicklungsdauer gesenkt werden. Laut Turnquist [11] besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Dauer einer Aktivität und der Wahrscheinlichkeit des Erfolgs dieser Aktivität. Eine zu kurze Bearbeitung einer Aktivität kann zum Misserfolg führen und erhöht somit die Iterationswahrscheinlichkeit. Das bedeutet zugleich, dass die Iterationswahrscheinlichkeit einer Aktivität durch die Verlängerung ihrer Bearbeitungsdauer unter der Bedingung gleicher Bearbeitungsintensität gesenkt werden kann. Aufgrund des logarithmischen Zusammenhangs ist die Senkung hoher Iterationswahrscheinlichkeiten durch eine längere Bearbeitungsdauer einfacher als die weitere Senkung geringer Iterationswahrscheinlichkeiten.

Um die optimalen Iterationswahrscheinlichkeiten für den Softwareentwicklungsprozess zu erhalten, wird die Iterationswahrscheinlichkeit jeder Aktivitätenpaarung schrittweise gesenkt und die Bearbeitungsdauer errechnet sowie anhand der Simulation überprüft, ob die Projektdauer sinkt oder steigt. In Bild 5 ist dies exemplarisch für die Iteration von „Review über Software-Design und Code“ zur Aktivität „Software-Design und Codierung“ dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die simulierte Projektdauer bei einer Bearbeitungsdauer von 12,5 ZE und einer 20 prozentigen Iterationswahrscheinlichkeit ein Minimum annimmt.

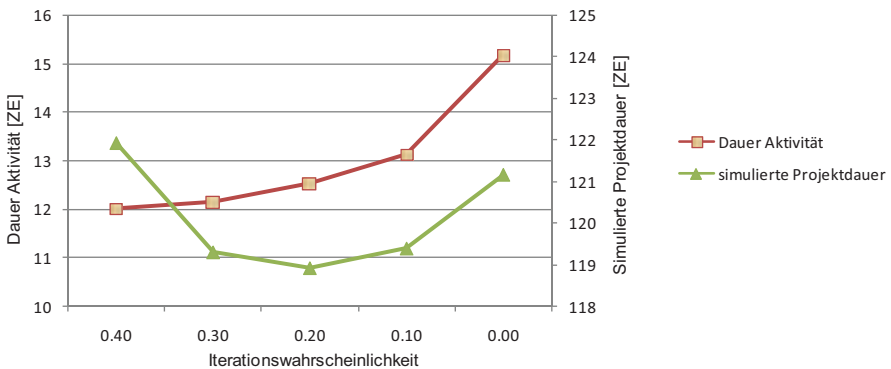


Bild 5: Dauer einer Aktivität in Abhängigkeit der Iterationswahrscheinlichkeit und die simulierte Projektdauer

Die Simulation mit den für alle Aktivitäten optimierten Iterationswahrscheinlichkeiten ergibt eine durchschnittliche Projektdauer von 115,4 ZE und entspricht einer Verringerung der Projektdauer um 6,5 ZE. Generell zeigt sich bei der Simulation, dass es sich lohnt, gezielt die Bearbeitung der Aktivitäten zu verlängern, von deren Informationen viele andere Aktivitäten abhängen.

5 Ausblick

Um unkompliziert die Daten aus bestehenden Gantt-Charts in das Modell zu überführen, ist es in einem zukünftigen Schritt nötig, die Überlappung von Aktivitäten individuell gestaltbar zu machen. Zudem wird die Verwendung von Kategorien statt variabler Werte zur Beschreibung der Informationszusammenhänge überlegt. Hierfür ist allerdings zu überprüfen, ob und welchen Einfluss die Verwendung der Kategorien auf die Simulationsergebnisse hat. Obwohl die Simulation bereits für mehrere Projekte realistische und verifizierte Ergebnisse geliefert hat, sind weitere Untersuchungen notwendig, um das Simulationsmodell zu validieren.

Literatur

[1] Osborne, Sean M.: Product Development Cycle Time Characterization through Modeling of Process Iteration. Master Thesis, MIT, Cambridge, 1993.

[2] Eppinger, Steven: Projektmanagement – Produktentwicklungsprojekte zielorientiert und effizient gestalten. In: Schäppi, Bernd; Andreasen, Mogens M.; Kirchgeorg, Manfred; Radermacher, Franz-Josef: Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, 2005. – ISBN 3-446-22838-1.

[3] Steward, Donald V.: *The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems.* IEEE Transactions on Engineering Management, 28, 71-74, 1981.

[4] Smith, Robert P.; Eppinger, Steven: *A Predictive Model of Sequential Iteration in Engineering Design*. Management Science, 43, 8, 1104-1120, 1997.

[5] Browning, Tyson; Eppinger, Steven: *Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development*. IEEE Transactions on Engineering Management, 49, 4, 428-442, 2002.

[6] Cho, Soo-Haeng; Eppinger, Steven: *A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects*. IEEE Transactions on Engineering Management, 52, 3, 316-328, 2005.

[7] Lukas, Michael; Gärtner, Thomas; Rohleder, Norbert; Schlick Christopher M.: *A Simulation Model to predict impacts of process alterations*. Proceedings of the 9th DSM Conference, 127-136, 2007.

[8] Yassine, Ali; Whitney, Daniel; Daleiden, Steve; Lavine, Jerry: *Connectivity Maps: Modeling and Analysing Relationships in Product Development Processes*. Journal of Engineering Design, 14, 3, 377-394, 2003.

[9] Clearwater, Scott; Huberman, Bernardo; Hogg, Tad: *Cooperative Solution of Constraint Satisfaction Problems.* Science, 254, 1181-1183, 1991.

[10] Huberman, Bernardo A.; Wilkinson, Dennis M.: *Performance Variability and Project Dynamics.* Computational & Mathematical Organization Theory, 11, 307-332, 2005.

[11] Turnquist, Mark A.; Nozick, Linda K.: *Allocationg Time and Resources in Project Management Under Uncertainty*. Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 2003.

Speicherverwaltung und Lösung großer Gleichungssysteme im Rahmen einer FEA[1]

Martin Zimmermann, Bernd Roith, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD[2], Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften,
Universität Bayreuth
Universitätsstrasse 30, D-95440 Bayreuth
Email: Konstruktionslehre.CAD@uni-bayreuth.de;
Internet: http://www.uni-bayreuth.de/departments/konstruktionslehre

Inhalt: *Im Rahmen dieser Schrift wird der Hintergrund einer ablaufenden FEA in Kürze dargestellt. Insbesondere wird auf die Notwendigkeit der effektiven Speicherverwaltung einer FE-Analyse eingegangen. Es werden konkrete Anforderungen für die Abspeicherung und Lösung großer linearer Gleichungssysteme angegeben. Aufgezeigt werden dabei zwei verschiedene Möglichkeiten der Erzeugung effektiv gespeicherter großer Matrizen und deren Kompatibilität zu Gleichungslösern.*

Die Algorithmen werden direkt in das FEA-System Z88 implementiert und damit der praktischen Erprobung unterzogen. Unterlegt werden die Betrachtungen durch die Berechnung von unterschiedlichen Beispielen. Als Anwendungsfall wird der Einfluss der Diskretisierung auf FE-Lösungen erörtert.

Abstract: *In the framework of this paper the background of a FEA is presented. Especially the necessity of efficient memory management is gone into detail. There are concrete requirements for the storage and solution of large linear equation systems given. Two possibilities for the generation of effectively stored large matrices and their compatibility to linear equation solvers are shown.*

The algorithms had been directly implemented in the FEA system Z88 and therewith performed the practical experiment. The investigations are highlighted by the calculation of different examples. The discussion of the influence of discretisation on FE-solutions is used as an application.

Stichwörter: *FEA, FEM, Speicherverwaltung, lineare Gleichungslöser*

Keywords: *FEA, memory management, linear equation solver*

1 Problemstellung und FEA

Als Berechnungsverfahren für mechanische Problemstellungen hat sich aufgrund Ihrer universellen Anwendbarkeit die Methode der finiten Elemente durchgesetzt. Mit dieser Methode ist es möglich die partiellen Differentialgleichungssysteme, die im Rahmen der linearen Elastostatik entstehen, gebietsweise, näherungsweise und in integraler Form zu lösen [8], [9]. Dabei wird die Festlegung der Gebiete als Diskretisierung des realen

Kontinuums bezeichnet. Die diskretisierten Gebiete werden durch Knoten miteinander verbunden. Die durch dieses Verfahren entstehenden mathematischen Probleme erzeugen sehr große lineare algebraische Gleichungssysteme. Diese müssen mit Hilfe von Gleichungslösern gelöst werden. In dieser Schrift wird sich speziell mit dem Aufbau einer für die FEA geeigneten Matrix und deren Speicherrepräsentation befasst. Außerdem wird ein zur Lösung derartiger Systeme geeigneter Solver[3] vorgestellt und untersucht.

2 Speicherschema und Darstellung

2.1 Methode der finiten Elemente

Im Rahmen einer FEA (Finite Elemente Analyse) entstehen lineare Gleichungssysteme der Form:

$$\underline{\underline{K}} \cdot \underline{u} = \underline{F} . \tag{1}$$

Hierbei sind die Freiheitsgrade f_1 bis f_n in einem Vektor $\underline{u}$ angeordnet, die zu den Freiheitsgraden zugehörigen Belastungen in einem Vektor $\underline{F}$. Dabei werden die einzelnen Einträge der Gesamtsteifigkeitsmatrix $\underline{\underline{K}}$ durch die Superposition der h Einzelelementsteifigkeitsmatrizen $\underline{\underline{K}}_i^e$ mit den Freiheitsgraden f_{i1} bis f_{im} erzielt. Diese ergeben sich durch Volumenintegration über das jeweils i-te Element aus den Verzerrungs-Verschiebungsinterpolationsmatrizen $\underline{\underline{B}}$ und der Materialmatrix $\underline{\underline{C}}$:

$$\underline{\underline{K}}_i^e = \iiint_{\Omega_i} \underline{\underline{B}}^T \cdot \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{B}} \cdot dV . \tag{2}$$

Die dabei entstehenden Gesamtsteifigkeitsmatrizen sind bei Verwendung klassischer finiter Elemente nach (2): diagonaldominant, positiv definit, dünn besetzt und symmetrisch.

2.2 Beispiel dünner Besetzung

Für unsere weiteren Betrachtungen spielt im Wesentlichen die Eigenschaft der dünnen Besetzung eine Rolle. Ursächlich kann dafür die Methode der finiten Elemente selbst und der Mechanismus der direkten Kompilation erkannt werden. In der folgenden Bild 2 wird das Schema einer dünn besetzten Matrix am Beispiel eines Lüfterrades (Bild 1) angegeben.

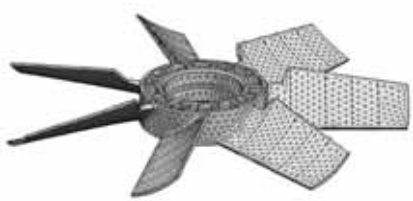


Bild 1: Testmodell Lüfterrad

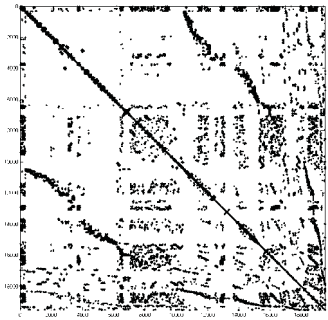


Bild 2: Lüfterrad – Gesamtsteifigkeitsmatrix mit 577578 Nichtnulleinträgen

3 Sparse-Builder-Routinen

Der Prozess dient der Feststellung der besetzten Stellen der Gesamtsteifigkeitsmatrix (Sparse-Matrix). Da die Bauweise der Matrix durch diesen Algorithmus festgestellt wird, kann die zugehörige Software, die die Implementation enthält, als Sparse-Builder bezeichnet werden.

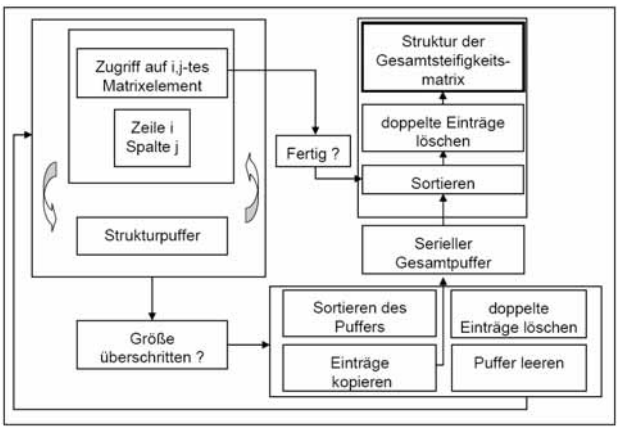


Bild 3: Symbolische Steifigkeitskompilation

3.1 Symbolische Kompilation

Die symbolische Kompilation wird vollzogen indem der eigentliche Kompilationsprozess durchgeführt wird ohne Werte in die Gesamtsteifigkeitsmatrix

einzuschreiben [10]. Die Durchführung geschieht nach dem Schema in Bild 3. Dazu wird elementweise vorgegangen und Zwischenpuffer und Gesamtpuffer verwendet. Der algorithmische Aufwand ist durch ein hohes Maß an Sortieraufwand geprägt. Dieses Verfahren ist in dem System Z88 [11] bis zur Version 12 implementiert.

3.2 Prinzip der Knotenkreuze

Effektiver verspricht das Verfahren der Knotenkreuze zu sein. In Bild 4 ist das Prinzip dargestellt. Gezeigt sind zwei viereckige Elemente mit je vier Knoten, die an einem Knoten miteinander verbunden sind. Drei der Knoten sind zur Wiedererkennung in der linksseitig dargestellten Matrix gesondert schraffiert. Weiterführend ist ein Element gestrichen dargestellt und eines mit durchgezogener Linie.

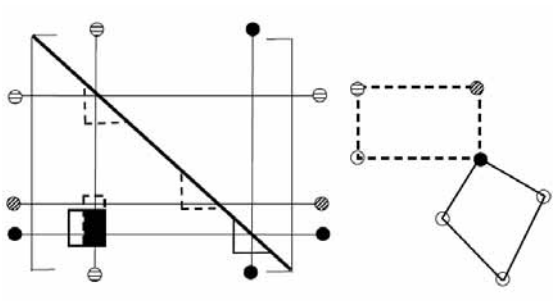


Bild 4: Prinzip der Knotenkreuze

Die Koinzidenzliste beinhaltet für jedes Element die zugehörigen Knotennummern (siehe dazu auch RIEG [10]). Entscheidend ist, dass man anhand der Koinzidenzliste auf die an den Elementen liegenden Knoten schließen kann. Diesen sind wiederum Freiheitsgrade zugeordnet. Weiterhin kann von einem beliebigen Freiheitsgrad auf den Knoten und alle mit dem Knoten verbundenen Elemente geschlossen werden. Arbeitet man also die Gesamtsteifigkeitsmatrix zeilenweise (freiheitsgradweise) ab, so können die benötigten Spalten festgestellt und direkt vermerkt werden. Man verzichtet dabei auf die symbolische Kompilation und das Sortieren der verhältnismäßig großen Strukturpuffer (Absatz 3.1). Das heißt es kann Zeit und Speicher gespart werden.

3.3 Praktischer Test an mehreren Strukturen

Es sind verschiedene Testbeispiele (Bild 1, Bild 5, Bild 8, Tabelle 1) hinsichtlich ihrer Knotenzahlen in folgendem Diagramm (Bild 6) dargestellt. Vergleicht man Prinzip 1 aus Absatz 3.1 und Prinzip 2 aus Absatz 3.2, so ergibt sich der in Bild 7 dargestellte relative Zeitbedarf. Der Zeitbedarf des Prinzips 2 ist geringer, also besser, als der des Prinzips 1. Der relative Zeitbedarf des Prinzips 2 nimmt mit zunehmender Modellgröße immer weiter ab, verbessert sich also immer mehr.

Bild 5: Testmodell Kurbelwelle (Welle)

4 Solver (Gleichungslöser)

Es werden vier Varianten von linearen Gleichungslösern untersucht und verglichen. Dabei handelt es sich um die beiden iterativen Verfahren SICCG (shifted incomplete Cholesky conjugated gradients) und SORCG (successive over-relaxation conjugated gradients). Als direkter Gleichungslöser kommt der Gleichungslöser PARDISO [1] zum Einsatz. Die Multiprozessorversion des PARDISO-Solvers stellt die vierte Variante dar.

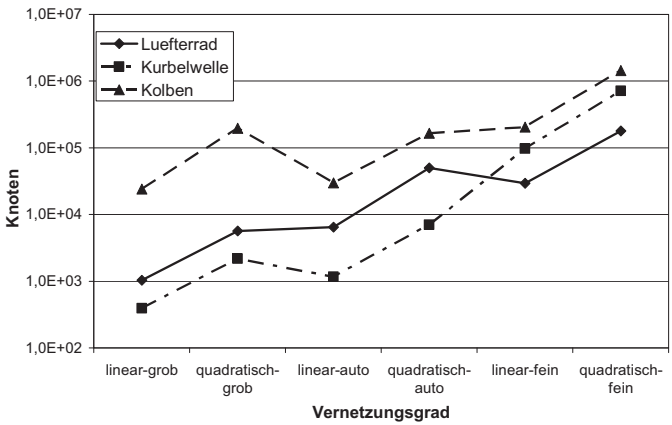


Bild 6: Beispielcharakterisierung anhand der Anzahl Knoten

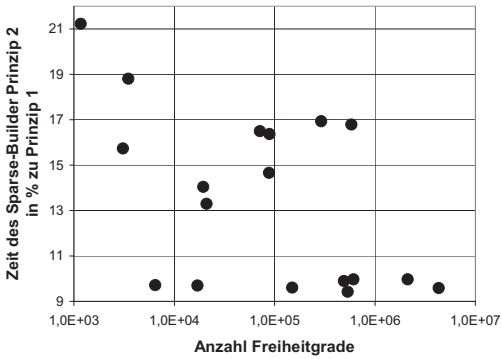


Bild 7: Zeitvergleich der beiden Sparse-Builder-Strategien

4.1 Sparse-Solver

Sparse-Solver sind dadurch gekennzeichnet, dass diesen als Eingabewerte das Gleichungssystem ($\underline{\underline{K}}$) als Nichtnullrepräsentation übergeben wird. Außerdem verfügen diese über eine möglichst speichersparende interne Repräsentation der Lösungsalgorithmen.

4.2 Iterativer Sparse-Solver nach dem CG-Verfahren

Iterative Solver kennzeichnen sich dadurch, dass die Lösung nicht nach einem Berechnungsschritt, sondern nach einer Anzahl Berechnungsschritte in einer festzulegenden Güte als Lösungsvektor vorliegt. Um dies abzuschätzen werden Vergleiche gegen residuale Kriterien verwendet. Es soll an dieser Stelle die Iterationsfolge für das SORCG Verfahren mit einem zu wählenden Relaxationsfaktor ω angegeben werden [5]:

$$\underline{u}_{k+1} = \left(\underline{\underline{D}} - \omega \cdot \underline{\underline{E}}\right)^{-1} \cdot \left[\left(\omega \cdot \underline{\underline{F}} + (1-\omega) \cdot \underline{\underline{D}}\right) \cdot \underline{u}_k + \omega \cdot \underline{F}\right]. \tag{3}$$

Dabei bestimmt die Zerlegung der Matrix $\underline{\underline{K}}$ in Form von:

$$\underline{\underline{K}} = \underline{\underline{D}} - \underline{\underline{E}} - \underline{\underline{F}}, \tag{4}$$

wobei $\underline{\underline{D}}$ die Diagonalmatrix von $\underline{\underline{K}}$, $-\underline{\underline{E}}$ die subdiagonale und $-\underline{\underline{F}}$ die überdiagonale Matrix darstellt, die Komponenten von (3). Ein anderes Iterationsverfahren verwendet als

Präkonditionierung eine Matrix, die dadurch entsteht, dass eine unvollständige Cholesky-Zerlegung vollzogen wird. Das daraus resultierende Verfahren wird SICCG bezeichnet [10].

4.3 Direkter paralleler *Sparse-Solver* (LU-Zerlegung) für *Shared Memory Processors (SMP)*

Der hier besprochene direkte Lösungsalgorithmus nimmt eine Faktorisierung der Matrix $\underline{\underline{K}}$ in der Form:

$$\underline{\underline{P}}\,\underline{\underline{K}}\,\underline{\underline{P}}^T = \underline{\underline{Q}}\,\underline{\underline{L}}\,\underline{\underline{U}}\,\underline{\underline{R}} \tag{5}$$

vor [2]. Dabei stellt $\underline{\underline{P}}$ eine Permutationsmatrix dar, welche die Zeilen des Gleichungssystems (1) geeignet (speicheroptimiert) gegeneinander austauscht. $\underline{\underline{L}}$ und $\underline{\underline{U}}$ sind dabei untere und obere triangulare Matrizen, wobei $\underline{\underline{Q}}$ und $\underline{\underline{R}}$ als sogenannte „supernode numerical pivoting matrices“ [2] bezeichnet werden. Im hiesigen Anwendungsfall werden positiv definite symmetrische Gleichungssysteme gelöst. Der implementierte Solver PARDISO leistet dabei aber weitaus mehr [3][4][6].

4.4 Praktische Untersuchungen

Das SORCG Verfahren wird als normierendes Berechnungszeitkriterium zum Solververgleich herangezogen. Für das Beispiel „Kolben“ (Bild 8) ist in verschiedenen Diskretisierungsstufen und verschiedener Elementansatzwahl der SORCG-relative Zeitbedarf in Bild 9 aufgetragen. Der Hauptspeicher der Rechenmaschine ist mit 32 GByte am aktuellen Stand der Technik orientiert. Die Verhältnisse der Berechnungszeiten sind nicht konstant. In einigen Fällen eignen sich iterative Solver daher mehr, als in anderen.

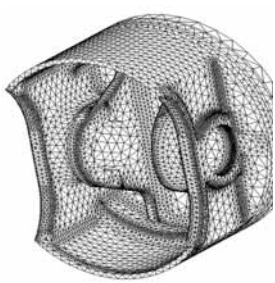


Bild 8: Testmodell Kolben

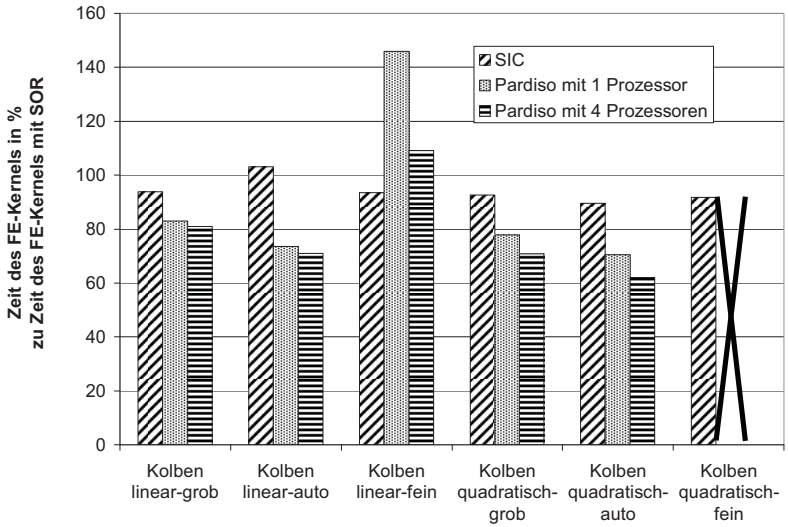


Bild 9: Rel. Zeitbedarf gegen SORCG-Verfahren

Dieser Sachverhalt macht es unmöglich für ein bestimmtes Problem einen definitiv geeigneten Solver vorab festzuschreiben. Aus praktischer Sicht können Struktur und die gebundenen Freiheitsgrade einen Einfluss auf das Rechenzeitergebnis besitzen. Die Eignung von Mehrprozessormaschinen zur beschleunigten Berechnung von Strukturen kann gezeigt werden. In Bild 9 ist nicht nur die reine Lösungsphase des Gleichungssystems (Solverphase), sondern auch die Phase des Aufbaus der Gesamtsteifigkeitsmatrix in die Zeitbilanz mit einbezogen. Direkte Solver können bei großen und größten Strukturen unter Umständen länger zur Lösung benötigen als iterative Solver bzw. das Problem nicht mehr im Hauptspeicher der Rechenmaschine behandeln (Bild 9, Tabelle 1).

5 Untersuchung des Einflusses der Diskretisierung

Im Rahmen einer FEA ist die Diskretisierung die entscheidende Größe für die Güte der Simulationsergebnisse. Dies soll hier praktisch gezeigt werden.

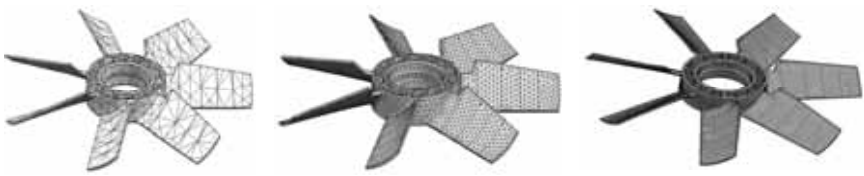


Bild 10: Testmodell Lüfterrad in unterschiedlichen Diskretisierungsstufen
(Vernetzungsgraden (grob, automatische Vernetzung, fein))

Die Diskretisierung bestimmt den Raum der möglichen Lösungen einer Simulation. Das Ergebnis einer mechanischen linearen FEA stellt ein Energieminimum dieses möglichen Lösungsraumes dar [7]. Untersucht werden die bisher schon herangezogenen Beispiele der Kurbelwelle und des Lüfters und es werden die maximale Vergleichsspannung und die betragsmäßige maximale Verschiebung dargestellt.

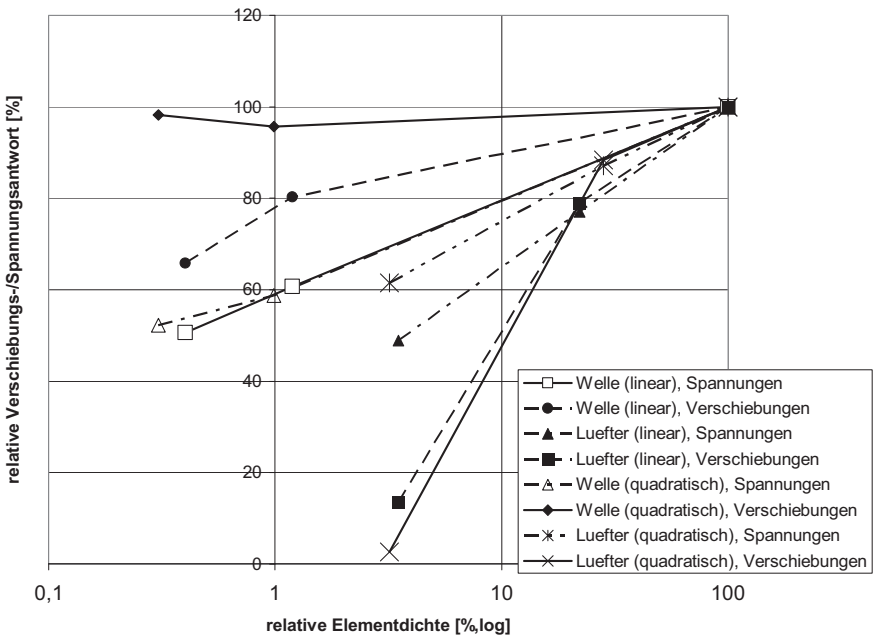


Bild 11: Einfluss der Elementdichte (Diskretisierung) auf die Verschiebungen und Spannungen

Man erkennt eine Variation der Ergebnisse, die hin zu feineren Netzauflösungen (Diskretisierungen) ein gegen die reale Lösung des physikalischen Modells konvergierendes Ergebnis liefern müssen [7].

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung effektiver Algorithmen zur Lösung großer linearer Gleichungssysteme können folgende Feststellungen getroffen werden:

Die Relevanz der Diskretisierung auf die Ergebnisse einer FE-Analyse wurde anhand praktischer Tests dargestellt. Aus praktischer Sicht (praktisch im Sinne der Durchführung einer schnellen, möglichst richtigen Analyse) kann eine möglichst feine Vernetzung empfohlen werden. Dazu sind hohe Rechenleistungen und effektive Algorithmen notwendig.

Der gezeigte Sparse-Builder-Algorithmus in Kombination mit einem (parallelisierten) direkten Sparse-Solver ist eine Lösung, die im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung auf dem Sektor der Bauteilauslegung aus praktischen Untersuchungsergebnissen heraus zu empfehlen ist.

Die Aussagen wurden anhand der Implementation der vorgestellten Algorithmen in das System Z88 [11] ermöglicht.

Literatur

[1] N.N.: *Parallel Sparse Direct Linear Solver – Pardiso, User Guide Version 3.2.* Computer Science Department, University of Basel, Switzerland

[2] O. Schenk, K. Gärtner, and W. Fichtner: *Efficient sparse LU factorization with left-right looking strategy on shared memory multiprocessors.* BIT, 40(1):158–176, 2000.

[3] O. Schenk and K. Gärtner: *Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO.* Journal of Future Generation Computer Systems, 20(3):475–487, 2004.

[4] O. Schenk and K. Gärtner: *On fast factorization pivoting methods for symmetric indefinite systems.* Elec. Trans. Numer. Anal, 23:158–179, 2006.

[5] Yousef Saad: *Iterative Methods for Sparse Linear Systems.* 2. edition with corrections, 2000, Internetquelle: http://www-users.cs.umn.edu/~saad/books.html, Zugriff: 30. Juli 2008

[6] Internetquelle: *http://www.pardiso-project.org,* Zugriff: 30. Juli 2008

[7] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden.* 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2002. – ISBN 3-540-66806-3

[8] Betten, J.: "Finite Elemente für Ingenieure 2". 2. Auflage. Berlin: Springer, 2004. – ISBN 3540204474

[9] Zienkiewicz O.C., Taylor R. L.: *"The Finite Element Method"*: Band 1 *"Its Basics and Fundamentals".* 6. Auflage. Oxford: Butterworth Heinemann, 2005. – ISBN 978-0750664318

[10] Rieg,F., Hackenschmidt, R.: *„Finite Elemente Analyse für Ingenieure: Eine leicht verständliche Einführung"*. 2., überarb. Auflage. München: Hanser Fachbuchverlag, 2003. – ISBN 3446224785

[11] Rieg, F.: *Software Z88 V12.* Internetquelle: http://www.z88.de, Zugriff: 30. Juli 2008

Benutzte Abkürzungen und Begriffe

1	FEA	Finite Elemente Analyse
2	CAD	Computer Aided Design
3	Solver	Gleichungslöser

Anhang

Tabelle 1: Daten zu Testbeispielen

Elementtyp, Vernetzungsgrad	Elemente	Knoten	mittlere Elementgrösse [mm]
Beispiel Lüfterrad			
linear-grob	2611	1031	30
quadratisch-grob	2611	5694	30
linear-auto	18238	6510	8,02
quadratisch-auto	24579	50248	7,02
linear-fein	94196	29484	4
quadratisch-fein	93468	178175	4
Beispiel Kurbelwelle (Welle)			
linear-grob	1025	393	40
quadratisch-grob	1025	2167	40
linear-auto	3758	1163	19,9
quadratisch-auto	3758	7021	19,9
linear-fein	480743	97720	2.5
quadratisch-fein	480929	711119	2.5
Beispiel Kolben			
linear-grob	103853	23937	76
quadratisch-grob	128933	29668	76
linear-auto	988108	195632	20
quadratisch-auto	103853	164347	20
linear-fein	128933	203695	0,5
quadratisch-fein	988108	1442916	0,5

Lean Innovation - Komplexität der Produktentwicklung sicher beherrschen

Günther Schuh, Michael Lenders, Jens Arnoscht

Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen
Email: G.Schuh@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *Für die Konkurrenzfähigkeit von Forschung und Entwicklung ist es erfolgsentscheidend, nicht nur die Effektivität in der F&E zu steigern, sondern zeitgleich auch die Effizienz. Echte Produktdifferenzierung muss bei reduziertem Ressourceneinsatz erzielt werden. Hier setzt Lean Innovation an. Ziel von Lean Innovation ist es, die Grundsätze des Lean Thinking auf das Management von F&E zu übertragen. Bislang wurde dieser Übertrag in ersten Ansätzen begonnen, aber keineswegs systematisch vollzogen. Entsprechend zeigt eine Befragung des WZL unter 143 produzierenden Unternehmen in Deutschland, dass erst ein Drittel überhaupt begonnen hat, eine systematische Identifikation von Verschwendung in der Produktentwicklung durchzuführen. Der breite Erfolg von Lean Production beruht vor allem darauf, dass die Lean Thinking-Grundsätze für Produktionssysteme umfangreich interpretiert und anhand zahlreicher Beispiele umgesetzt wurden. Vergleichbare Leitmotive fehlen für die Umsetzung von Lean Innovation noch. Die hier vorgestellte Lean Innovation-Systematik beruht auf zehn zentralen Prinzipien, die es im Unternehmen umzusetzen gilt. Zusammenfassend operationalisieren diese zehn Prinzipien den Grundsatz von Lean Innovation: „Früh Strukturieren, Einfach Synchronisieren, Sicher Adaptieren."*

Abstract: *Maintaining a competitive advantage in research and development requires not only increases in effectiveness, but also in efficiency of R&D. Significant product differentiation needs to be achieved also under a reduced deployment of resources. This is the central objective of Lean Innovation – by applying the Lean Thinking principles to R&D management. So far, this transfer has been initiated in first attempts, but has not been carried out systematically. A 2007 WZL survey among 143 companies in the German manufacturing industry showed that only a third of the companies has begun to systematically identify waste in product development. The broad success of Lean Thinking within manufacturing as Lean Production especially bases upon the extensive work to interpret the basic principles for manufacturing systems and the broad availability of examples. Comparable guiding themes are still missing for Lean Innovation. The Lean Innovation approach presented here relies on ten key principles that need to be implemented in R&D. Together they operationalise the guiding theme of Lean Innovation: "Structure Early, Synchronise Easily, Adapt Securely."*

Stichwörter: *Lean, F&E, Wertorientierung, Verschwendung, Komplexität, Innovation*

Keywords: *Lean, R&D, Value Orientation, Waste, Complexity, Innovation*

1 Lean Innovation als Gestaltungsansatz

Die Umsetzung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten gleicht in ihrer Darbietung einem Sinfoniekonzert (Bild 1). Es braucht hochqualifizierte Experten, Künstler, die nach einem umfassenden Plan, d. h. Spezifikation, Projektplan, Partitur, koordiniert zusammenarbeiten. Bestimmte Instrumentengruppen sind mehrfach besetzt, andere „Experten“ sind nur einzeln vertreten. Je nach Kunstwerk wird die Standardbesetzung durch weitere Spezialisten ergänzt. Das Können des Einzelnen reicht für den Erfolg des Orchesters nicht aus. Erst das Zusammenspiel aller lässt ein harmonisches Kunstwerk entstehen.

Bild 1: Leitbild der Lean Innovation: Das Sinfonieorchester [1]

Metaphorisch gelten für Lean Innovation und das Sinfonieorchester dieselben Grundsätze:

- Vor dem erfolgreichen Projekt oder dem wohlklingenden Konzert steht das *Frühe Strukturieren*. Das Orchester muss in seiner Zusammensetzung richtig strukturiert sein, die ausgewählten Kompetenzen und Instrumentengruppen müssen zur Partitur passen. Die Partitur selbst gibt allen am Vorhaben Beteiligten vorab ein transparentes Verständnis der Struktur von Schriftbild und Taktfächern des Musikwerkes.

- Erst durch ein allgegenwärtiges und *Einfaches Synchronisieren* der einzelnen Spitzenleistungen schafft der Dirigent daraus im Konzert ein Kunstwerk. Während die einzelnen Experten ihr Können einbringen, müssen sie sich fortwährend und einfach zeitlich aufeinander abstimmen. Ohne den Dirigenten, der auf der Taktbasis die individuellen Künstler transparent leitet, gelänge die Synchronisation einer derartigen Ansammlung nicht.
- Die Einzigartigkeit sowohl eines Projektes wie auch eines Tonstückes wiederum lebt von der Ausdeutung während der Wiedergabe durch den Dirigenten und die Musiker, sie lebt von der Interpretation. Das harmonische Gerüst verbietet aber das vollkommen freie und voraussetzungslose spontane Spiel – gefragt ist das *Sichere Adaptieren* im Rahmen eines strikten Systems vorgegebener Freiheitsgrade, um ein Kunstwerk zur gelungenen Einzigartigkeit werden zu lassen.

Die Beherrschung von Dynamik und Vielfalt in der F&E durch die Lean Innovation-Systematik steht also auf drei Säulen: „Früh Strukturieren, Einfach Synchronisieren, Sicher Adaptieren."

2 Lean Innovation – Früh Strukturieren, Einfach Synchronisieren, Sicher Adaptieren

Lean Thinking an sich ist noch keine generell anwendbare Methode, sondern ein Denkansatz mit verschiedenen zentralen Wirkprinzipien, die individuell umzusetzen sind [2]. Ziel von Lean Innovation ist es, die Grundsätze des Lean Thinking auf das Management von F&E zu übertragen. Bislang wurde dieser Übertrag in ersten Ansätzen begonnen, aber keineswegs systematisch vollzogen [3]. Entsprechend zeigt eine Befragung des WZL unter 143 produzierenden Unternehmen in Deutschland, dass erst ein Drittel überhaupt begonnen hat, eine systematische Identifikation von Verschwendung in der Produktentwicklung durchzuführen [4]. Der breite Erfolg von Lean Production beruht vor allem darauf, dass das Lean Thinking für bestimmte Produktionssystemtypen umfangreich interpretiert und anhand zahlreicher Beispiele umgesetzt wurde. Vergleichbare Leitsterne fehlen für die Umsetzung von Lean Innovation noch. Lean Innovation befindet sich heute „auf dem Weg zur Systematik".

Der Begriff der Systematik definiert sich als die Lehre vom Aufbau eines Systems sowie als die Kunst, ein System gemäß planmäßiger Darstellung des Systems „Lean

Innovation“ und beantwortet die Fragestellung, nach welchen Grundsätzen sich Lean Innovation im konkreten Anwendungsfall umsetzen lässt. Sie beruht auf zehn zentralen Prinzipien, die es im Unternehmen umzusetzen gilt. Die Prinzipien leiten sich aus der eingangs beschriebenen Logik ab und operationalisieren den Grundsatz „Früh Strukturieren, Einfach Synchronisieren, Sicher Adaptieren“ für die F&E (Bild 2).

Bild 2: Die Prinzipien der Lean Innovation-Systematik [5]

2.1 Früh strukturieren: die Grundlage für erfolgreiches Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung

Der Fokus dieses Beitrages liegt auf der Basis für Komplexitätsbeherrschung in der F&E durch *Frühes Strukturieren*. Um die Produktentwicklung konsequent auf Wert auszurichten und somit der erhöhten Komplexität möglichst verschwendungsfrei gerecht zu werden, gilt es jedoch die vorgestellte Lean Innovation-Systematik ganzheitlich zu berücksichtigen.

Die Prinzipien des frühen Strukturierens zielen auf ein motiviertes Projektteam, konkrete, transparente und priorisierte Anforderungen und Werte, sowie die Zusammenstellung von Projekt und Produkt derart, dass die Grundlage für eine effiziente und einfach zu synchronisierende Abwicklung gelegt wird.

Intrinsisch motivieren durch Product Identity

Hoch motivierte Mitarbeiter bilden die Basis. Nach Malik gilt es vor allem die intrinsische Motivation der Mitarbeiter freizusetzen und zu beflügeln [6]. Dabei steht *Product Identity* im Mittelpunkt. Während die emotionale Bindung an das Produkt von Marketing-Bereichen vor allem mit Außenwirkung betrieben wird, entfaltet sie ihr Potenzial zur Leistungssteigerung der F&E vor allem nach innen. Der Stolz der Mitarbeiter auf das eigene Produkt sorgt für Identifikation und emotionale „Aufladung“. Gelingt es dieses Gefühl im Entwicklungsensemble zu verankern, ist aufgrund der daraus resultierenden intrinsischen Motivation eine signifikante Erhöhung der Innovationsproduktivität möglich.

Wertesystem definieren durch eine Zielhierarchie

Ausgangspunkt der Lean Innovation ist es, für Innovations- und Entwicklungsvorhaben den zu erzielenden Wert aus Kundensicht transparent zu definieren. Die Wertmaßstäbe, zusammengefasst als *Wertesystem,* stellen einen Ordnungsrahmen zur Abbildung einer Zielhierarchie zur Verfügung, aus der die Anforderungen sowohl an das Produkt als auch an den Prozess abgeleitet werden können. In der Zielhierarchie eines Wertesystems werden neben der Unternehmensstrategie, der Produktprogrammplanung und den Kundenanforderungen auch die Interessen und Ziele „interner Kunden“ wie z.B. Design, Marketing, Konstruktion, Produktion, Einkauf erfasst. Zu Beginn eines jeden Projektes werden im Wertesystem Ziele für und mit allen Anspruchsgruppen systematisch hergeleitet und durch gemeinsame Gewichtung und Priorisierung zu einer Zielhierarchie formiert. Für jede Anspruchsgruppe sind somit Kundenwerte und Ziele für ihre spezifische Perspektive transparent, einfach und verständlich zugänglich.

Design-Sets entwickeln mit einem systematischen Lösungsraum-Management

Der den beschriebenen Zielen gegenüberstehende Lösungsraum wird durch komplette Gestaltungsalternativen, genannt *Design-Sets*, ausgefüllt, die die Gesamtheit aller relevanten technischen Lösungsalternativen repräsentieren. Oft werden einzelne Entscheidungen in der Produktentwicklung, die den zur Verfügung stehenden Lösungsraum maßgeblich eingrenzen, zu einem zu frühen Zeitpunkt getroffen [7]. Dies führt in der Regel zu späten Iterationen oder suboptimalen Lösungen. Kern des Lösungsraum-Managements im Sinne einer Lean Innovation ist daher die systematische

Eingrenzung der in der Produktentwicklung zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade zu bewusst gewählten Zeitpunkten. Nur wenn auf Basis einer ausreichenden Informationsbasis Lösungen als suboptimal eingestuft werden können, kann der Lösungsraum eingegrenzt werden.

Bild 3 illustriert die dem Lösungsraum-Management zugrunde liegende Logik. Erster Schritt ist die Identifikation der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade, um zu entscheiden, welche davon bereits anfangs eliminiert werden können. Sollen beispielsweise bestehende Produktionskapazitäten genutzt werden, stellt dies die Fixierung eines möglichen Freiheitsgrades für das spätere Produktkonzept dar.

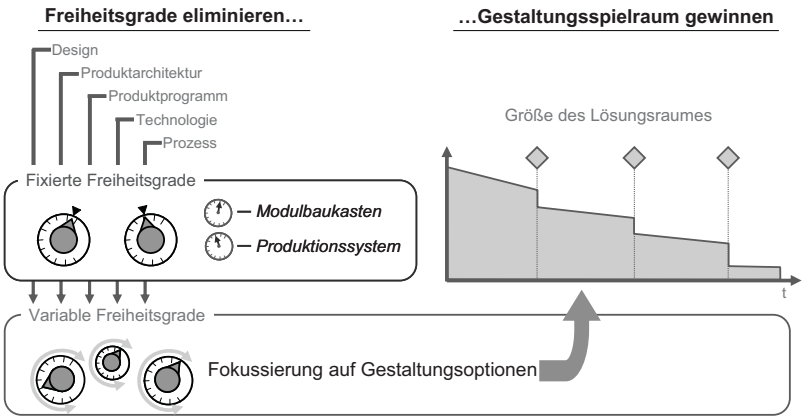


Bild 3: Logik des Lösungsraum-Managements

Produktarchitektur gestalten mit Technologie- und Funktionsmodellen

Beim systematischen Entwickeln von Produktfunktionen sind die Interdependenzen zwischen den Entwicklungsprojekten zu berücksichtigen, um produktübergreifende Kommunalitätspotenziale konsequent nutzen zu können. Beispielsweise muss im Fall einer Bauteiländerung, die ggf. mehrere Produktlinien betrifft, eine maximale Transparenz hinsichtlich der betroffenen Anforderungen vorliegen. Produktarchitekturen müssen daher über Baukastenlogiken miteinander vernetzt werden. Ein entscheidender Faktor besteht darin, Gleichheiten nicht nur in der Physis festzulegen, sondern ebenso funktionale, technische oder technologische Vereinheitlichungspotenziale zu realisieren [8]. Aufgrund der starken produktübergreifenden Vernetzung auf den drei Ebenen können einzelne

Module nicht mehr rein baureihenbezogen entwickelt werden. Um die auf diese Weise erhöhte Komplexität beherrschen zu können, müssen die Funktionen in einem Funktionsmodell mit Freiheitsgraden belegt werden. Diese geben vor, welcher Gestaltungsfreiraum sich aufgrund der produktübergreifenden Interdependenzen ergibt. Höhere Freiheitsgrade bewirken größere Konfigurationsräume zur Funktionsrealisierung bis hin zur produktspezifischen Bauteilentwicklung. Bei der Gestaltung der Produktstruktur und der Konzeption der Baugruppen muss wiederum das Technologiemodell zugrunde liegen, das die Herstellbarkeit mit gewünschten Strukturen sichert.

Sortimente optimieren durch systematische Merkmaldefinition

Neben der systematischen Entwicklung der Produktarchitektur, die der effizienten Abbildung der externen Vielfalt dient, muss jedoch auch die sortimentsseitige Vielfalt selbst auf Wert ausgerichtet werden. Hierfür ist eine systematisch strukturierte Definition des angebotenen Sortiments, die mit der Ausgestaltung der zugrunde liegenden Produktarchitektur einhergeht, erforderlich. Der Merkmalbaum dient dabei der notwendigen Visualisierung der marktseitigen Produktmerkmale mit ihren verfügbaren Ausprägungen, um im Rahmen der Produktplanung und bei Analysen bestehender Produkte Simulationen durchführen und Szenarien bewerten zu können, die bei einer Entscheidungsfindung über strategische Schwerpunkte im Produktsortiment wertvolle Informationen liefern [9].

2.2 Einfach Synchronisieren: Taktung und Ausrichtung als Grundlage einer Wertstromorientierung in der F&E

Ruhige Prozesse mit maximaler Nutzung von Skaleneffekten projektintern und -übergreifend bedingen eine durchgängige und konsistente Synchronisation aller Aktivitäten. Das *einfache Synchronisieren* erfordert die Wertstromdefinition, Kapazitätsplanung und Synchronisation.

Wertstrom definieren gemäß der Projekt-Partitur

Die Wertstromdefinition eines Projektes basiert auf der Unterscheidung von kreativen und repetitiven Prozessen. Für beide ist der Wertstrom verschwendungsfrei zu planen, wobei unterschiedliche Freiheitsgrade zu berücksichtigen sind.

Die Visualisierung der repetitiven Tätigkeiten legt meist schon eine hohe Zahl an Verbesserungsmöglichkeiten dar: Auf Basis der Wertstromkarte lassen sich auch typische

Formen der Verschwendung identifizieren, wie zum Beispiel redundante Aufgaben, Wartezeiten oder unvollständige Übergaben von Aufgaben im Entwicklungsprozess.

Der Wertschöpfungsanteil kreativer Prozesse profitiert weniger von einer derartigen Detaillierung, sondern wird durch die Nutzung von Prozessmodulen optimiert. Bei der Planung dieser Module liegt in erster Linie eine Effektivitätssteigerung unter Berücksichtigung der äußeren Schnittstellen in Form von Zielvorgaben, Eingangsgrößen, Budget und Zeitrahmen im Fokus.

Kapazitäten wirksam planen mit einem Glättungsmodell

F&E-Prozesse geraten in Unruhe, wenn es zu nicht plangerechten Kapazitäts- und Einlastungsabweichungen kommt. Engpässe oder Totzeiten sind die Folge. Planung und Projektcharakter stehen einander oft diametral entgegen. Ein Kapazitätsplanungsmodell hilft Transparenz hinsichtlich der benötigten und der zur Verfügung stehenden Ressourcen zu schaffen. Entscheidend ist hierbei, dass der Abgleich projektübergreifend und fähigkeitenbasiert erfolgt. In einem Regelkreis werden so einzelne Fähigkeiten nivelliert und geglättet. Durch die auf diese Weise geschaffene Transparenz können zudem Make-Or-Buy-Entscheidungen von Entwicklungsaufwänden bzw. Entwicklungsdienstleistungen auf sicherer Informationsbasis getroffen und deren Umsetzung systematisch geplant werden.

Einfach synchronisieren durch Taktung

Die mit Hilfe des Kapazitätsmodells zu erreichende engpassfreie Planung und Umsetzung des Wertstroms basiert auf Taktung. Bei repetitiven Aufgaben in der F&E ist die Formulierung standardisierbarer Aufgabenpakete eine Voraussetzung, um eine Taktung einführen zu können [10]. Die gleichmäßigen Takte können als „Etappenziele“ gesehen werden, zu denen vordefinierte Ergebnisse zu erreichen sind. In den Takten kann die Auslastung der einzelnen Beteiligten durch eine entsprechende Bündelung von Tätigkeiten verbessert werden. Die Taktung der repetitiven Aufgaben hat neben der Glättung von Kapazitäten auch den Zweck, den zugrunde liegenden Takt auf die kreativen Aufgaben zu übertragen. Über die Abhängigkeit der kreativen Projekttätigkeiten von den repetitiven Prozessen gibt der Takt einen projektweiten Rhythmus vor.

2.3 Sicher Adaptieren: Flexible Anpassung an die externe Dynamik

Sicheres Adaptieren dient der fortwährenden Anpassung von robusten Produkten an sich weiterentwickelnde Anforderungen. Neben der fortwährenden Perfektionierung der Produktfunktionen, ist hierfür ein daran angepasstes Release-Management einzuführen.

Systematisch perfektionieren durch ein ganzheitliches Robustheitsmodell

Die zunehmende Funktionsintegration hat in verschiedensten Branchen gezeigt, dass Instrumente zur Bewertung der Robustheit vielfach noch fehlen oder nur bedingt einsatzfähig sind. Das Robustheitsmodell der Lean Innovation dient der Identifikation von Stör- und Steuerfaktoren: Letztere haben einen regulierenden, ausgleichenden Einfluss auf die durch Störfaktoren beeinträchtigten Funktionen. Die Analyse der Robustheit einer Funktion erfolgt durch die Beschreibung der konzeptionellen Eingabeleistung, der Funktionslogik und der Ausgabeleistung. Anschließend werden mögliche Störfaktoren, welche die Funktionslogik beeinträchtigen können, identifiziert und ausgleichende Steuerfaktoren abgeleitet.

Gezielt derivieren durch Release-Management

Schließlich ist es Aufgabe der Lean Innovation, die stetige Anpassung an sich wandelnde Markt- und Kundenanforderungen sicherzustellen. Ein kontinuierlicher Strom an Neuerungen muss erzeugt werden, indem die Frequenz der Modullebenszyklen gezielt geplant und sicher in den Produkt- bzw. Derivatlebenszyklen umgesetzt wird.
Hier gilt es unter den Rahmenbedingungen der Produktprogrammplanung einen vernünftigen Weg zu finden, damit die Neuproduktrate steigt und gleichzeitig vorhandene Technologien und Anwendungen wiederverwendet werden können. Ziel ist es, die optimalen Zyklen für Weiterentwicklung, Substitution oder Ergänzung spezifischer Release-Einheiten zu identifizieren. Hierfür sind die Einheiten systematisch nach Bedeutung sowie Nachhaltigkeit des Innovationsbeitrages zu bewerten. Anschließend müssen die Releases sinnvoll gruppiert, zeitlich gestaffelt und in der Produktarchitekturplanung berücksichtigt werden.

Literatur

[1] Quelle Bild: Carl Brunn, Sinfonieorchester der Stadt Aachen, 2008

[2] Womack, J.; Jones, D.: *Lean Thinking – Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern.* Campus-Verlag, New York, 2004, S. 8

[3] Schuh, G.: *Lean Innovation – Die Handlungsanleitung.* In: Schuh, G.; Wiegand, B. (Hrsg.): 4. Lean Management Summit – Aachener Management Tage, Apprimus-Verlag Aachen, 2007, S. 7

[4] Schuh, G.; Lenders, M.; Schöning, S.: *Mit Lean Innovation zu mehr Erfolg – Ergebnisse der Erhebung.* Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, 2007, S. 3

[5] Schuh, G. et. al., *Lean Innovation – Auf dem Weg zur Systematik.* In: Brecher, C.; Klocke F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven, 2008, S. 473 bis 512

[6] Malik, F.: *Führen, Leisten, Leben. Wirksames Management für eine neue Zeit.* Heyne Verlag, Stuttgart München, 2004, S. 159

[7] Schuh, G.; Lenders, M.; Schöning, S.: *Mit Lean Innovation zu mehr Erfolg – Ergebnisse der Erhebung.* Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, 2007, S. 13

[8] Meier, J.: *Produktarchitekturtypen globalisierter Unternehmen.* Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2007, S. 91, S. 206 und S. 210

[9] Schuh, G.; *Produktkomplexität managen: Strategien – Methoden – Tools.* Hanser Verlag, München, 2005, S. 299

[10] Shepherd, B.: *Process Driven Solutions for Global and Lean Product Development.* In: Tagungsunterlagen Innovation Leadership Summit 2007, WZL der RWTH Aachen, 2007

Effizienzsteigerung der Produktentwicklung durch numerische Optimierung in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses

Sven Faßbender, Markus Bröckerhoff*

Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University
Steinbachstraße 7, D-52074 Aachen
Email: fassbender@ika.rwth-aachen.de; Internet: http://www.ika.rwth-aachen.de

*Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka)
Steinbachstr. 7, D-52074 Aachen
Email: broeckerhoff@fka.de; Internet: http://www.fka.de

Inhalt: *Dieser Beitrag gibt einen Überblick über gängige Methoden der numerischen Optimierung im Rahmen der Konzeptentwicklung und der Dimensionierung von Strukturbauteilen. Auf theoretischer und praktischer Ebene wird gezeigt, wie durch den Einsatz dieser Methoden eine Effizienzsteigerung des Entwicklungsprozesses erzielt werden kann.*

Abstract: *This paper provides an overview of established numerical optimisation methods for concept development and dimensioning of structural parts. It demonstrates on theoretical and practical level how the efficiency of the design process can be enhanced by implementing these tools.*

Stichwörter: *Effizienzsteigerung in der Konstruktion, innovative Praxislösungen, Methoden und Strategien der Strukturbauteilentwicklung, Karosseriekonzeption, Bionik, numerische Optimierung*

Keywords: *enhancing the efficiency of the design process, innovative solutions in practice, methods and strategies for structural component design, car body development, bionic, numerical optimisation*

1 Einleitung

Der Einsatz von CAE-Werkzeugen hat den Konstruktionsprozess revolutioniert und ist unverzichtbar für eine effiziente und nachhaltige Produktentwicklung. Die numerische Optimierung ist in ihrer industriellen Anwendung noch eine relativ junge Disziplin innerhalb der Familie der CAE-Methoden. Der sachgemäße Einsatz von Optimierungsverfahren bei der Entwicklung mechanisch beanspruchter Bauteile bietet enormes Potenzial hinsichtlich Leichtbau, Festigkeit, Robustheit und Entwicklungszeit. Dieser Beitrag soll dem potenziellen Anwender einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen numerischer Opti-

mierungsverfahren im Konstruktionsprozess liefern. Hierzu werden zunächst gängige Optimierungsverfahren vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Methode der Topologieoptimierung, welche durch ihre Implementierbarkeit in die frühe Phase der Strukturbauteilentwicklung ein besonders hohes Effizienzsteigerungspotenzial verspricht. Abschließend wird die Anwendung numerischer Optimierungsverfahren an Praxisbeispielen aus den Fahrzeugbau vorgestellt und das Potenzial ihres Einsatzes aufgezeigt. Unter anderem wird hierzu auf die verstärkt numerisch gestützte Konzeptentwicklung der Vorderwagenstruktur für einen Pkw der Kompaktklasse eingegangen.

2 Numerische Optimierungsmethoden zur Strukturbauteilauslegung

Das Vorgehen bei der Auslegung und Ausgestaltung von Strukturbauteilen lässt sich in den allgemeinen Konstruktionsprozess, etwa nach VDI 2221, einordnen. Dem Konstrukteur liegen aus der Planungs- und frühen Konzeptionsphase bereits Informationen über die Bauteilanforderungen und die prinzipielle Funktionsweise vor. Damit können die nachfolgenden Schritte, wie in Bild 1 dargestellt, in die Konzeption der Lastpfade, den Bauteilentwurf im CAD-System, den Test der Struktureigenschaften etwa mit Hilfe der numerischen Simulation und die Ausarbeitung des Entwurfs unterteilt werden. Analog zum allgemeinen Konstruktionsprozess ist ein iteratives Vor- und Zurückspringen zu einem oder mehreren Arbeitsabschnitten erforderlich, um letztlich ein Bauteil zu erhalten, das die Anforderungen zufriedenstellend erfüllt.

Neben dem Ablauf der Strukturbauteilgestaltung ist in Bild 1 dargestellt, welche gängigen Optimierungsverfahren in welchen Phasen angewendet werden können. Die linke Seite von Bild 1 zeigt den Entwicklungsprozess ohne den Einsatz der Topologieoptimierung, während auf der rechten Seite der Einfluss des Topologieoptimierungseinsatzes auf den Ablauf der Bauteilauslegung skizziert ist. Die Topologieoptimierung stellt ein mathematisches Verfahren zur Ermittlung einer belastungsgerechten Materialverteilung in einem festgelegten Bauraum unter vorgegebenen Randbedingungen und Lastfällen dar. Diese erforderlichen Eingangsgrößen für eine Topologieoptimierung liegen im Allgemeinen schon in der Anfangsphase der Strukturbauteilgestaltung vor. Der Konstrukteur ist daher durch den Einsatz der Topologieoptimierung in der Lage, bereits sein erstes Konzept auf der Grundlage numerisch berechneter und damit an spezielle bauteilspezifische Randbedingungen angepasster Materialverteilungen bzw. Lastpfade zu erstellen. Die Sicherheit

des Konzepts in Bezug auf das Erreichen der gewünschten mechanischen Anforderungen steigt, so dass, wie in Bild 1 rechts angedeutet, oftmals die Iterationsschleife zurück zum Konzipieren entfallen kann. Das Konzept ist von Beginn an robuster und es besteht eine geringere Gefahr, dass in nachfolgenden Entwicklungsschritten Erkenntnisse entstehen, die eine Konzeptänderung erforderlich machen. Weil die Kosten für Konstruktionsänderungen überproportional mit dem Zeitpunkt, zu dem sie vorgenommen werden, steigen, stellt ein robustes Konzept die Grundlage für einen effizienten und wirtschaftlichen Entwicklungsprozess dar.

Im Gegensatz zu wissensbasierten Hilfsmitteln zum Konzipieren von Strukturbauteilen können Lastfälle und Randbedingungen bei der Topologieoptimierung wesentlich freier an das spezifische Problem angepasst werden, so dass dieses Werkzeug insbesondere für die Anwendung bei Neukonstruktionen geeignet ist.

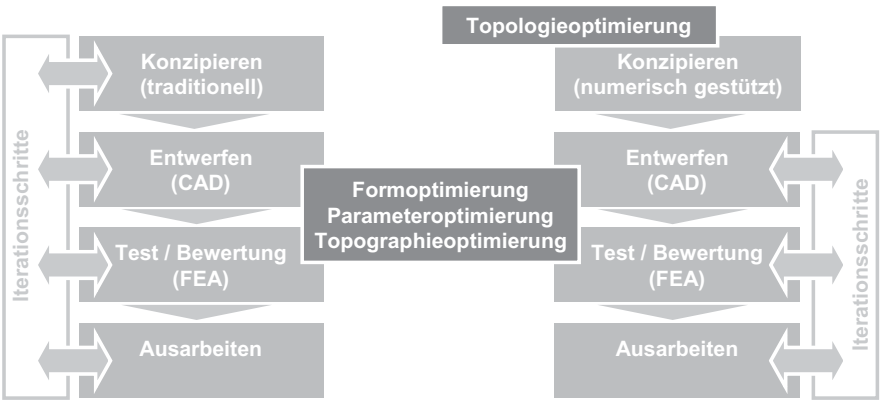


Bild 1: Einordnung numerischer Optimierungsverfahren in den Konstruktionsprozess

Anders als bei der Topologieoptimierung erfordern die Optimierungsverfahren Formoptimierung, Parameteroptimierung und Topographieoptimierung als Eingangsgröße zumindest eine grobe geometrische Beschreibung der Bauteilstruktur. Die Bauteilstruktur oder die Materialeigenschaften werden dann durch den Optimierungsalgorithmus systematisch verändert, um eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu erzielen. Demnach sind diese Verfahren im Gestaltungsprozess zwischen dem Entwerfen und dem Testen/Bewerten einzuordnen. Die Effizienzsteigerung durch diese Optimierungsmethoden besteht darin, dass zwar keine Iterationsschleife ausgelassen werden kann, die

vom Konstrukteur durchzuführenden Iterationen zwischen Entwurf und Test/Bewertung aber reduziert bzw. automatisiert und beschleunigt werden können.

Wie die Topologieoptimierung werden auch die zuletzt genannten Optimierungsverfahren im Allgemeinen in Verbindung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) angewandt, um die Auswirkungen der Optimierereingriffe auf die Strukturantworten zu berechnen. Bei Form- und Topographieoptimierung bestehen die Optimierungseingriffe aus Geometrieänderungen, die meist durch Verschiebung der Knoten des FEM-Netzes realisiert werden. Die Formoptimierung wird in der Regel angewandt, um an Bauteilen durch geringe geometrische Änderungen Spannungsspitzen zu reduzieren. Dahingegen dient die Topographieoptimierung zur Auffindung geeigneter Sickenbilder in flächigen Strukturen, etwa zur Erhöhung der Steifigkeit oder der gezielten Einstellung der Eigenfrequenz. Die Parameteroptimierung ist eine sehr allgemeine Form der Optimierung, da als veränderliche Parameter verschiedene Einträge im Datensatz des Berechnungsmodells und damit unterschiedlichste Bauteileigenschaften z.B. Material, Blechdicke oder Geometriebedingungen verändert werden können. Zudem kann die Parameteroptimierung unabhängig vom dem für die Berechnung der Strukturantwort verwendeten Solver durchgeführt werden, so dass auch komplexe, nichtlineare Struktureigenschaften, wie etwa das Crashverhalten optimierbar sind. Auch ist es möglich multidisziplinäre Optimierungen mit mehr als einer zu optimierenden Eigenschaft, z.B. Minimierung der Crashintrusion bei Maximierung der Torsionssteifigkeit, durchzuführen. Alle Optimierungsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass die Strukturänderungen auf Basis strenger Algorithmen wie Extremwertapproximation oder Wachstumsfunktionen basieren und sich damit von intuitiven bzw. stochastischen Verfahren und dem Design of Experiments abgrenzen.

3 Topologieoptimierung in Natur und Technik

Aufgrund des hohen Effizienzsteigerungspotentials des Prozesses der Strukturbauteilgestaltung durch die frühe Anwendbarkeit der Topologieoptimierung soll auf dieses Verfahren detaillierter eingegangen werden.

Die Topologieoptimierung basiert darauf, das Grundprinzip des Wachstumsverhaltens natürlicher Kraftträger, wie Knochen oder Bäume, zur Strukturgeneration technischer Bauteile zu simulieren. Im Wesentlichen verlangt dies, Material an stark belasteten bzw.

bei technischen Bauteilen in Bezug auf die geforderte Zielfunktion stark sensitiven Regionen anzuhäufen und an weniger stark beanspruchten bzw. bedeutsamen Stellen zu entfernen. Ein Beispiel für einen durch natürliches Wachstum optimierten Kraftträger ist der in Bild 2 gezeigte Pelikanknochen mit der beanspruchungsgerechten Dichte und Orientierung der inneren Knochenverrippungen.

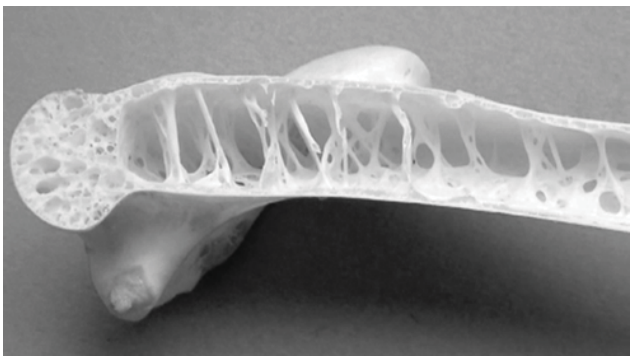


Bild 2: Querschnitt durch den Oberarmknochen (Humerus) eines Pelikans

Bei der simulativen Nachbildung dieses Prinzips ist es zunächst erforderlich, das Entstehen von Löchern (Materialentfernung) im FEM-Netz abbilden zu können. Ein anschauliches Verfahren dazu ist die sog. Density-Method, bei welcher der Elastizitätsmodul der Elemente zwischen einem Maximalwert zur Repräsentation von Vollmaterial und einem sehr kleinen Elastizitätsmodul zur Nachbildung eines Lochs bzw. entfernten Materials variiert wird. Entsprechend der Änderung des Elastizitätsmoduls wird auch die Dichte jedes Elementes skaliert, so dass in Kombination das erwartungsgemäße Verhalten einer porösen Struktur abgebildet werden kann.

Die Art und Weise, in einem durch ein FEM-Netz abgegrenzten Bauraum eine für vorgegebene Anforderungen optimierte Materialverteilung bzw. Elastizitäts- und Dichteverteilung zu berechnen, ist bei verschiedenen Topologieoptimierungsprogrammen unterschiedlich. Im Wesentlichen unterschiedet man die sog. SKO (Soft Kill Option) und gradientenbasierte Optimierungsalgorithmen. Beide Verfahren sind gekennzeichnet durch einen iterativen Prozess, in dem die Elastizitäts- und Dichteverteilung in aufeinander folgenden FE-Berechnungen solange variiert wird, bis ein Abbruchkriterium, welches die Erfüllung der gewünschten Anforderungen abbildet, erreicht ist. In Hinblick auf die

Systematik, mit der die Materialverteilungsvariation durchgeführt wird, folgt die SKO stark dem natürlichen Wachstumsprozess, da bei der SKO kein klassischer Optimierungsalgorithmus, sondern eine empirische Wachstumsregel zur Festlegung der Elastizitätsmodulvariation in aufeinander folgenden Berechnungsiterationen eingesetzt wird. Hierzu werden zunächst für jedes Element bzw. jeden Knoten des Bauraumnetzes die Vergleichsspannungen berechnet. Abhängig von der Größe der Abweichung zu einer vom Benutzer festgelegten Referenzspannung wird in der nachfolgenden Iteration dann der Elastizitätsmodul des Elementes verändert. Der Elastizitätsmodul und die Dichte von Elementen, deren Spannungen größer sind als die Referenzspannung, werden erhöht, bei Elementen, deren Spannungen geringer sind als die Referenzspannung, hingegen reduziert. Es entsteht ein Wachstumsprozess, bei dem Material an hochbelasteten Stellen angehäuft und an weniger stark belasteten Stellen abgebaut wird. Somit liefert die SKO iterativ ein Bauteil mit homogener Oberflächenspannung. Die Methode ist daher besonders für festigkeitsrelevante Bauteile geeignet.

Im Gegensatz zur SKO kann die von Iteration zu Iteration vorzunehmende Änderung der Materialverteilung, bei der Density-Method also des Elastizitätsmoduls und der Dichte, auch durch einen Optimierungsalgorithmus vorgenommen werden. Hierzu wird die Suche nach der geeigneten Materialverteilung auf ein Extremwertproblem zurückgeführt. Dies ist insbesondere bei linearen Problemen sehr effizient, weil durch gradientenbasierte Verfahren eine verbesserte Elastizitätsmodulverteilung für die nachfolgende Iteration direkt aus der Steifigkeitsmatrix der Vorgängeriteration berechnet werden kann. Dies führt zu einem guten Konvergenzverhalten. Zudem ist die Auswahl an Zielfunktionen und Randbedingungen, sprich an Bauteilanforderungen, bei optimierungsalgorithmenbasierten Verfahren größer als bei der SKO. So können z.B. Steifigkeit, Eigenfrequenz, Volumenreduktionen des Bauraums, Spannungen, Dehnungen oder Trägheitsmomente vorgegeben oder optimiert werden.

Abschließend sei noch angemerkt, dass auch die Topologieoptimierung einen erfahrenen Konstrukteur nicht ersetzen kann. Bei einfachen Lastfällen können erfahrene Konstrukteure das Ergebnis der Topologieoptimierung häufig sogar vorhersagen. Die Topologieoptimierung ist daher als Unterstützungswerkzeug vor allem bei der Entwicklung von Bauteilen mit komplexen oder ungewöhnlichen Belastungen und Anforderungen anzusehen. Die Vorschläge aus der Topologieoptimierung und die berücksichtigten Last-

fälle, die entscheidend für das Optimierungsergebnis sind, sollten immer vom Konstrukteur verstanden, interpretiert und geeignet abgeändert werden.
Bei der Entwicklung von Bauteilen, deren Anforderungen sich durch lineare Probleme beschreiben lassen, hat sich die Topologieoptimierung zumindest bei größeren Unternehmen bereits durchgesetzt. An der Übertragung der Topologieoptimierung auf nichtlineare Probleme, wie z. B. deformierende Strukturen, wird geforscht.

4 Anwendungsbeispiele aus dem Fahrzeugbau

Das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University setzt die Methode der Topologieoptimierung seit Jahren bei der Entwicklung von Strukturkonzepten für Bauteile aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik ein. Die hier vorgestellten Beispiele sind mit Hilfe der optimierungsalgorithmusbasierten Topologieoptimierungssoftware OptiStruct der Firma Altair entwickelt worden.

4.1 Lkw-Bremsträger

Zusammen mit Partnern des niederländischen Material Innovations Institute (M2i) entwickelt das ika eine gewichtsreduzierte Lkw-Hinterachse mit verbessertem Wirkungsgrad. Zum Erreichen des Gewichtsziels ist unter anderem die Topologieoptimierung als Werkzeug des Konstruktionsleichts eingesetzt worden. Ein Beispiel hierzu, an dem der typische Ablauf einer Topologieoptimierung gut demonstriert werden kann, ist der Bremsträger. Neben der Fixierung der Bremse hat der Bremsträger vor allem die Aufgabe, das Bremsmoment vom Bremssattel in den Achskörper zu leiten. Durch das hohe zu übertragende Drehmoment ist der Lastfall des Bremsens derart dominant, dass er als einziger Lastfall bei der Optimierung zu berücksichtigen ist.

In Bild 3 sind die typischen Arbeitsschritte einer Topologieoptimierung chronologisch dargestellt. Ausgehend von dem CAD-Model des zu optimierenden Bauteils (Referenz) wird ein FEM-Model zur Ermittlung der mechanischen Bauteileigenschaften aufgebaut. Anschließend wird die Topologieoptimierung für einen Bauraum durchgeführt, der größer ist als das Referenzbauteil, aber zu keinen Kollisionen mit anderen Bauteilen in der Umgebung des Bremsträgers führt. Der Konstrukteur interpretiert den Vorschlag aus der Topologieoptimierung und erstellt auf dieser Basis ein CAD-Model des optimierten Konzeptes. Dabei berücksichtigt er Herstellbarkeit und ggf. nicht durch die Lastfälle der

Topologieoptimierung abgedeckte Anforderungen. In dem Beispiel aus Bild 3 ist eine dieser Anforderungen das Vorsehen einer Aufnahme für den ABS-Sensor. Die mechanischen Eigenschaften des optimierten Konzepts werden dann durch eine FEM-Analyse berechnet. Gegebenenfalls werden Konzeptparameter wie z.B. die Wandstärken variiert bis die mechanischen Eigenschaften des Referenzbauteils bei zufriedenstellender Gewichtsreduktion erreicht sind. Dies kann manuell oder durch eine nachgeschaltete Parameter- bzw. Formoptimierung erfolgen. Die ebenfalls in Bild 3 dargestellten Eigenschaften von Referenzbauteil und Konzept verdeutlichen, dass mit relativ wenig Aufwand durch den Einsatz der Topologieoptimierung unter Beibehaltung des Werkstoffes des Referenzbauteils deutliche Gewichtsreduktionen (hier 23%) erzielt werden können. Die gezeigten Arbeitsschritte sind in einem Tag durchgeführt worden;

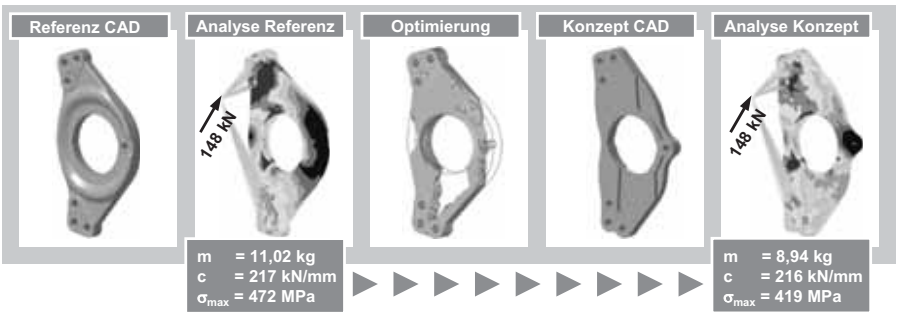


Bild 3: Phasen und Ergebnis der Bremsträgeroptimierung

4.2 Aluminium-Vorderwagen

Einzelbauteile, vornehmlich durch Guss- oder, wie der obige Bremsträger, durch Schmiedeverfahren gefertigt, stellen das klassische Anwendungsgebiet der Topologieoptimierung dar. Bei diesen Bauteilen lassen sich die größten Optimierungserfolge erzielen. Das ika wendet die Topologieoptimierung allerdings auch auf komplexe Strukturverbunde aus Bauteilen unterschiedlicher Herstellungsverfahren an. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Rohkarosserie.

Auch bei komplexen Strukturverbunden unterscheidet sich das prinzipielle Vorgehen bei der Topologieoptimierung nur unwesentlich von dem am Beispiel des Bremsträgers umrissenen Arbeitsablauf. In der Regel ist allerdings, wie in Bild 4 angedeutet, eine

deutlich höhere Anzahl an Lastfällen zu berücksichtigen. Dabei müssen nichtlineare Lastfälle, z.B. die Crashlastfälle bei der Vorderwagenstruktur, in lineare Ersatzlastfälle überführt werden. Es empfiehlt sich, die Lastfälle bei der Optimierung sowohl einzeln, als auch in Kombination zu analysieren, da verschiedene Lastfälle zumindest abschnittsweise zu ähnlichen Strukturen führen und durch die Kenntnis der Optimierungsergebnisse der Einzellastfälle das Gesamtergebnis besser interpretiert werden kann. Zudem ist es dann teilweise sogar möglich, einige Lastfälle in der kombinierten Optimierung wegzulassen.

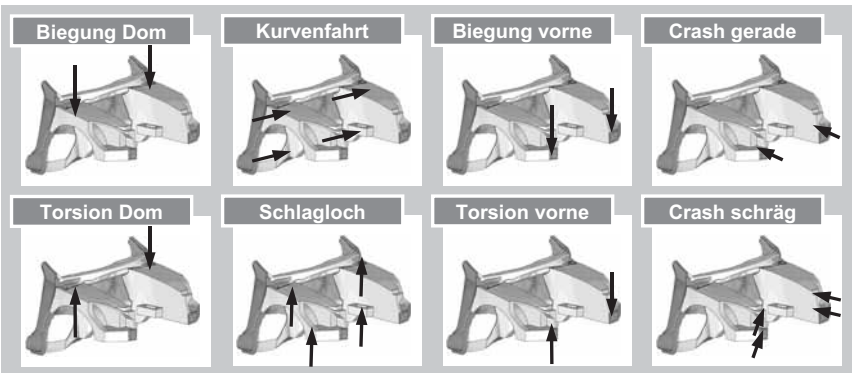


Bild 4: Lastfälle für die Topologieoptimierung einer Vorderwagenstruktur

Bei komplexen Strukturen ist die Interpretation der Vorschläge aus den Optimierungen von besonderer Bedeutung. Vor allem bei hohlen Blechstrukturen verlangt die Überführung des Optimierungsvorschlags in ein CAD-Modell eine hohe Abstraktionsleistung von dem Konstrukteur. Es empfiehlt sich ein schrittweises Vorgehen, wie in Bild 5 skizziert. Ausgehend von dem Optimierungsergebnis werden zunächst wesentliche Komponenten, z.B. die Längsträger einschließlich ihrer Lage im Raum, identifiziert (Interpretation). Anschließend müssen den Komponenten geeignete Querschnitte und Herstellungsverfahren zugeordnet werden. Dies führt im Allgemeinen zu einer Aufteilung der Komponenten in Bauteile. Diese erste Struktur ist dann zu modellieren und zu berechnen (Strukturableitung). An dieser Stelle kann es sinnvoll sein, eine Topologieoptimierung für Teilbereiche der Struktur anzuschließen. So könnte z.B. bei bereits ausmodellierten Längsträgern ein Designvorschlag für den Federbeindom ermittelt werden. Abschließend wird das Konzept mit Bauteilen, die nicht in den Lastfällen der Optimierung berücksichtigt

worden sind, vervollständigt und mit anderen Optimierungsverfahren, z.B. der Parameteroptimierung zur Ermittlung der Wandstärken bzw. Blechdicken, nachoptimiert. Die Topologieoptimierung zeigt auch Potenzial, wenn zur Überführung in ein Konzept ein hoher Abstraktionsgrad notwendig ist. Neben dem in Bild 5 dargestellten Konzept, das sich stark an dem Vorschlag aus der Topologieoptimierung orientiert, ist auch ein Konzept in konventionellerer Bauweise erstellt und der gleichen Nachoptimierung unterzogen worden. Bei dem Konzept auf Basis der Topologieoptimierung ist insgesamt eine um 6 % höhere Gewichtsreduktion erzielt worden.

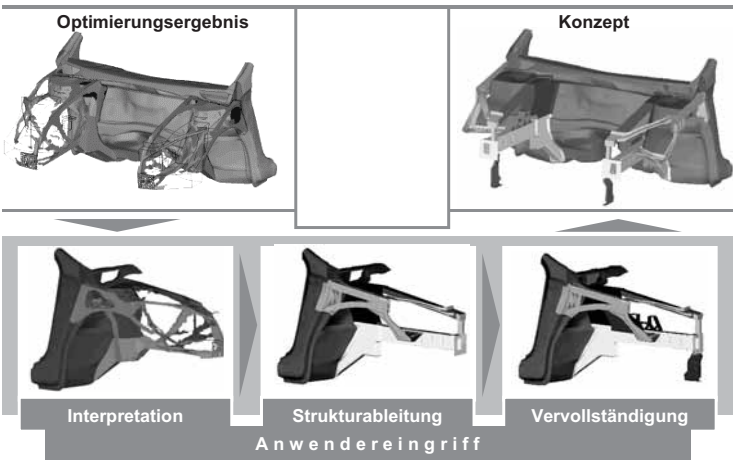


Bild 5: Konzeptableitung einer Vorderwagenstruktur durch Interpretation der Topologieoptimierung

DMG–Lib – Ein webbasierter Lösungskatalog zur Unterstützung des Entwurfs von ungleichförmig übersetzenden Getrieben.

Johannes Kloppenburg, Mathias Hüsing, Burkhard Corves, Torsten Brix*

Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik, RWTH Aachen, Eilfschornsteinstr. 18, D-52062 Aachen
*Institut Maschinen- und Gerätekonstruktion, TU Ilmenau, D-98684 Ilmenau
Email: corves@igm.rwth-aachen.de, kloppenburg@igm.rwth-aachen.de; Internet: www.igm.rwth-aachen.de
*Email: brix@tu-ilmenau.de; Internet: www.tu-ilmenau.de

Inhalt: *Die kinematische Auslegung von Mechanismen spielt im Konstruktionsprozess technischer Produkte eine zentrale Rolle. Betrachtet man das Verhältnis des globalen Wissenstandes zum praktisch verfügbaren Wissen, so kommt man zu dem Schluss, dass das Bedürfnis nach rascher Informationsbereitstellung für den effizienten Konstruktionsprozess bisher nicht ausreichend befriedigt wird. Die digitale Bibliothek DMG–Lib [1] wurde 2004 gegründet und wird als gemeinsames Forschungsprojekt der Universitäten Ilmenau, Aachen und Dresden von der DFG gefördert. Zur Bewahrung und barrierearmen Veröffentlichung von getriebetechnischem Fachwissen wurde ein interdisziplinäres Internetportal geschaffen, das über die bisherigen Ansätze digitaler Bibliotheken hinausragt und somit neue Maßstäbe für didaktische Wissensvermittlung mit Hilfe des Mediums Internet setzt. Das Portal richtet sich an verschiedene Nutzergruppen und bietet das Fachwissen entsprechend aufbereitet an. Für den professionellen Einsatz im Ingenieursalltag kann die Sammlung der Getriebemodelle als Konstruktions- und Lösungskatalog verwendet werden. Die Webseite führt den Konstrukteur schrittweise durch den methodischen Konstruktionsprozess, und bietet gleichzeitig Hilfestellung durch angereicherte Literatur und interaktive Hilfsmittel bis hin zu rechnerbasierten Synthesemethoden. In diesem Vortrag werden der praktische Nutzen von DMG-Lib und die Anwendung in der Prinzip- und Struktursynthese bei der Lösung einer beispielhaften Bewegungsaufgabe demonstriert.*

Abstract: *Mechanical motion devices are fundamental parts of modern technical products. But the global knowledge about mechanisms in theory and application is mostly scattered and only fragmentarily accessible for users like engineers, scientists or students and it does not comply with today's requirements concerning a quick information retrieval. Avoiding this sneaking loss of knowledge is the aim of the Digital Mechanism and Gear Library (DMG-Lib) [1] which is an online resource in the domain of mechanical motion. According to fundamental design methodology, this website can be instrumental in solving motion tasks. Following its different approaches in providing information, DMG-Lib is a versatile tool to support the design process in the domain of topological and dimensional synthesis and also an information resource to refresh personal knowledge about engineering techniques and methods. The database-oriented collection of mechanism descriptions is one of the most comprehensive repositories in the world, which is offering interactive accessible motion principles. In contrast to other digital libraries and collections, content of DMG-Lib is*

enhanced with metadata in the domain of mechanism science, a fact that is necessary to offer powerful result-oriented search functionality and a well structured and customizable representation of knowledge about mechanisms and gears. Using DMG-Lib in every day business allows engineers to find possible solutions for unique motion tasks and methods to adopt them to technical products. Interactive animations will provide a visual impression of certain motion-characteristics and additional literature offers more background information about engineering methods like analysis and synthesis techniques.

Stichwörter: *digitale Bibliothek, Getriebetechnik, Konstruktionsmethodik*

Keywords: *digital libraries, mechanism science, methodic construction*

1 Getriebetechnikportal DMG-Lib [1]

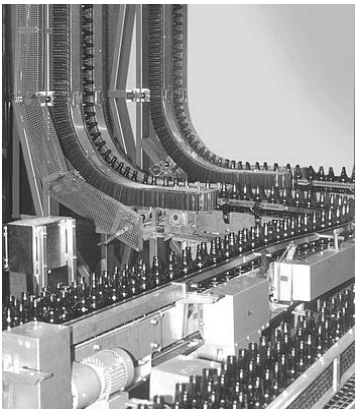
Die kinematische Auslegung von Mechanismen spielt im Konstruktionsprozess technischer Produkte eine zentrale Rolle. Betrachtet man das Verhältnis des globalen Wissensstandes zum praktisch verfügbaren Wissen, so kommt man zu dem Schluss, dass das Bedürfnis nach rascher Informationsbereitstellung für den effizienten Konstruktionsprozess bisher nicht ausreichend befriedigt wird. Die digitale Bibliothek DMG–Lib wurde 2004 gegründet und wird als gemeinsames Forschungsprojekt der Universitäten Ilmenau, Aachen und Dresden von der DFG gefördert [10]. Zur Bewahrung und barrierefreien Veröffentlichung von getriebetechnischem Fachwissen wurde ein interdisziplinäres Internetportal geschaffen, das über die bisherigen Ansätze digitaler Bibliotheken hinausragt und somit neue Maßstäbe für didaktische Wissensvermittlung mit Hilfe des Mediums Internet setzt. Das Portal richtet sich an verschiedene Nutzergruppen und bietet das Fachwissen entsprechend aufbereitet an [2,3].

Die bereitgestellten Inhalte der Bibliothek sind sehr heterogen, grenzen sich aber durch den Bezug zur Getriebetechnik von anderen Forschungsfeldern ab. Neben der Verfügbarkeit digitalisierter Fachliteratur kennzeichnet DMG-Lib die Sammlung und ingenieurstechnische Aufbereitung von Beispielgetrieben und Lösungsprinzipien, welche seit Einführung der Getriebetechnik zum Verständnis von geführten Bewegungen beigetragen haben [8].

2 Technische Problemstellung

In der Konstruktionsmethodik sind Lösungskataloge als Hilfsmittel zur Lösungsfindung Stand der Technik [4,5]. Der Einsatz der Getriebemodelldatenbank DMG-Lib als Wissens-

speicher im Konstruktionsprozess wird in einem einfach gehaltenen aber dennoch typischen Konstruktionsbeispiel aufgezeigt (Bild 1).



Person in Charge: Kg Page 1 of 1 Date: 01.01.2009	bottle station DMG 001	
requirement specification		

No.	requirement	m/o	Source	Date
	... ...	...	...	...
10	vertical translation between stations: > 100mm ⇨parallel motion of bottle ⇨dwell period in turning back position for bottle exchange	m	cust.	31.12
11	low acceleration of bottle input			
12	available space is restricted ⇨frame joints ⇨packaging in factory outlet			
13	reliable, low-cost mechanism ⇨robust layout ⇨maintenance			

m = must – o = optional

Bild 1: Förderanlage einer Abfüllstation und Pflichtenheft einer Transportvorrichtung

Gefordert wird die rein mechanische Förderung offener Gefäße in vertikaler Richtung innerhalb einer Abfüllstation. Diese kinematische Hauptforderung muss in der endgültigen Anlage durch den zu findenden Mechanismus erfüllt werden. Eine solche kinematische Anforderung ist in der Praxis oft durch typische Nebenforderungen beschränkt [6]:

- Kinematische Nebenforderungen: Bau- und Arbeitsraum; Art der Steuerung; Maximalwerte der Bewegungsgrößen (Geschwindigkeit, Beschleunigung).
- Dynamische Nebenforderungen: Maximalwerte der Belastung von Gelenken, Bauteilen, Antrieben; Kraft-, Leistungs- und Massenausgleich; Schwingungsverhalten.
- Sonstige Nebenforderungen: Genauigkeit, Lebensdauer, Kosten.

Als universelle Getriebetechnikplattform kann DMG-Lib eingesetzt werden, um im Rahmen der systematischen Produktentwicklung in den frühen Phasen der Ideenfindung und der kinematischen Umsetzung von Bewegungsaufgaben schnell und umfassend zu informieren. Durch die enge Verzahnung von Lösungsvorschlägen, Synthese- und Analysemethoden und im Volltext suchbarer Fachliteratur wird der Konstrukteur in der Auswahl (Prinzipsynthese) und Ausgestaltung (Maßsynthese, Analyse) unterstützt.

3 Formulierung der Bewegungsaufgabe: Von der technischen Anforderung zur Datenbankanfrage

Die rein funktionale Beschreibung des Lastenheftes muss in eine eindeutige Suchanfrage an die Datenbank der Mechanismenmodelle übersetzt werden. Ist im Lastenheft noch eine freie Formulierung von Anforderungen erlaubt, so muss spätestens bei der getriebetechnischen Formulierung der Bewegungsaufgabe auf ein kontrolliertes, eindeutiges Vokabular zurückgegriffen werden, welches durch die Datenbank- und Suchfunktionsstruktur realisiert ist. Die für den Benutzer sichtbare Schnittstelle zur Portaldatenbank ist das Suchformular zur Getriebesuche (Bild 2).

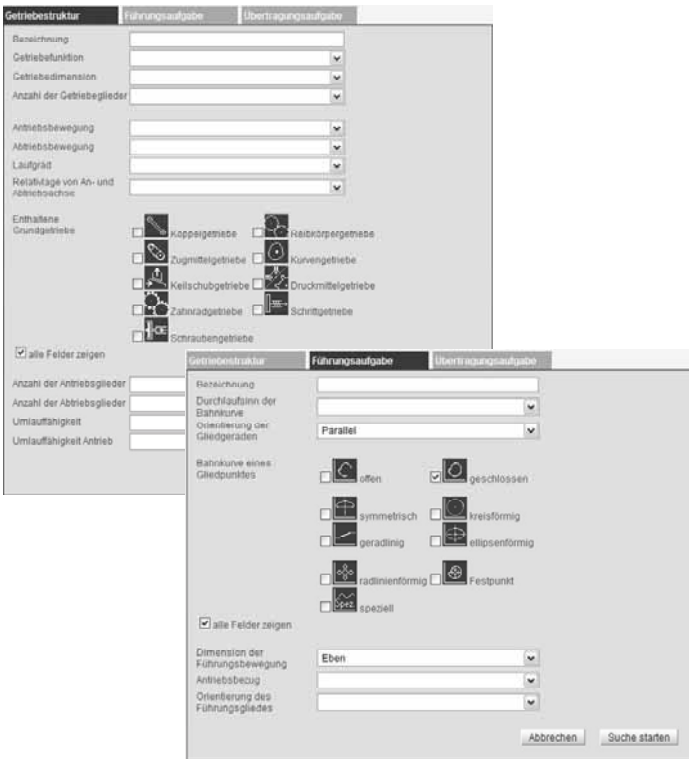


Bild 2: Mechanismensuche innerhalb der Portalseite

Die Gliederung dieser Suchfunktion und die überprüfbaren Merkmalswerte ergeben sich aus den Metadaten, die innerhalb der Datenbank für die Mechanismenbeschreibungen verfügbar sind. Die Beschreibung der Bewegungsaufgabe erfolgt in der Suchmaske mit Hilfe eines Formulars, das die Eingabe freier Zeichenketten oder die Auswahl vordefinierter Merkmalswerte erlaubt und zu einer Datenbankabfrage bündelt. Zunächst findet eine Klassifizierung der Bewegungsaufgabe statt. Der Benutzer kann hierbei sein Problem in typische Teilaufgaben zerlegen. Die Ausprägung eines Mechanismus wird zum einen durch seine Getriebestruktur und zum anderen durch die Art der gewünschten Bewegungsumwandlung bestimmt. Deshalb kann in der Suchmaske „Getriebestruktur“ festgelegt werden, welche Art und Anzahl von Antriebselementen zum Einsatz kommt, auf welche getriebetechnischen Funktionselemente sich die ausgeführte Konstruktion beschränken soll oder wie viele Getriebeglieder maximal eingesetzt werden sollen. Die Trennung in die funktionalen Teilaufgaben Übertragungsaufgabe und Führungsaufgabe ergibt sich aus dem geplanten Einsatzbereich des Getriebes. Bei Übertragungsgetrieben gilt es im Wesentlichen, die Bewegungsgrößen des Abtriebsgliedes gemäß einer erwünschten Übertragungsfunktion umzusetzen und damit eine Leistungsübertragung zu realisieren. Bei Führungsgetrieben steht die Einhaltung einer vorgegebenen Positions- oder Orientierungsänderung durch einen festgelegten Teil des Getriebes, beispielsweise durch Vorgabe einer Bahnkurve mit zugehöriger Orientierung im Vordergrund. Der gesuchte Mechanismus zur Flaschenbeförderung ist also als Führungsgetriebe auszulegen. Da es sich laut Lastenheft um die vertikale Bewegung eines offenen Gefäßes von einer Station zur nächsten handelt ist es wichtig, eine *Parallelführung* der geführten Gliedebene zu realisieren. Wird die Bahnkurve zudem *gleichsinnig* durchlaufen und ist *geschlossen*, so kann eine reine Drehbewegung in einem Gestellglied z. B. durch einen gesteuerten Elektromotor als Antriebsgröße eingesetzt werden.

Durch das Absenden der Suchmaske wird die ausformulierte Bewegungsaufgabe in eine Datenbankabfrage übersetzt und an die Portaldatenbank weitergeleitet. Die Portaldatenbank wird durch Inhalte der Produktionsdatenbank gespeist, für die Publikationsrechte vorhanden sind und deren Qualität redaktionell von DMG-Lib Mitarbeitern geprüft und freigegeben worden sind. Die interne Struktur und das Datenbankkonzept sind in der frühen Projektphase entwickelt worden und stützen sich z.T. auf Forschungsergebnisse früherer Untersuchungen [6,9]. Durch die Verwendung eines

relationalen Datenbankkonzeptes wird jeder von der DMG-Lib erfasste Mechanismus durch einen eigenen Datensatz repräsentiert. Die Datenstruktur umfasst sowohl die getriebetechnischen Eigenschaften bezüglich Struktur und Funktion, als auch administrative Metadaten des ausgeführten Getriebemodells (vgl. Bild 3).

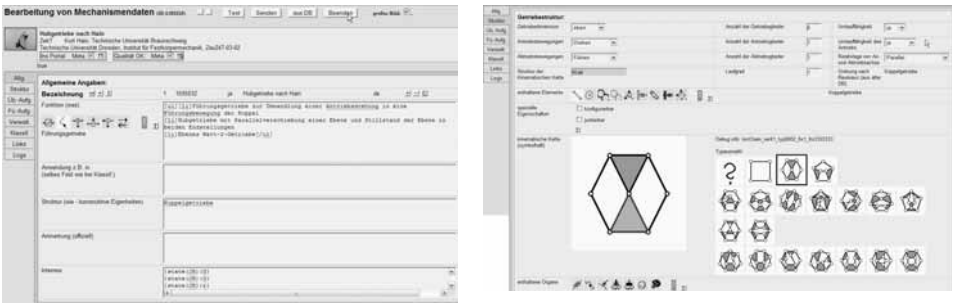


Bild 3: Produktionsdatenbank (Ausschnitt): Allgemeine Metadaten (links) /Strukturinformationen (rechts)

Grundlage und damit primäre Datenquellen sind die vielfältigen getriebetechnischen Lösungs- und Modellsammlungen der am Projekt beteiligten Universitäten aber auch historische Sammlungen von Museen und Privatleuten. Neben den Verwaltungsdaten werden alle beschreibenden Quellen und vorhandene Berechnungsunterlagen gesammelt, digitalisiert und auf dem Server des Projektes hinterlegt. Das relationale Konzept erlaubt auf der einen Seite die Verknüpfung von Getriebemodell (Datensatz) und den beschreibenden Dokumenten. Dieser Bezug und die damit verbundene Bündelung relevanter Information bedeutet schon einen ersten Schritt der Datenanreicherung und einen fachlichen Mehrwert gegenüber bisherigen digitalen Bibliotheken. Auf der anderen Seite ermöglicht das relationale Datenbankkonzept die Verbindung der Getriebedatensätze untereinander. Durch die Beschreibung dieser Relationen mit Hilfe von Eigenschaften lassen sich Ähnlichkeiten und Identitäten von Getrieben aufzeigen wie beispielsweise das Auftreten von gleichen Modellen in unterschiedlichen Lehrmittelsammlungen.

Derzeit wird eine graphisch-interaktive Umsetzung der Getriebestruktur erarbeitet, so dass in Zukunft Gruppen von Getrieben angezeigt werden können, die eine identische Struktur besitzen oder Getriebe, die sich durch einen Gestellwechsel aus der gleichen kinematischen Kette entwickeln lassen.

4 Dynamischer Lösungskatalog

Nach Auslösen der Datenbankabfrage werden alle positiven Suchtreffer zunächst in Listenform dargestellt. Neben dem Vorschaubild wird eine Kurzbeschreibung der Struktur und der Funktion durch standardisierte Phrasen gezeigt, um einen schnellen Überblick über die kinematischen Möglichkeiten des Getriebes zu liefern. In der alternativen Galerieansicht, der fortlaufenden Ansicht von Vorschaubildern, wird dieser Text genutzt, um eine „Quickinfo“ an der Mausposition einzublenden, wenn der Benutzer diese auf dem Vorschaubild platziert. (Bild 4)

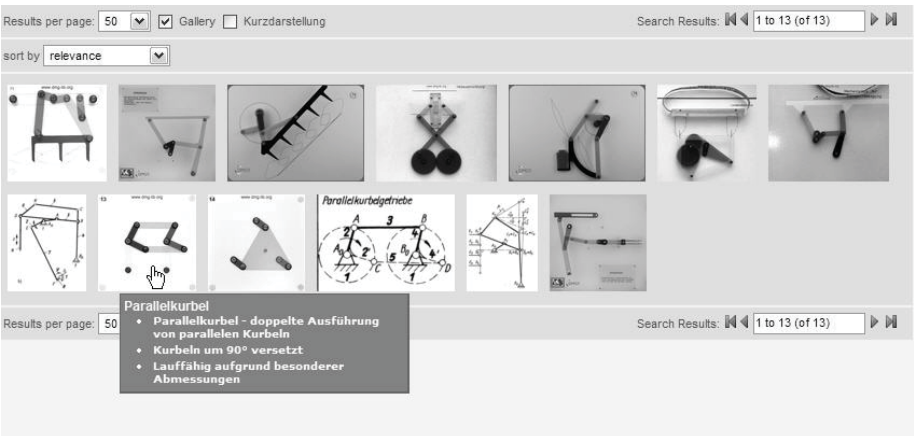


Bild 4: Darstellung der Ergebnisliste als Galerie

Eine fakultative Klassifikation der Getriebe kann hinsichtlich eines typischen Anwendungsgebietes vorgenommen werden. Diese Klassen lassen sich als Ergebnisfilter verwenden, um die Gesamtheit aller möglichen Lösungsgetriebe anhand typischer Einsatzgebiete zu gruppieren.

Übernimmt der Konstrukteur ein Lösungsgetriebe in die engere Auswahl, so lässt sich eine Detailseite öffnen (Bild 5). Für die demonstrierte Bewegungsaufgabe wird mit Hilfe der Mechanismensuche das sechsgliedrige Watt-2-Getriebe vorgeschlagen, welches für die Realisierung der gewünschten Bewegung geeignet zu sein scheint und genauer betrachtet werden kann. Die Detailseite zeigt alle relevanten getriebetechnischen Metadaten der Produktionsdatenbank und die zugehörigen verknüpften digitalen

Dokumente, die einen vertiefenden Zugang zur Funktionsweise des Getriebes ermöglichen. Für den gewählten Einsatzfall erhält man zudem die Information, dass neben den kinematischen Forderungen des Lastenheftes noch jeweils eine Rast in den Umkehrlagen erreicht wird, was bei der Entnahme der Gebinde vorteilhaft sein kann.

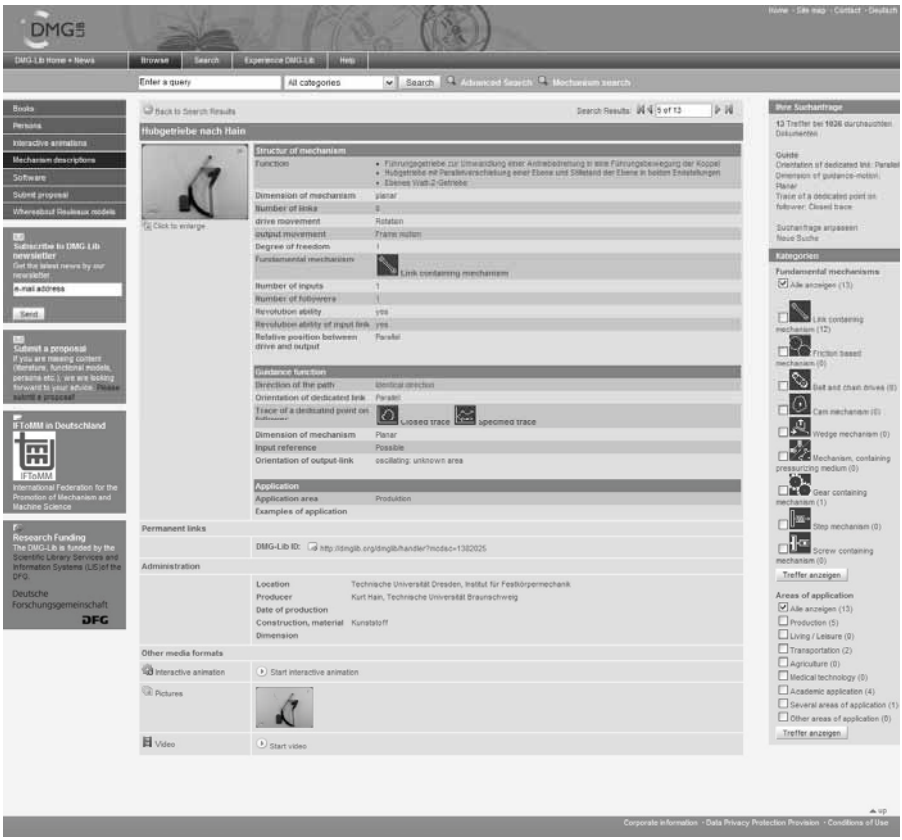


Bild 5: Ergebnisdarstellung im Detail

Für das Verständnis der Kinematik spielt neben der ausführlichen textlichen Beschreibung die Visualisierung der Bewegung in animierter Form eine herausragende Rolle. Dementsprechend vielfältig sind die von DMG-Lib angebotenen Dokumententypen. Zur Animation der Bewegung kommen neben sequentiell ablaufenden Bildfolgen (Video) auch interaktiv steuerbare Bildfolgen (AIS) [7] zum Einsatz, bei denen die Antriebsgröße

durch die Bewegung der Maus gesteuert wird und der Anwender das Gefühl bekommt, das Getriebemodell zu bedienen. (Bild 6)

Bild 6: AIS-Darstellung eines Lösungsgetriebes

Als beschreibende textliche Dokumente existieren zu vielen der erfassten Getriebe und Mechanismen Getriebebeschreibungen in Druckform. Diese Dokumente sind begleitend zum Getriebemodell von den jeweiligen Konstrukteuren verfasst worden und geben Aufschluss über verwendete Abmessungen und über die genauen kinematischen Verhältnisse. Um DMG-Lib noch besser in den modernen Arbeitsalltag von Anwendern zu integrieren, werden darüber hinaus auch Simulationsmodelle und Datensätze mathematischer und getriebetechnischer Spezialsoftware zum Download angeboten.

Es ist offensichtlich, dass eine Sammlung von Beispielgetrieben nicht für jeden Anwendungsfall die maßgeschneiderte Lösung bereitstellen kann. Vielmehr zielt die Suche darauf ab, ein geeignetes Lösungsprinzip aufzuzeigen und besonders geeignete Strukturen für die Lösung der Bewegungsaufgabe anzubieten (Prinzipsynthese). Auch für die anschließende Maßsynthese wird dem Konstrukteur zusätzliche Hilfestellung geboten. Für den demonstrierten Anwendungsfall ist noch die Anpassung der Abmessungen an die Verhältnisse am Einsatzort notwendig. Wird diese Maßsynthese auf klassische Weise durchgeführt, so kann der Bestand an digitalisierter Literatur im Volltext durchsucht werden. (Bild 7) Hier ist z.B. eine Suche nach den getriebetechnischen Methoden als auch nach Stichwörtern aus der Getriebemodellsuche möglich. Soll der Syntheseschritt computergestützt ablaufen, so bietet DMG–Lib eine aktuelle Liste freier und kostenpflichtiger Softwareprodukte an, die eingesetzt werden können.

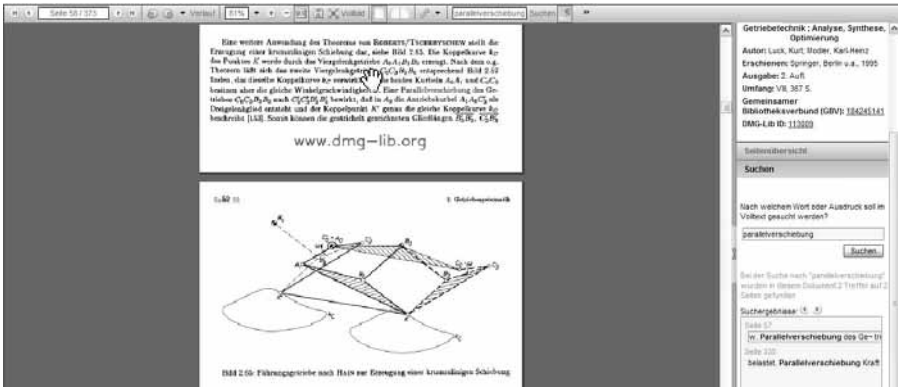


Bild 7: Volltextsuchergebnis zur Synthese eines Parallelführungsgetriebes

Literatur

[1] N.N.: *DMG-Lib: Startseite + Aktuelles.* 9 Aug 2008 <http://www.dmg-lib.org >.

[2] Borgman, C. Proceedings of the Fourth DELOS Workshop Evaluation of Digital Libraries: *Testbeds, Measurements, and Metrics.* Budapest, Hungary, June 6-7, 2002. http://www. sztaki.hu/conferences/ deval/presentations.html (2006-20-06), 2002.

[3] Mayhew, D. J.: The Usability Engineering Lifecycle – A Practitioner's Handbook for User Interface Design. San Francisco:Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999.

[4] Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band I: Konstruktionslehre.*; 2. Aufl.; Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag (1994)

[5] Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag (1977)

[6] Dittrich, G.: Systematik der Bewegungsaufgaben und grundsätzliche Lösungsmöglichkeiten. VDI-Bericht Nr. 576, S. 1/20; Düsseldorf: VDI-Verlag 1985

[7] Döring, U.; Brix, T.; Reeßing, M.: *Application of Computational Kinematics in the Digital Mechanism and Gear Library DMG-Lib.* Special issue on CK2005, International Workshop on Computational Kinematics. Mechanism and Machine Theory, 41(8):1003–1015, August 2006.

[8] Reuleaux, F.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau.* Braunschweig: Vieweg (1854)

[9] Niemeyer, J.: Methodische Entwicklung von Prinziplösungen bei der Auslegung ungleichmäßig übersetzender Getriebe unter Verwendung eines praxisorientierten interaktiven Wissensspeichers. Aachen: Shaker (2003), ISBN 3-8322-1518-2

[10] Corves, B.; Brix, T.; Henkel, V., Höhne,G.; Kloppenburg, J.: Sammlung, Aufbereitung und Vernetzung von getriebetechnischem Expertenwissen in der digitalen Mechanismen-/ und Getriebebibliothek („DMG-Lib"). In: 50. IWK – Tagungsunterlagen. Illmenau: 2005

Methode zum Generieren und Archivieren von Zuverlässigkeitsdaten aus unvollständig dokumentierten Produktdaten

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar, University of Technology, Business and Design
FB Maschinenbau / Verfahrens- und Umwelttechnik
Philipp-Müller-Str. 14, PF 1210, 23952 Wismar
Email: henrik.schnegas@hs-wismar.de

Inhalt: *Seit Jahrtausenden haben Ingenieure das gleiche Problem. Ingenieure dokumentieren und archivieren ihre Projekte, weil sie in der Zukunft das so angesammelte Wissen wieder verwenden möchten. Im Laufe der Zeit wurde so in der Vergangenheit viel Papier angehäuft und in der Zukunft Unmengen von digitalisierten Daten. Aber nach nur sehr kurzer Zeit waren bzw. sind damals wie heute viele Daten nicht mehr verwendbar, weil zum Beispiel neue Speichermedien in der Computerwelt Einzug gehalten haben. Große Datenmengen gehen so in immer kürzeren Zeitabständen verloren und stehen somit nicht mehr für eine nachhaltige Produktentwicklung zur Verfügung. Das Rad muss sehr oft ein zweites Mal erfunden werden. Die aktuelle Frage ist, wie notwendige Daten für längere Zeit gespeichert werden können. Im vorliegenden Beitrag werden zwei Methoden dargestellt, wie Daten in Datenbanken gesammelt werden können. Das erste Beispiel beschäftigt sich mit Hydraulischen Systemen und das zweite mit dem zuverlässigkeitsbasierten Konstruieren. Im Abschluss wird eine Methode dargelegt, wie aus unvollständig dokumentierten Versuchsdaten zuverlässigkeitsrelevante Daten generiert werden können, die dann in einer sehr einfachen Datenbank verwaltet werden.*

Abstract: *Since thousands of years engineers have the same problem. Engineers like to store their documents of their projects, because they are thinking, they can use the documents in other projects. After a short time the stored a lot of paper in the past or they store a lot of digital mediums in the present. But after a short time they can't find the documents, because any documents were destroyed or they can't read the old digital documents, because there is a new technology of computers. The main question is, how can we store knowledge for a long time and what kind of data bank we need? In the talk you can find two methods to generate knowledge for or from data banks. The first example is for systems of hydrailics - the second example is for the reliability centered design. In the last chapter you can read about analysis of uncomplete reliability documents of old research documents.*

Stichwörter: *Konstruktionsmethodik, Produktdatenmanagement, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Datenbanken*

Keywords: *Methods of Design, Productdatamanagement, knowledge from data banks, reliability, safety*

1 Datenverlust ein Fluch der Zeit

Seit Jahrtausenden haben Ingenieure das gleiche Problem. Damit bei einem Projekt erworbenes Wissen auch für Folgeprojekte zur Verfügung steht, werden Vorgehensweisen, Berechnungsalgorithmen, Zeichnungen und gewonnene Erfahrungen dokumentiert und archiviert. Das angestrebte Hauptziel dieser Tätigkeit ist die Reduzierung von Aufwand und Zeit bei nachfolgenden Projekten. In der Gegenwart erfolgt die Datensicherung und Archivierung naturgemäß in digitalisierten Datenbanken unmittelbar im Computersystem. Zwecks Absicherung im Fall des Ausfalls eines Systems und mit dem Ziel der Platzschaffung auf dem eigenen PC wird ebenfalls eine Sicherungskopie auf Datenträgern angelegt. Während in der unmittelbaren Folgezeit dieses Konzept unbestritten Vorteile bringt, wird es bei naturgemäß mangelnder Pflege der Datenbank nach oft nur wenigen Jahren zum Fluch – und zwar genau dann, wenn in der Folgezeit neue Mitarbeiter ein System übernehmen, neue Computer angeschafft werden und besonders, wenn sich die Rechen- und Speichertechnik qualitativ weiterentwickelt. Während die klassische Papierform seit Jahrhunderten geduldig das niedergeschriebene Wissen bewahrt, sind im Zeitalter der Rechentechnik Datenverluste durch die sich rasant verändernde Technik vorprogrammiert. Während in Bild 1 einige Dokumente einer „papiernernen Datenbank“ aus dem Jahre 1826 dargestellt sind, in der der Wissensstand des Schiffbaus in Mittel-, West- und Nordeuropa des 18. Jahrhunderts zusammengefasst, dokumentiert und auch nach 182 Jahren noch lesbar ist, stellt die Bild 2 einige Datenspeicher der Neuzeit dar, die bedeutend höheres Wissen enthalten, aber nun bereits nach nicht einmal 5 bis 20 Jahren ihr Wissen infolge veralterter Technik für sich behalten.

Bild 1: Archivierte Daten von 1826

Bild 2: Archivierte Daten von 1988 - 2008

Wir sehen eine 8 Zoll Diskette von 1988, daneben eine 5 ¼ Zoll von 1989 und 3,5 Zoll Diskette von 1991. Gemeinsam ist diesen Medien, dass sie mit aktueller PC-Technik nicht mehr gelesen werden können. Augenscheinlich unproblematisch zeigen sich daneben die CD und DVD. Aus eigenem Erleben beunruhigt die Tatsache, dass 10 Jahre alte CDs ihre Beschichtung verlieren und ebenfalls nicht mehr lesbar sind. Das Nicht-lesen-können ist für den Standardanwender der Normalfall, wenn nicht rechtzeitig das digitalisierte Wissen auf die neue Technik umgestellt wird. Ein weiteres Problem stellt die Menge der Daten dar. Gemäß einer wissenschaftlichen Studie verdoppelt sich alle 10 Jahre das Wissen der Menschheit, was mit einer immensen Anhäufung von Daten auch im eigenen Umfeld verbunden ist. In Bild 3 ist eine typische Archivierungssituation dargestellt. Trotz regelmäßiger Speicherung und Anpassung an neuste Speichertechnologien häuft sich in sehr kurzer Zeit Datenmaterial an, welches neben der täglichen Arbeit kaum noch zu handhaben und zu verwalten ist.

Bild 3: Archivierte Daten von einem Jahr

Fazit ist, dass angesammelte Daten nach einer immer kürzeren Zeit verloren gehen, was dem Ziel der nachhaltigen Produktentwicklung auf der Basis gesammelten Wissens entgegensteht. Es bleibt die Frage nach dem Aussehen einer Datenbank, die für längere Zeit nutzbar ist und durch den Anwender mit wenig Aufwand gepflegt werden kann.

2 Anwendbares Produktdatenmanagement

In Bezug auf die Handhabung einer notwendigen Produktdatenverwaltung sollen im folgenden Kapitel zwei Beispiele einer einfachen Datenarbeit vorgestellt werden. Im ersten Beispiel wird für die Projektierung und Konstruktion von Hydraulischen Anlagen eine

Methodik vorgestellt, mit der häufiges hydraulisches Wissen auf einfache Weise genutzt werden kann. Im zweiten Beispiel steht die Zuverlässigkeitsbasierte Produktgestaltung (RCD) im Vordergrund, die mit der seit 2004 gültigen Maschinensicherheitsnorm DIN EN ISO 12100 korrespondiert und verstärkt auf umfangreiches Betriebsfestigkeitswissen zurückliegender Epochen zurückgreifen muss. Unabhängig vom Produkt muss eine Datenbank folgende Kriterien erfüllen:

- Einfach(st)e zeitlose Struktur
- einfache Wartungs- und Pflegemöglichkeit
- leichte Übertragbarkeit in andere Formate

2.1 Produktdatenmanagement für Hydraulische Anlagen

Seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts hat sich die Fluidtechnik in vielen Bereichen der Industrie etabliert. Betrachten wir die Industriehydraulik und dabei die Stationär- und Mobilhydraulik, so sehen wir im ersten Moment eine kaum überschaubare Produktvielfalt. Als Beispiel sind in der Bild 4 ein hydraulisches Baggersystem und in Bild 5 schematisch ein Handhabungssystem dargestellt.

Bild 4: Hydraulikbagger

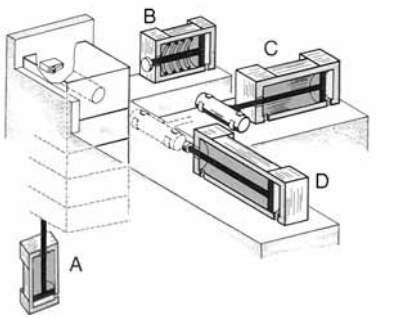


Bild 5: Handhabungssystem

Während im ersten Moment beide Anlagen als grundverschieden erscheinen, stellen wir bei einer genaueren Analyse fest, dass beide Systeme ein und die selben Komponenten enthalten, die sich lediglich in den geometrischen Abmessungen und den charakteristischen Leistungsgrößen unterscheiden. Betrachten wir ein notwendiges System für nur einen Hydraulikzylinder, dann könnte für dieses reduzierte System für

beide Anwendungen der Schaltplan nach Bild 6 genutzt werden. Zum tragen kommt der Vorteil hydraulischer Systeme, wonach ein und dasselbe Bauteil für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden kann. Die Lage vieler Bauteile ist dabei unbedeutend. Die symbolische genormte Darstellung nach DIN ISO 1219 unterstützt diesen Gedanken ebenfalls. Ob Bagger oder Zuführsystem, beide Systeme benötigen einen Hydrauliktank, eine Pumpe, die Übertragungselemente einschließlich Steuer- und Regelarmaturen und den Aktor, in unserem Fall den Hydraulikzylinder. Wie bei diesen beiden Beispielen ist dieser Grundschaltplan auch für viele andere Produkte übertragbar, die als Wirkelement einen Hydraulikzylinder benötigen. Mit Blick auf eine einfache Datenbank reicht alleine für unsere zwei Beispiele ein Schaltplan aus, der lediglich um die konkreten Leistungsdaten ergänzt werden muss. Wird in anderen Anwendungen kein Hydraulikzylinder, sondern ein Hydraulikmotor benötigt, dann ist der Zylinder lediglich durch den Motor zu ergänzen alle anderen Bauteile bleiben bestehen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für hydraulische Anlagen nur ein begrenzter Komponenten- und damit Symbolumfang zur Anwendung kommt, womit eine gute Basis für ein einfaches Datenbanksystem gegeben ist.

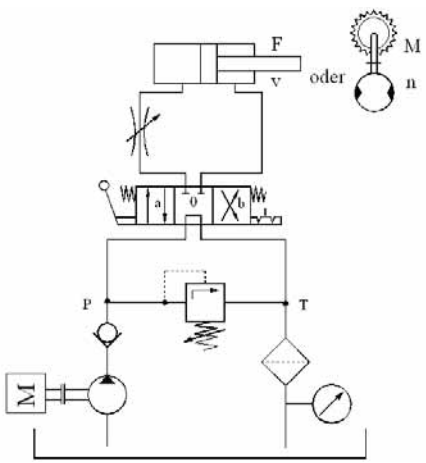


Bild 6: Hydraulikgrundschaltplan für die meisten Anwendungen

Mit Hilfe dieses Reduzierungsgedankens kann nun eine Methodik entwickelt werden, die den oben genannten Sachverhalt berücksichtigt und auf eine auf das Notwendigste

beschränkte Datenbank zurückgreift. Wird die allgemeine Methodik zum Konzipieren und Entwickeln technischer Produkte nach VDI 2221 in den vier Grundphasen Planung, Konzipierung, Entwurf und Ausarbeitung beibehalten, dann kann für die Entwicklung hydraulischer Systeme die methodische Vorgehensweise nach Bild 7 genutzt werden.

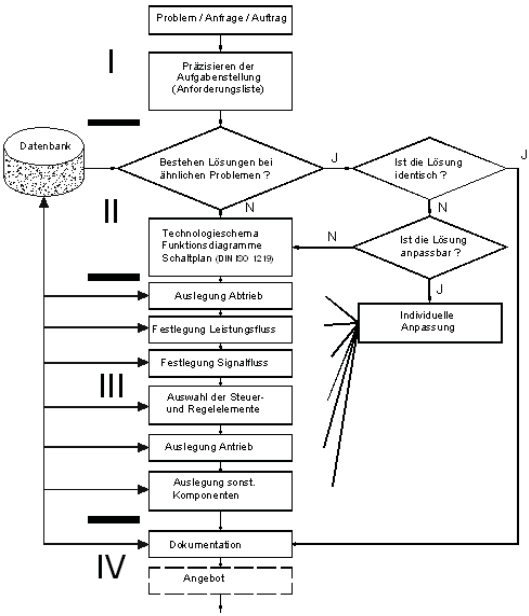


Bild 7: Methodik zum Entwickeln fluidtechnischer Systeme

Die Methodik beginnt nach der Planungsphase und der mit der ersten Phase verbundenen Anforderungsliste. Wie in der Bild 6 zu erkennen ist, wird bei der Konzipierung zunächst die Frage nach dem Vorliegen einer ähnlichen Lösung gestellt. Haben wir zum Beispiel ein Baggersystem (z.B. 5 Hydraulikzylinder für das Löffelarmsystem) entworfen, dann wird es als System mit linearen Zylinderantrieben abstrahiert. Nach der ersten Arbeit wird das erstellte System mit dem abstrahierten Charakter in einer Datenbank gespeichert. Neben dem Hydraulikschaltplan sollte ein weiteres Datenblatt mit den konkreten Leistungsdaten z.B. Zylindergeometrie, Betriebskräfte, Betriebsdrücke, Volumenströme,… gespeichert werden. Soll nun in einem weiteren Projekt ein Handhabungssystem entwickelt werden, finden wir auch hier in

einfacher Abstraktion das lineare Zylindersystem. Lediglich die Leistungsparameter und vielleicht die genaue Anzahl der Aktoren ist unterschiedlich und muss angepasst werden.

Nachdem die Aktoren, die Übertragungselemente, die Steuer- und Regelelemente und die sonstigen Elemente angepasst wurden, sollte die Notwendigkeit eines Abgleichs mit der Datenbank überprüft werden. Da das Grundschema identisch ist, reicht in unserem Beispiel lediglich das Anlegen eines Datenblattes mit den erwähnten Leistungsdaten. Ein weiteres „Aufblähen“ der bestehenden Datenbank ist somit nicht erforderlich. Die Datenbank bleibt einfach und übersichtlich. Werden für andere Projekte etwa Hydraulikmotoren benötigt, kann auch hier die gleiche Schaltstruktur verwendet werden. Lediglich der Hydraulikzylinder ist durch einen Motor zu ersetzen. Als Empfehlung gilt an dieser Stelle das Simulationssystem FluidSIM von FESTO, mit dem Schaltpläne erstellt, gespeichert und bei Bedarf angepasst werden können. Ein und dieselbe Datei aus der Datenbank kann für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle genutzt werden.

2.2 Management von Zuverlässigkeitsdaten

Seit April 2004 ist mit der DIN EN ISO 12100 eine Richtlinie für die Sicherheit von Maschinen gültig. Gemäß Vorschrift ist die Sicherheit einer Maschine gegeben, wenn das von der Maschine ausgehende Restrisiko kleiner ist als das Grenzrisiko. Das Risiko ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Produkt seine Aufgaben ohne Ausfall bzw. Funktionsminderung, also zuverlässig erfüllt. Die Zuverlässigkeit eines Produktes und seiner Elemente kann traditionell mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitslehre beschrieben werden. Die Zuverlässigkeit ist gleichbedeutend mit der Überlebenswahrscheinlichkeit eines Produktes bzw. Elementes. Die eigentliche Zuverlässigkeit eines Produktes kann in der Mehrzahl der Fälle erst festgestellt werden, wenn das Produkt produziert und getestet wurde. Zukünftig soll eine konkrete Zuverlässigkeit in ein Produkt hineinkonstruiert werden, wozu eine spezielle Methodik erforderlich ist und Datenbanken mit Zuverlässigkeitsdaten zur Verfügung stehen müssen. Da Datenbanken derzeit in einem noch nicht ausreichenden Maße frei verfügbar sind, müssen in den nächsten Jahren entsprechende Datenbanken bereitgestellt werden. Zurückgreifen muss man auf Betriebsfestigkeitsuntersuchungen, die seit den 60er Jahren durchgeführt worden sind. Da im Rahmen der Betriebsfestigkeit nur vergleichende Untersuchungen von Bedeutung sind, liegen in der Mehrheit keine statistischen Daten vor, die für eine Beschreibung der Zuverlässigkeit aber

notwendig wären. Bevor wir zu einem Verfahren kommen, mit dem aus statistisch unkommentierten Betriebsfestigkeitsuntersuchungen erforderliche Zuverlässigkeitskenndaten generiert werden können, soll mit Bild 8 zunächst die Methodik für das Zuverlässigkeitsmanagement und deren Zusammenwirken mit Datenbanken vorgestellt werden.

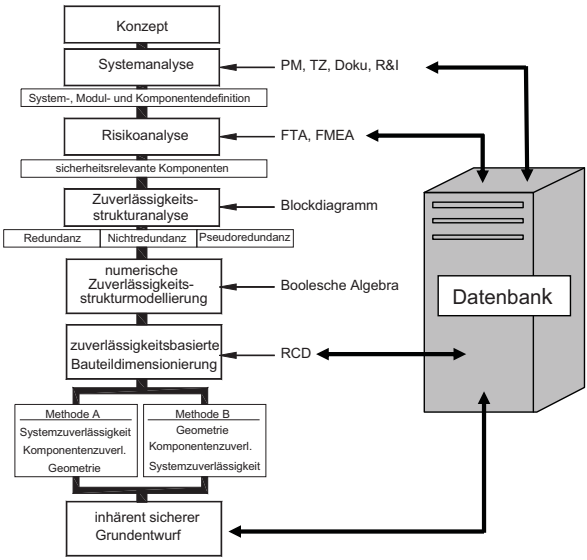


Bild 8: Methodik für das Reliability Centered Design (RCD)

Ziel der Methodik ist eine zuverlässige und damit sichere Konstruktion. Ausgangspunkt ist die Analyse der sicherheits- und zuverlässigkeitsrelevanten Komponenten, die z.B. bereits in der Funktionsstruktur während der Konzeptphase erkennbar werden. Für die Analyse stehen Qualitätswerkzeuge wie die Fehlerbaumanalyse (FTA) bzw. die Fehlermöglichkeits- und –auswirkungsanalyse (FMEA) zur Verfügung. Die Rechentechnik mit Datenbanken über bereits bestehende Analysen häufig verwendeter Komponenten kann sehr hilfreich sein. Von besonderer Bedeutung ist das eigentliche Reliability Centered Design, wobei geforderte Lebensdauern und Beanspruchbarkeiten als Funktion der Zuverlässigkeit bereitgestellt und in die allgemeine Dimensionierung integriert wird.

3 Methode zum Erfassen unvollständiger Zuverlässigkeitsdaten

Wie im Vorfeld bereits erörtert, ist die Bereitstellung von Zuverlässigkeitsdaten auf Grund fehlender Daten derzeit recht schwierig. Was seit mehr als 48 Jahren bei Betriebsfestigkeitsuntersuchungen erforscht wurde, steht für die Nutzung in einer Zuverlässigkeitsdatenbank ohne weitere Bearbeitung i. d. R. nicht zur Verfügung. Für die Schaffung einer einfachen Datenbank müssen oft umfangreiche Dokumente (siehe Bild 9) gesichtet und neu ausgewertet werden. Bild 10 zeigt beispielhaft das Datenblatt eines Wöhlerversuches, das im Folgenden für die Zuverlässigkeitsarbeit aufbereitet werden soll.

Bild 9: Versuchsunterlagen

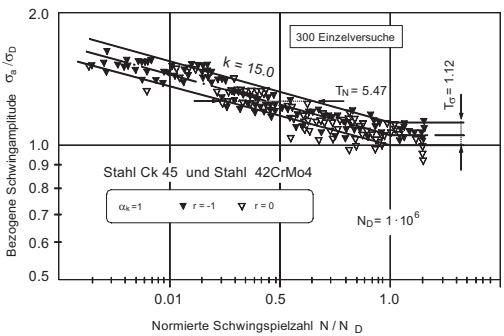


Bild 10: Beispiel für Betriebsfestigkeitsversuchsergebnis

Um die Zuverlässigkeit einer Komponente zu beschreiben, sind wahrscheinlichkeitstheoretische Gleichungen erforderlich, die auf den Daten von Betriebsfestigkeitsuntersuchungen basieren. Die am häufigsten verwendeten Zuverlässigkeitsgleichungen sind die Gleichungen nach Gauß (1) und Weibull (2).

$$R(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \qquad (1) \qquad R(x) = e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^{\beta}} \qquad (2)$$

Was benötigt wird sind die Parameter μ, σ bzw. ß und T, die bei Betriebsfestigkeitsuntersuchungen leider nicht ermittelt bzw. nicht dokumentiert werden und somit aus den Diagrammen (z.B. Bild 10) erneut ermittelt werden müssen. Ähnlich der Arbeit bei der statistischen Tolerierung wird zunächst ein Streuband definiert. Das linke Band wird einem R = 0,9 und das rechte Band einem R = 0,1 zugeordnet. Für einen speziellen Beanspru-

chungshorizont kann nun eine Streuspanne Tx der Lebensdauern ermittelt und danach alle weiteren Kenngrößen je nach Anwendungsfall gemäß Tabelle 1 berechnet werden.

Tabelle 1: Bestimmung von Zuverlässigkeitsparametern

Berechnung von ...	aus ...	mit ...
Formparameter **β**	T_x, $x_{0.1}$, $x_{0,9}$	$\beta \approx \frac{3.084}{\ln T_x} = \frac{3.084}{\ln x_{0.1} - \ln x_{0,9}}$
charakt. Lebensdauer **T**	β, $x_{0,9}$	$T \approx \sqrt[\beta]{9.491} \cdot x_{0,9}$
Median $\mathbf{x_m}$ (Mittelwert μ)	ß, $x_{0,9}$	$x_m \approx \sqrt[\beta]{6.579} \cdot x_{0,9}$
$\mu - \sigma$	ß, $x_{0,9}$	$\mu - \sigma \approx \sqrt[\beta]{1{,}6401} \cdot x_{0,9}$
$\mu + \sigma$	ß, $x_{0,9}$	$\mu + \sigma \approx \sqrt[\beta]{17{,}47} \cdot x_{0,9}$

Zusammen mit den allgemeinen Angaben zu den Dauerfestigkeitswerten entsteht so ein sehr einfaches System für das Generieren von Zuverlässigkeitsdaten, die dann bei der Zuverlässigkeitsgestaltung genutzt werden können. Eine übersichtliche Datenbank, die Erkenntnisse aus 28 Jahren Betriebsfestigkeit enthält, ist in Bild 11 dargestellt. Diese Datenbank entspricht allen Kriterien, die wir gemäß Kapitel 2 gefordert haben.

Element	**Beanspruchbarkeit** B_H	**Grenzlebensdauer** x_H	R_H	a	b	Tx	ß
Wälzlager	- Tragzahl $C_{d/n}$	10^6 Umdrehungen	**90 %**	Kugel 3 Rolle 3,3	a = b	7,8 … 13,7	1,5 … 1,18
Zahnräder	- Flankenpressung σ_{Hlim} - Zahnbiegung σ_{Flim}	$5 \cdot 10^7$ Lastwechsel $3 \cdot 10^6$ Lastwechsel	**99 %**	Zahnflanke 3 … 8 Fuß/Evolvente 6 … 12	a = b ∞ bzw. 2a-1	8 … 10 4 … 8	1,48 … 1,34 2,22 … 1,48
Wellen	Wechselfestigkeit σ_w	10^7 Lastwechsel	**97,5 %**	*Ungekerbte Stäbe* 12 … 15	∞ bzw. 2a-1	5 … 8	1,92 … 1,48
Stahlbau	- Längsspannungen: Dauerfestigkeit σ_D Schwellenwert σ_L - Schubspannungen: Schwellenwert σ_L - Bezugswert (Kerbfall)	$5 \cdot 10^6$ Lastwechsel 10^8 Lastwechsel 10^8 Lastwechsel $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel	**95 %**	*Gekerbte Bauteile* - Spitzkerben 3 … 4 - Normalkerben 5 … 7 - Flachkerben 6 … 8		1,2 … 1,4 3 … 5 6 … 8	16,9 … 9,17 2,81 … 1,92 1,72 … 1,48
Schweißverbindungen	identisch mit Stahlbau jedoch ohne σ_L	$5 \cdot 10^6$ Lastwechsel	**97,5 %**	4 … 8		15 … 25	1,14 … 0,96
Linearführungen	- Tragzahl $C_{d/n}$	50 km (Kugel) 100 km (Rolle)	**90%**	Kugel 3 Rolle 3,3	a = b	-	-
Rohrleitungen	- Berechnungsbeiwert B	$2 \cdot 10^6$ Druckzyklen	**50%**	geschweißt 3 nahtlos 3,3	∞ bzw. 2a-1	-	-
Ventilsitze	-	-	-	3 … 5	a = b	7 … 15	1,58 … 1,14
Brems- und Kupplungsbeläge	-	-	-	1 … 2,5	a = b	3 … 8	2,81 … 1,48

Bild 11: Datenbank für die Zuverlässigkeitsarbeit

Literatur

[1] Schlottmann, D., Schnegas, H.: Auslegung von Konstruktionselementen, Springer-Verlag, 2005
[2] Schnegas, H.: Zuverlässigkeit technischer Systeme, WINGS, 2008

Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese und Auslegung von Konstruktionslösungen

Markus Deimel

Polysius AG – A Company of ThyssenKrupp Technologies
Graf-Galen-Str. 17, D-59269 Beckum
Email: markus.deimel@thyssenkrupp.com; Internet: http://www.polysius.de

Inhalt: *Durch den Einsatz von Ähnlichkeitskennzahlen lässt sich in konstruktiven Lösungsdarstellungen die Anzahl von Konstruktionsparametern reduzieren und die Lösungsfindung vereinfachen. Es wird eine Graphen unterstützte Kennzahlen-Algebra zur Synthese und Variation von Lösungen präsentiert. Außerdem wird das Aufstellen und Anwenden von Ähnlichkeitskennzahlen zur Auslegung und Optimierung behandelt.*

Abstract: *The usage of similarity ratios reduces the number of design parameters in solution representations and simplifies the finding of suitable solutions. The author presents a graph based ratio algebra for the synthesis and variation of solutions. Besides, the establishment and application of similarity ratios for the dimensioning and optimization is described in detail.*

Stichwörter: *Ähnlichkeitskennzahlen, Kennzahlen-Algebra, Lösungssynthese, Auslegung*

Keywords: *similarity ratios, ratio algebra, synthesis of solutions, dimensioning*

1 Einleitung

Komplexe Strukturen lassen sich systematisch durch eine Verknüpfung von Teillösungen erzeugen, die geforderte Teilaufgaben der Struktur erfüllen [1, 2]. Das bekannteste Hilfsmittel zur Verknüpfung ist der Morphologische Kasten [3], der die einzelnen Teillösungen in Abhängigkeit der Teilaufgaben strukturiert, jedoch keine formalen Verknüpfungsbedingungen bereitstellt, aufgrund derer eine algorithmische Verknüpfung durchführbar ist. Es existieren in der Literatur eine Vielzahl von methodischen Ansätzen, die die Verknüpfung - vorzugsweise auf Basis von Graphen [4] - stärker formalisieren. Hervorzuheben ist der Ansatz von Koller [5] bezüglich einer allgemein anwendbaren Schaltalgebra, der sog. „Konzeptalgebra“. Hierzu sind keine formal logischen Untersuchungen bekannt. Der Autor hat eine universell einsetzbare, Graphen unterstützte Kennzahlen-Algebra entwickelt, mit der eine algorithmische Verknüpfung von Teillösungen mit Hilfe von Kennzahlen-Topologie-Graphen zu komplexeren Strukturen durchführbar ist [6]. Die Graphen enthalten

Ähnlichkeitskennzahlen [6, 7, 8] zur quantifizierbaren Beschreibung der Lösungseigenschaften und basieren auf der Topologie von Baustrukturelementen, wie Einzelteile und Wirkflächen, und deren Verbindungen, z.B. kraft-, form- oder stoffschlüssige. Aus einem Graphen lassen sich Teilgraphen abspalten und auch Teilgraphen miteinander verknüpfen. Die Gesamtgraphen lassen sich algebraisch auswerten und für eine erste Auslegung nutzen. Außerdem eignen sich die Graphen zur systematischen Variation von Konstruktionslösungen.

2 Kennzahlen-Algebra zur konstruktiven Lösungssynthese

Es wird anhand eines Fallbeispiels gezeigt, wie auf Grundlage eines geforderten funktionellen Zusammenhangs mit Hilfe der Graphendarstellung Teillösungen zu einer Prinzipiellen Lösung verknüpft und ausgewertet werden können. Die Elemente und Operationen der Kennzahlen-Algebra sind ausführlich in [6] beschrieben. Als Beispiel dient die Konzipierung einer elektrisch zu betätigenden Kupplung (Bild 1). Beispielhaft wird zunächst ein Elektromagnet zur Realisierung der elektromechanischen Energiewandlung ausgewählt.

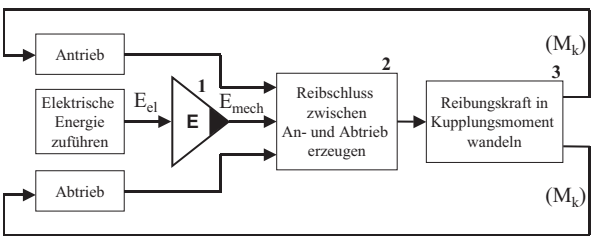


Bild 1: Funktionsstruktur für eine elektrisch zu betätigende Kupplung

Um die Kupplung in Abhängigkeit der Parameter von An- und Abtriebsmaschine auslegen zu können, ist es wichtig, den Synchronisierungszeitpunkt t_s zu betrachten. Es gilt mit $M_i \neq M_i(\omega)$, $\forall i = \{1,2\}$, $\Delta\omega = \omega_1(t = 0) - \omega_2(t = 0)$ und $\Delta t = t_0 - t_s$ für die entsprechende Kennzahlen basierte Lösung der Differenzialgleichungen mit der Randbedingung $\omega_1 = \omega_2$:

$$\pi_{MA} + \pi_{MA1} + \pi_{MA2} = 1 \qquad (1)$$

$$\pi_{MA} = \frac{M_k \cdot \Delta t}{\Delta\omega \cdot \theta^*},\ \pi_{MA1} = \frac{-M_1 \cdot \Delta t}{\Delta\omega \cdot \theta_1},\ \pi_{MA2} = \frac{-M_2 \cdot \Delta t}{\Delta\omega \cdot \theta_2},\ \theta^* = \frac{\theta_1 \cdot \theta_2}{\theta_1 + \theta_2}$$

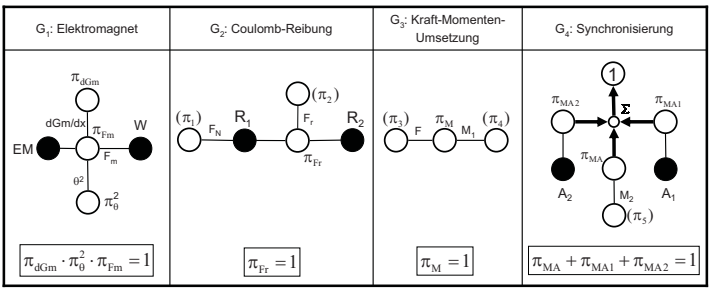


Bild 2: Graphen von Teillösungen für die Synthese einer Kupplungs-Variante, $R_{1,2}$ = Reibflächen, A_1 = Antrieb, A_2 = Abtrieb, EM = Elektromagnet, W = Wirkfläche

$$\pi_{dGm} = -\frac{\mu_0 \cdot A}{dG_m / dx \cdot \Delta x^2} = 1,\ \pi_\theta = \frac{I \cdot w}{\theta} = 1,\ \pi_{Fm} = -\frac{\theta^2 \cdot dGm / dx}{2 \cdot F_m} = 1,\ \pi_{Fr} = \frac{F_N \cdot \mu}{F_r},\ \pi_M = \frac{F_r \cdot d_m}{2 \cdot M}$$

G_m: magnetischer Widerstand, Δx: Spaltweite, μ_0: magnetische Feldkonstante, A: vom Magnetfluss durchflutete Fläche, θ: magnetische Durchflutung, I: elektrischer Strom, w: Windungszahl, F_m: Magnetkraft, F_r: Reibungskraft, F_N: Normalkraft, M: Drehmoment, d_m: mittlerer Durchmesser, i: Anzahl der Reibflächen, μ: Haftreibungskoeffizient

Die vier Lösungskomplexe G_1 bis G_4 (Bild 2) sind gemäß der Funktionsstruktur in Bild 1 seriell zu einer Gesamtlösung G_{K1} (Bild 3) zu verknüpfen. Wertet man den aggregierten Graphen G_{K1} gemäß den geltenden Rechenregeln [6] aus, so lässt sich eine Kennwert-Gleichung zur quantitativen Beurteilung der elektromagnetisch betätigten Kupplung (Gleichung 2) erzeugen:

$$\pi_\theta^2 \cdot \pi_{dGm} \cdot \pi_{Fm} \cdot \pi_{Fr} \cdot \pi_M \cdot \pi_{MA} = 1 - \pi_{MA1} - \pi_{MA2} \qquad (2)$$

Die vier Teilgraphen enthalten die Baustrukturelemente, die zur Erfüllung der jeweiligen Teilfunktionen notwendig sind. Ausgehend von diesen Elementen lassen sich durch systematische Variationsoperationen neue Gestaltvarianten für die Gesamtlösung finden, indem z.B. zwei Elemente zu einem vereinigt werden oder ein Element durch zwei ersetzt wird. Außerdem lassen sich aus dem aggregierten Graphen G_{K1} durch einfache

Graphenoperationen Prinzipvarianten (Bild 6) ableiten, z.B. eine Piezo- oder Fliehkraftkupplung.

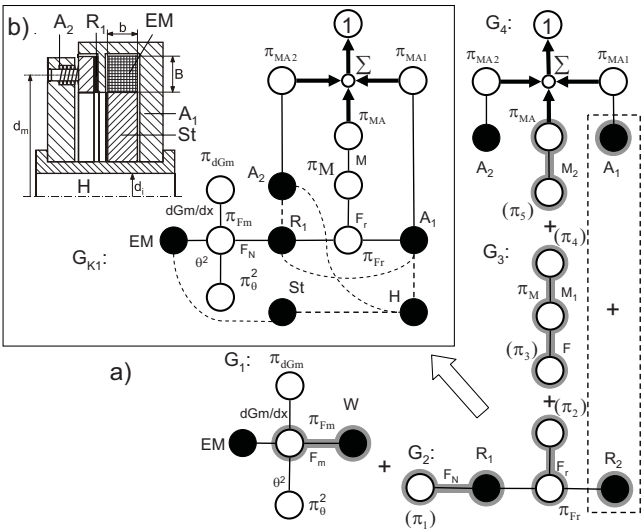


Bild 3: Aggregation von Teilgraphen zu einem Gesamt-Graphen, der die Topologie und Funktion einer elektromagnetisch betätigten Reibkupplung beschreibt

3 Konstruktives Auslegen mit Ähnlichkeitskennzahlen

Die durch die Lösungssynthese (siehe Abschnitt 2) hergeleiteten algebraischen Berechnungsgleichungen sind für eine erste überschlägige Berechnung verwendbar, jedoch zur konkreten Auslegung nur begrenzt geeignet, da die konkrete Geometrie abstrahiert wurde. Abstrakte oder für die Auslegung unpraktikable Konstruktionsgrößen, wie z.B. Flächen oder Windungszahlen bei Magneten, müssen konkretisiert und mit Hilfe geometrischer Beziehungen in Form konkreterer Konstruktionsgrößen, wie Detail-Abmessungen bzw. den Kupferfüllfaktor, ausgedrückt werden. Außerdem müssen für die Auslegung aufgabenspezifisch ungeeignete Funktionsgrößen über physikalische Beziehungen in geeignetere Funktionsgrößen überführt werden. Die Konkretisierung der Auslegungsbeziehungen lässt sich durch eine auslegungsorientierte Erweiterung der Kennzahlen-Topologie-Graphen vornehmen. Diese Erweiterung wird formal durch graphentheoretisches Heften mit entsprechenden Kennzahlen-Knoten vorgenommen. Es

lassen sich im konkreten Beispiel eines Elektromagneten - der als Aktor der in Bild 3 dargestellten elektromagnetischen Kupplung fungiert - Teilgraphen G_{Gm} und G_θ bilden, die alle Kennzahlen-Erweiterungen des Magneten zusammenfassen. Der Teilgraph G_{Gm} dient der Konkretisierung des magnetischen Widerstands der Magnetanordnung und der Teilgraph G_θ beschreibt die an die magnetische Durchflutung gekoppelten elektromechanischen und thermischen Effekte sowie relevante Geometriegrößen (Bild 4).

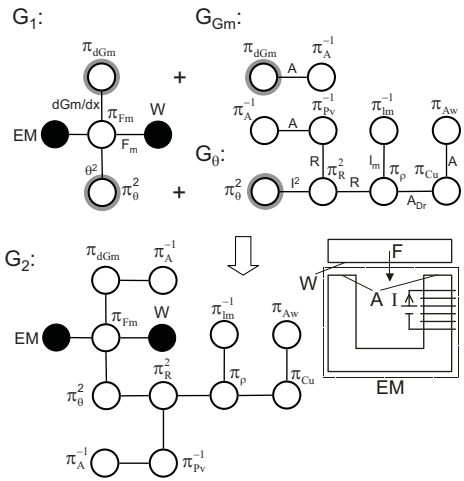


Bild 4: Erweiterung eines eine Teillösung repräsentierenden Graphen mit auslegungsspezifischen Kennzahlen durch Knotenheftungen (am Beispiel eines Elektromagneten)

$$\pi_{l_m} = \frac{\pi \cdot d_m}{l_m} = 1, \quad \pi_{Cu} = \frac{A \cdot k_{Cu}}{A_{Dr} \cdot w} = 1, \quad \pi_{Pv} = \frac{U^2}{R \cdot A \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta} = 1, \quad \pi_\rho = \frac{R \cdot A_{Dr}}{\rho_{el} \cdot l_m \cdot w} = 1, \quad \pi_{A_w} = \frac{b \cdot B}{A} = 1,$$

$$\pi_R = \frac{U}{R \cdot I} = 1, \ \pi_A = \frac{A}{\pi \cdot d_m \cdot B} = 1, \ \pi^*_{Fr} = \frac{F_N}{F_r}$$

θ: magnetische Durchflutung, G_m: magnetischer Widerstand, F_m: Magnetkraft, I: elektrische Stromstärke, R: ohmscher Widerstand, A: Wärmeübertragungsfläche, α_K: Wärmeübergangskoeffizient, $\Delta\theta$: Temperaturdifferenz zwischen Spuleninnerem und Umgebung, U: elektrische Spannung, ρ_{el}: spezifischer elektrischer Widerstand der Wicklung, w: Wicklungszahl, A_{Dr}: Wicklungsdrahtdurchmesser, k_{Cu}: Kupferfüllfaktor, b: Magnetlänge, B: Magnetbreite, l_m: mittlere Windungslänge, d_m: Reibungsdurchmesser, i: Anzahl der Reibflächen, μ: Haftreibungskoeffizient

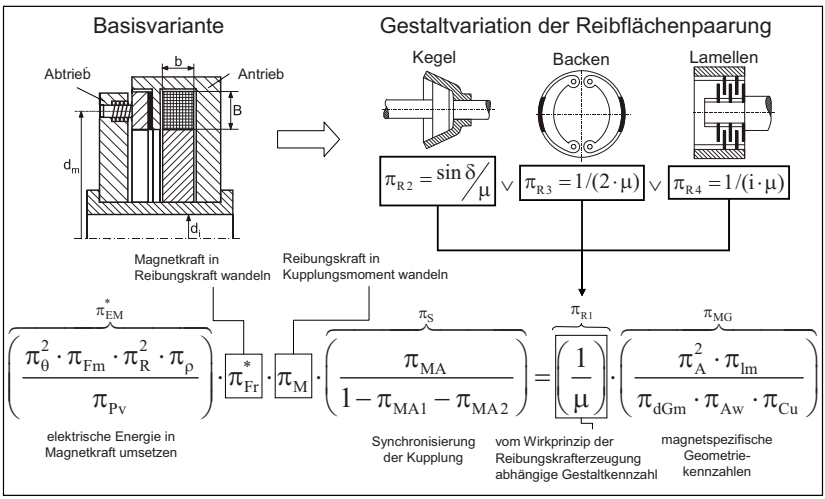


Bild 5: Aggregierte Kennzahlen-Gleichung einer elektromagnetisch betätigten Reibungskupplung und Kennzahlen unterstützte Variationen der Prinzipiellen Lösung

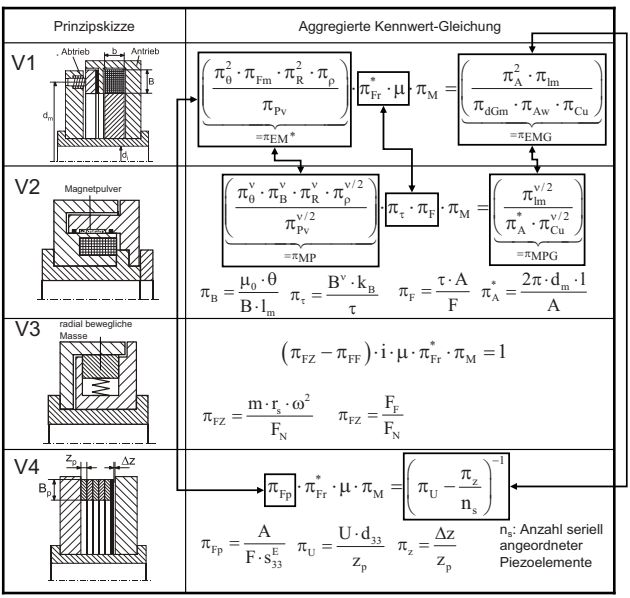


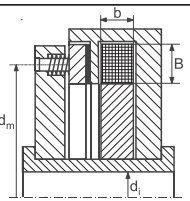
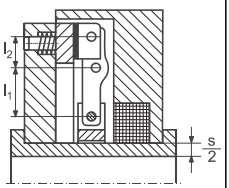
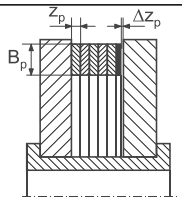
Bild 6: Systematische und Kennzahlen unterstützte Prinzipvariationen am Beispiel von schaltbaren Kupplungsvarianten

Verknüpft man den Graphen G_2 über den die Wirkfläche W repräsentierenden Baustrukturknoten mit den anderen Teilgraphen der Kupplung aus Bild 3, resultiert ein Auslegungsgraph für eine elektromagnetisch betätigte Reibungskupplung. Bild 5 zeigt die quantitative Auswertung des Gesamt-Graphen. Es werden vier Gestaltvarianten der Reibflächenpaarung mit den entsprechenden Komponenten des Kennzahlen-Vektors $\pi_R = \{\pi_{R1}, \pi_{R2}, \pi_{R3}, \pi_{R4}\}$ berücksichtigt.

4 Auslegungs-Beziehungen zur vergleichenden Beurteilung und Dimensionierung

Es lassen sich dimensionslose Auslegungsgleichungen aufbauen, die sich zur vergleichenden Beurteilung, Dimensionierung und Optimierung eignen. Sie setzen sich aus einer aufgabeninvarianten Kennzahl π_A und davon abhängigen n lösungsspezifischen Kennzahlen π_i zusammen. Die zur Auslegung benutzte Kennzahl π_A wird als sog. „Auslegungs-Kennung“ definiert [6]. Sie enthält die wesentlichen optimierbaren Anforderungsparameter sowie i.d.R. aufgabeninvariante Größen. Die Kennzahlen π_i bestehen aus Konstruktionsgrößen und aufgabeninvarianten Größen. Die Auslegungs-Kennung π_A wird so hergeleitet, dass ihr Wert mit zunehmender Lösungsgüte zunimmt und sich zur Beurteilung eignet. Anhand einer konkreten Aufgabenstellung soll ein mögliches Vorgehen zur Beurteilung und Dimensionierung der Kupplungen mit Hilfe der Auslegungs-Kennung verdeutlicht werden.

Tabelle 1: Prinzipskizzen von drei Kupplungsvarianten und die Kennzahlen-Gleichungen zur vergleichenden Beurteilung und Auslegung

Magnetkupplung (Variante 1)	Magnetkupplung mit Hebel (Variante 2)	Piezokupplung (Variante 3)
		
$\boxed{\pi_A = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\pi_1^3 \cdot \pi_2}{\pi_3^2}}$ $\pi_1 = \sqrt[3]{\frac{\mu_0 \cdot k_{Cu}}{\rho_{el} \cdot \Delta t \cdot L_{max}}} \cdot B,$ $\pi_2 = \frac{\alpha_k \cdot \Delta\vartheta \cdot L_{max} \cdot b \cdot \Delta t_{max}^3}{\theta^*},$ $\pi_3 = \frac{\Delta x}{L_{max}}$	$\boxed{\pi_A = \frac{\pi}{4} \cdot \boxed{\pi_L} \cdot \frac{\boxed{\pi_1^3} \cdot \pi_2}{\pi_3^2}}$ $\boxed{\pi_L} = \frac{d_m - d_i - s - \boxed{B}}{2 \cdot l_2} = 1$ Neben-bedingung $\pi_1 = \sqrt[3]{\frac{\mu_0 \cdot k_{Cu}}{\rho_{el} \cdot \Delta t \cdot L_{max}}} \cdot B,\ \pi_L = \frac{l_1}{l_2},$ $\pi_2 = \frac{\alpha_k \cdot \Delta\vartheta \cdot L_{max} \cdot b \cdot \Delta t_{max}^3}{\theta^*},$ $\pi_3 = \frac{\Delta x}{L_{max}}$	$\boxed{\pi_A = \frac{\pi}{2} \cdot \pi_4 \cdot \left(\pi_U - \frac{\pi_z}{n_s}\right)}$ $\pi_4 = \frac{L_{max}^2 \cdot B_p \cdot \Delta t_{max}^3}{\Delta t \cdot \theta^* \cdot s_{33}^E}$ $\pi_U = \frac{U \cdot d_{33}}{z_p},\quad \pi_z = \frac{\Delta z_p}{z_p}$

Die Herleitung der Auslegungs-Kennung wird exemplarisch am Beispiel der Magnetkupplung (Variante 1 in Tabelle 1) verdeutlicht. Das Vorgehen ist analog auf alle betrachteten Varianten anwendbar. Zur Herleitung der Auslegungs-Kennung wird die aggregierte Kennwert-Beziehung zur Beschreibung der Drehmomentübertragung aus Bild 5 herangezogen. Für die einzelnen Kennzahlen der Gleichung werden die dimensionsbehafteten Größen x_i eingesetzt. Die Gleichung wird so umgeformt, dass die durch Anforderungen festgelegten Größen M_1, M_2, θ_1, θ_2, $\Delta\omega$, Δt auf einer Gleichungsseite stehen:

$$\underbrace{\theta^* \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta t}{\Delta\omega}\right) \cdot \left(\frac{M_1}{\theta_1} + \frac{M_2}{\theta_2}\right)\right)}_{=M_k} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot k_{Cu} \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta \cdot d_m^2 \cdot b \cdot B^3}{\Delta x^2 \cdot \rho_{el}} \tag{3}$$

Der Ausdruck auf der linken Seite der Gleichung (3) entspricht dem zu maximierenden Kupplungsmoment M_k. Die Gleichung ist – wie oben gefordert – so

aufgebaut, dass der Wert der Gleichung mit zunehmender Lösungsgüte zunimmt. Da die Schaltzeit minimiert werden soll, wird die Gleichung (3) durch Δt dividiert. Damit die Gleichung dimensionsfrei wird, muss sie mit einem Term, der die Einheit „$(kg \cdot m^2/s^3)^{-1}$“ hat, multiplikativ erweitert werden. Zur Erweiterung wird der aufgabeninvariante Ausdruck ($\Delta t_{max}^3 / \theta^*$) benutzt. In der algebraischen Beschreibung der drei Varianten ist der Reibungskoeffizient μ enthalten. Weiterhin sollen die Lösungen für einen identischen maximalen Durchmesser $d_m = d_{max}$ ausgelegt werden. Gleichung (3) wird so umgeformt, dass die Größen μ und d_m auf der linken Gleichungsseite stehen. Der Parameter d_m wird durch den restriktiven Wert d_{max} ersetzt. Zur Entdimensionalisierung wird die Gleichung beidseitig mit $(L_{max})^2$ multipliziert. Die linke Seite von Gleichung (4) ist die Auslegungs-Kennung π_A.

$$\underbrace{\frac{L_{max}^2 \cdot \Delta\omega \cdot \Delta t_{max}^3}{\Delta t^2 \cdot \mu \cdot d_{max}^2} \cdot \left(1 + \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \left(\frac{M_1}{\theta_1} + \frac{M_2}{\theta_2}\right)\right)}_{=\pi_A} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\mu_0 \cdot k_{Cu} \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta \cdot b \cdot B^3 \cdot L_{max}^2 \cdot \Delta t_{max}^3}{\Delta x^2 \cdot \rho_{el} \cdot \Delta t \cdot \theta^*} \tag{4}$$

Die abhängigen Kennzahlen π_i werden so aufgebaut, dass Δx, b und B mit der ersten Potenz jeweils im Zähler einer Kennzahl enthalten sind. Um dimensionsfreie Gruppen von Größen zu erhalten, werden Δx, b und B mit geeigneten aufgabeninvarianten Größen multipliziert. Um die Anzahl der Kennzahlen auf drei zu beschränken, wurde der dimensionslose Kupferfüllfaktor k_{Cu} in die Kennzahl π_1 integriert:

$$\pi_1 = \sqrt[3]{\frac{\mu_0 \cdot k_{Cu}}{\rho_{el} \cdot \Delta t \cdot L_{max}}} \cdot B\,,\ \pi_2 = \frac{\alpha_K \cdot \Delta\vartheta \cdot L_{max} \cdot b \cdot \Delta t_{max}^3}{\theta^*} \text{ und } \pi_3 = \frac{\Delta x}{L_{max}} \tag{5}$$

Tabelle 1 zeigt Prinzipskizzen und die Auslegungs-Gleichungen von drei Kupplungs-Varianten und verdeutlicht, dass die drei Lösungen durch identische Auslegungs-Kennungen π_A beschrieben werden und gleiche Aufgaben erfüllen. Bild 7 visualisiert die vergleichende Auslegung der zwei Magnetkupplungsvarianten in Tabelle 1.

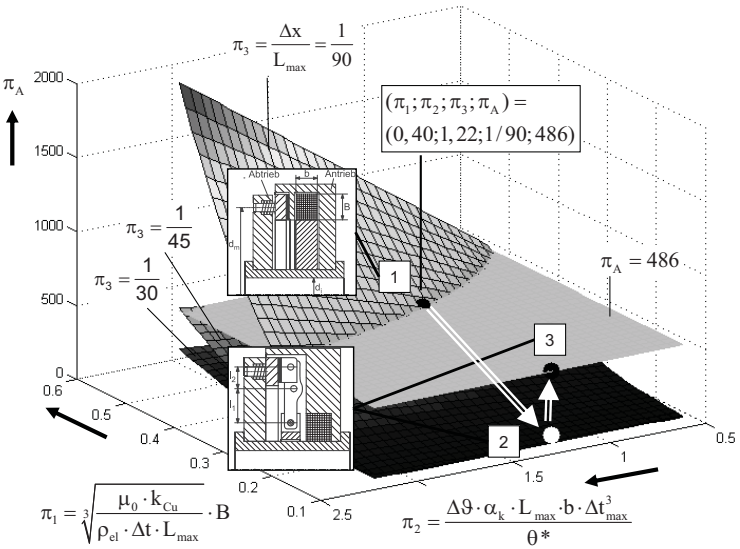


Bild 7: Darstellung von dimensionslosen Auslegungs-Funktionen zur quantitativen Beurteilung, Auslegung und Optimierung von Magnetkupplungsvarianten

Literatur

[1] Hansen, F.: *Konstruktionswissenschaft. Grundlagen und Methoden*. München: Carl Hanser, 1974.

[2] Franke, H.-J.: *Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses. Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 1, Nr. 47, zgl. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1976.

[3] Zwicky, F.: Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. München: Droemer/Knaur, 1966.

[4] Harary, F: *Graphentheorie*. München: Oldenbourg, 1974.

[5] Koller, R.: *Eine algorithmisch-physikalisch orientierte Konstruktionsmethodik. Teil 2: Qualitative Konstruktion; von der Effektvariation bis zur Darstellung der Prinziplösung*. In: VDI-Z Band 115 (1973), Nr. 4, S. 309-317.

[6] Deimel, M.*: Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese, Beurteilung und Optimierung von Konstruktionslösungen. Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 1, Nr. 398, zgl. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2007.

[7] Buckingham, E.: *On Physically Similar Systems: Illustration of the Use of Dimensional Equations*. In: Phys. Review, Vol. IV, No. 4, 1914, S. 346 – 376.

[8] Baker, W. E.; Westine, P. S.; Dodge, F. T.: *Similarity Methods in Engineering Dynamics. Theory and Practice of Scale Modeling*. New York: Elsevier, 1991.

Design for Variety – Ein Ansatz zur variantengerechten Produktstrukturierung

Thomas Kipp, Dieter Krause

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, TU Hamburg-Harburg
Denickestr. 17, D-21073 Hamburg
Email: kipp@tuhh.de; Internet: http://www.tuhh.de/pkt

Inhalt: *Bei der Entwicklung von Produktfamilien nimmt die Erzeugung geeigneter Produktstrukturen eine zentrale Rolle ein. In diesem Beitrag soll detailliert dargestellt werden, welchen speziellen Anforderungen die Struktur von Produktfamilien gerecht werden muss, welchen dieser Anforderungen bekannte Bauweisen wie beispielsweise Modulbauweise gerecht werden und auch welche Defizite weiterhin bestehen. Anschließend wird ein methodischer Ansatz zur Erzeugung von Produktfamilienstrukturen vorgestellt.*

Abstract: *An essential part of product family development is the design of appropriate product structures. This paper describes which special requirements a product family structure has to meet, which of these requirements are fulfilled by common product architecture concepts such as modular design and also which shortcomings still exists. Subsequently a methodical approach for the design of product family structures is presented.*

Stichwörter: *Variantengerechte Produktentwicklung, Produktfamilie, Produktstruktur, Modularität*

Keywords: *Design for Variety, product family, product structure, modularity*

1 Herausforderung der Variantenvielfalt

Einer der aktuellen Megatrends, d. h. eine der wesentlichen Entwicklungen in unserer Gesellschaft ist die zunehmende Individualisierung. Im Zuge dieser Entwicklung wandeln sich auch die Märkte von den bekannten Massenmärkten, in denen ein Produkt große Teile der Gesellschaft adressierte, hin zu Mikromärkten in denen Produkte speziell für den individuellen Kunden geschaffen werden. Firmen begegnen dieser Entwicklung häufig mit einer Vielzahl neuer Produktvarianten, wobei sich eine zunehmende Bedeutung jeder einzelnen Variante für den Unternehmenserfolg abzeichnet [1].

Die Produktentwicklung steht in dieser Situation vor der Herausforderung eine zunehmende Vielfalt von Produkten generieren und gestalten zu müssen. Dabei soll dem produzierendem Unternehmen ein möglichst geringer Aufwand entstehen und gleichzeitig der maximale Kundennutzen generiert werden (siehe Bild 1).

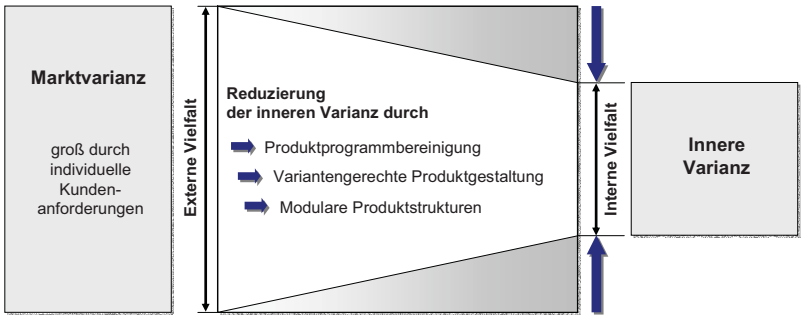


Bild 1: Herausforderung der Variantenvielfalt

Dazu ist intern verursachte Vielfalt ohne Kundennutzen auf ein Minimum zu reduzieren, während die kundenrelevante Vielfalt gezielt auszubauen ist. Zusätzlich sind die Auswirkungen der zunehmenden Vielfalt auf die Produktkosten und Lieferzeiten durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Auf diese Weise kann ein Vorteil im Wettbewerb generiert werden [2].

Im Folgenden werden vielfach diskutierte Konzepte und Strategien vorgestellt, welche den Aufwand zur Erzeugung der Variantenvielfalt reduzieren sollen. Anschließend wird das Bild eines ideal variantengerecht strukturierten Produkts entwickelt. Anhand dieses Idealbilds werden die vorgestellten Konzepte und Strategien sowie ihre Resultate diskutiert. Daraus wird ein Ansatz zur methodischen Unterstützung der Entwicklung von Produktstrukturen für Produktfamilien abgeleitet.

2 Konzepte und Strategien der Entwicklung variantenreicher Produkte

Die Diskussion hinsichtlich der Architekturen variantenreicher Produkte wird aktuell im Wesentlichen durch die folgenden vier Konzepte und Strategien bestimmt:

- Verlagerung des Variantenerzeugung
- Kommonalität
- Plattformstrategie
- Modularität

Eine möglichst weite **Verlagerung der Variantenerzeugung** an das Ende des Fertigungs- und Montageablaufs minimiert die Auswirkungen der Variantenvielfalt auf die

Produktion, da so große Bereiche der Produktion analog zu einer konventionellen Massenfertigung gestaltet werden können [3]. Demgegenüber zielt das **Konzept der Kommonalität** darauf ab, durch eine ähnliche Gestaltung der Varianten einer Produktfamilie die Nutzung gleicher Werkzeuge, gleicher Produktionsmittel und gleicher Fachkenntnisse zu ermöglichen und damit die Auswirkungen der Vielfalt in der Produktion zu minimieren [2].

Liegt der Fokus der bisher vorgestellten Konzepte auf der Gestaltung der vertikalen Erzeugnisgliederung, d.h. des Fertigungs- und Montageablaufs variantenreicher Produkte, so steht die horizontale Erzeugnisgliederung, d.h. die variantenorientierte Erzeugnisstruktur, im Zentrum der Plattformstrategie und des Konzepts der Modularität.

Die **Produktplattform** beschreibt jenen Teil einer Produktarchitektur, der bestehende standardisierte Konstruktionen und deren Schnittstellen enthält [4]. Eine Plattformstrategie minimiert den Aufwand zur Erzeugung neuer Varianten, da wesentliche Elemente der Konstruktion bereits durch die Plattform zur Verfügung gestellt werden. Eine Plattformstrategie kann durch Modularisierung, wie sie im Folgenden beschrieben wird, sinnvoll ergänzt werden.

Das **Konzept der Modularisierung** von Produkten wird sowohl in der Wissenschaft als auch in der industriellen Praxis äußerst unterschiedlich verstanden. Salvador hat in einer umfassenden Literaturrecherche *„Kommonalität der Komponenten, Kombinierbarkeit der Komponenten, Schnittstellenstandardisierung, Funktionsbindung und Entkopplung“* als wesentliche Merkmale der Modularität von Produkten ermittelt [5].

Zur Unterstützung der Entwicklung modularer Produkte steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung. Die meisten dieser Methoden konzentrieren sich auf die Verbesserung eines der genannten fünf Merkmale der Modularität. So konzentriert sich beispielweise die Design Structure Matrix nach Eppinger auf die Entkopplung der Module [6], während Jiao die Funktionsbindung in den Vordergrund stellt [2]. So unterschiedlich die Ziele der etablierten Modularisierungsmethoden auch sind, sie alle weisen ein ähnliches auf drei Schritten basierendes Vorgehensprinzip auf, wie Browning es beispielsweise für die Anwendung der Design Structure Matrix beschreibt [7]:

1. Dekomposition des varianten Produkts bis auf Ebene der Komponenten
2. Analyse und Dokumentation der Komponenten oder ihrer Kopplungen

3. Analyse der Möglichkeiten zur Reintegration der Komponenten

Modularisierung basiert demnach auf einer Neugruppierung von Komponenten und stärkt dabei eines oder mehrere der fünf Merkmale modularer Produkte. Modularisierung kann somit beispielsweise durch Funktionsbindung die Bildung neuer Produktvarianten erleichtern. Gleichzeitig kann Modularisierung z.B. durch die Entkopplung der Module die Nutzung eines Standardsortiments von Modulen und damit die Bildung einer Plattform sinnvoll unterstützen.

3 Das ideal variantengerecht strukturierte Produkt

Im folgenden Abschnitt wird das Bild eines ideal variantengerecht strukturierten Produkts entwickelt. Die wesentlichen Eigenschaften dieses Idealbilds werden anhand der folgenden schematischen Darstellung (Bild 2) eines Produkts schrittweise erläutert. Die Variantenvielfalt einer Komponente wird dabei durch ihre Graustufe symbolisiert, Kopplungen zwischen den Komponenten werden durch geschwungene Verbindungslinien dargestellt.

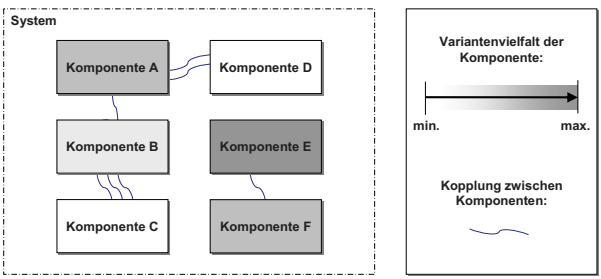


Bild 2: Ausgangsbasis zur Darstellung eines ideal variantengerecht strukturierten Produkts

3.1 Trennung in Standard- und Variantenmodule

Ein ideal variantengerecht strukturiertes Produkt besteht ausschließlich aus variantenreichen oder standardisierten Modulen, dagegen sind Module geringer oder mittlerer Variantenvielfalt nicht vorhanden (siehe Bild 3). Diese Differenzierung senkt die Gesamtkosten des Produkts, da der Anstieg der Kosten eines Variantenmoduls aufgrund steigender Variantenvielfalt stark degressiv verläuft [8].

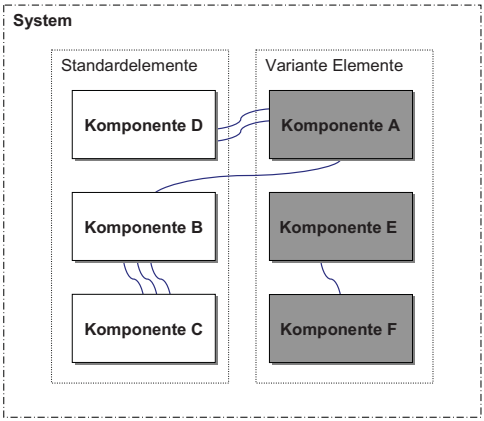


Bild 3: Differenzierung in standardisierte und variantenreiche Module

Ideale Standardmodule sind so gestaltet, dass sie einen möglichst hohen anteiligen Wert haben. Der Wert wird dabei aus Sicht des Prozesses also auch durch Beschaffungszeit oder benötigten Lagerraum und nicht nur durch Herstellkosten definiert. Die Variantenmodule weisen im Gegensatz zu den Standardmodulen nur einen geringen anteiligen Wert am Gesamtprodukt auf [9].

3.2 Separation varianter Komponenten in variante und invariante Teilkomponenten

Im Rahmen dieses Beitrags wird die Hypothese vertreten, dass zur Bildung idealer Variantenmodule eine Dekomposition bis auf Ebene der Produktkomponenten nicht ausreichend ist. Im Idealfall sind variante Komponenten durch eine konstruktive Neugestaltung auf den kleinst möglichen Träger eines oder mehrerer varianter Merkmale zu reduzieren, um so variantenreiche Komponenten zu erzeugen, die einen möglichst geringen Wert aufweisen. Dies bedeutet eine Separation der varianten Komponenten in variante und invariante Bereiche (siehe Bild 4). Die invarianten Bereiche sind dabei in geeignete Standardmodule zu integrieren.

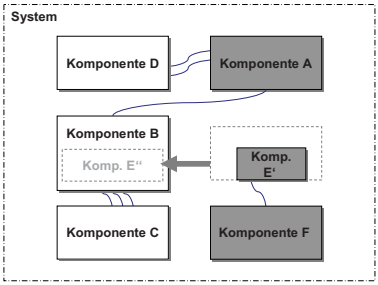


Bild 4: Separation varianter Komponenten in standardisierte und variante Anteile

3.3 Direkte Zuordnung variantenerzeugender Merkmale zu Variantenmodulen

Das aus produktstrategischer Sicht wichtige Ziel neue Produktvarianten mit möglichst geringem Aufwand zu erzeugen, kann durch eine direkte 1:1-Zuordnung zwischen kundenrelevanten varianten Merkmalen und einzelnen Modulen ideal erreicht werden (siehe Bild 5) [8]. In einem so gestalteten Produkt betrifft die Änderung eines kundenrelevanten Merkmals ausschließlich ein Modul. Zusätzlich wird die Anzahl der Modulvarianten reduziert, da keine Multiplikationseffekte vorhanden sind. Die Anzahl der Modulvarianten entspricht somit der Anzahl von Ausprägungen eines varianten Merkmals und nicht dem Produkt der Anzahlen von Ausprägungen unterschiedlicher varianter Merkmale.

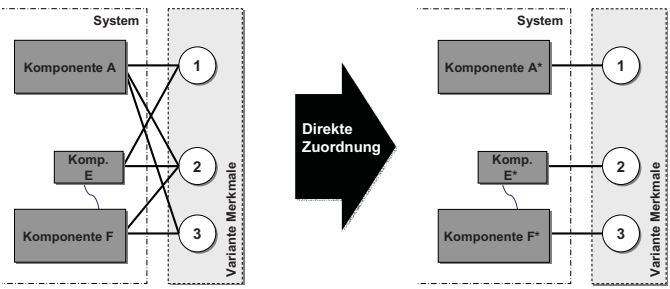


Bild 5: Direkte Zuordnung kundenrelevanter Merkmale zu Modulen

3.4 Auflösung von Abhängigkeiten zwischen den Modulen

In einem ideal variantengerechten Produkt bestehen keinerlei Kopplungen zwischen den Modulen (siehe Bild 6), d.h. analog zum Ideal des modularen Produkts bestehen

keinerlei räumliche Abhängigkeiten sowie Material-, Informations- oder Energieflüsse zwischen den einzelnen Modulen [6]. Das Resultat ist ein Produkt, in dem jede Änderung eines Moduls völlig ohne Auswirkung auf andere Module bleibt.

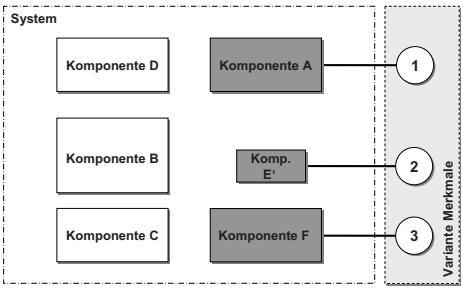


Bild 6: Idealbild eines variantengerechten Produktes

In der Praxis ist dieses Idealbild jedoch nicht zu erreichen, da die Wertschöpfung der Unternehmen in der Integration von Komponenten besteht, welche im Zusammenwirken die Gesamtfunktion des Produkts erfüllen [7]. Modularisierungsmethoden wie die Design Structure Matrix (DSM) approximieren diesen Zustand, da sie im Zuge der Reintegration der Komponenten Kopplungen innerhalb der Module konzentrieren und diese zwischen den Modulen minimieren.

3.5 Zusammenfassende Darstellung des Idealbilds

Das ideal variantengerecht strukturierte Produkt zeichnet sich dadurch aus, dass jedes seiner Module entweder standardisiert oder variantenreich ist. Die variantenreichen Module setzen sich nicht aus vorher bestehenden variantenreichen Einzelteilen zusammen, sondern sind auf möglichst kostengünstige Träger einer varianten Eigenschaft reduziert. Jedem kundenrelevanten varianten Merkmal ist direkt eines dieser variantenreichen Module zugeordnet. Da keinerlei Kopplungen zwischen den Modulen bestehen, beeinflusst die Änderung eines dieser kundenrelevanten Merkmale ausschließlich das zugeordnete variantenreiche Modul.

Dieses ideale Produkt ist in der Praxis kaum zu realisieren. Es soll wie ein ideales Endresultat in der TRIZ als Zielvorstellung dienen und Potentiale zur Erhöhung der Idealität aufzeigen.

4 Idee einer Methode der variantengerechten Produktstrukturierung

In diesem Abschnitt werden die Diskrepanzen zwischen dem Konzept der Modularisierung und dem vorgestellten Ideal eines variantengerechten Produkts diskutiert. Daraus wird anschließend die Grundidee einer Methode zur Unterstützung der Entwicklung variantengerechter Produktstrukturen abgeleitet.

Wesentliche Unterschiede zwischen Modularisierung und dem Ideal der variantengerechten Produktstruktur sind in den unterschiedlichen Konzepten begründet. So zielt Modularisierung darauf ab, eine gemeinsame Produktstruktur für verschiedene Sichten des Produktlebenszyklus zu schaffen. Dem stellt Blees die Hypothese gegenüber, dass in einem Produkt verschiedene, jeweils für eine dieser Sichten vorteilhaftere Produktstrukturen koexistieren können [10]. Wird dieser Grundgedanke aufgegriffen, erfordert dies Methoden die ausschließlich der Unterstützung der variantengerechten Produktstrukturierung dienen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer solchen Methode.

Im Hinblick auf variantengerechte Produktstrukturen ist eine wesentliche Restriktion des Konzepts der Modularisierung in der Dekomposition bis auf Ebene der Komponenten begründet. Dadurch wird eine gezielte Auflösung der Komponenten zu möglichst kostengünstigen Trägern einer varianten Eigenschaft nicht unterstützt. Dies soll ein essentieller Bestandteil einer Methode zur variantengerechten Produktstrukturierung sein.

Ein Teil der Methoden der Modularisierung unterstützt eine direkte Zuordnung zwischen Funktionen und Modulen [2], allerdings nicht eine direkte Zuordnung zwischen varianten Merkmalen und Modulen. Hier wird die These vertreten, dass eine solche Zuordnung aus produktstrategischer Sicht ideal ist. Deshalb ist die Unterstützung einer solchen Zuordnung ebenfalls Ziel der Methode.

Die Grundidee der Methode zur Unterstützung der Entwicklung variantengerechter Produktstrukturen ist die Visualisierung des Erfüllungsgrads der Eigenschaften ideal variantengerechter Produkte. Dazu werden aktuell Baumstrukturen, wie in Bild 7 schematisch dargestellt, untersucht.

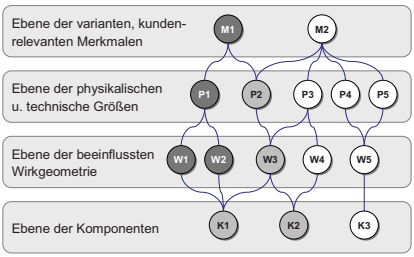


Bild 7: Baumdarstellung zur Visualisierung der Kopplungen in variantenreichen Produkten

Anhand der beiden im Vorhergehenden genannten Ziele *1:1-Zuordnung zwischen varianten Merkmalen und Komponenten* und *Auflösung von Komponenten zu kostengünstigen Trägern einer varianten Eigenschaft* soll der mögliche Nutzen einer solchen Visualisierung aufgezeigt werden.

Durch Betrachtung der vertikalen Zusammenhänge von den varianten Merkmalen bis hin zu den varianten Komponenten ist detailliert zu erkennen, wo bereits eine ideale direkte 1:1-Zuordnung zwischen variantem Merkmal und Komponente vorliegt. Des Weiteren kann für jede nicht ideale Komponente einfach ermittelt werden, aufgrund welcher Kopplung(en) sie von mehreren varianten Merkmalen beeinflusst wird. Dadurch ist eine Unterstützung bei der Entwicklung einer 1:1-Zuordnung zwischen varianten Merkmalen und Komponenten gegeben.

Die Auflösung bestehender Komponenten in Standardelemente und kostengünstige Träger der varianten Merkmale, wird durch einen Vergleich der Ebene der direkt beeinflussten Wirkgeometrie mit der Komponentenebene unterstützt. Hier ist direkt zu erkennen welche Anteile der Komponente durch variante Merkmale beeinflusst werden und welche Anteile sich gegebenenfalls standardisieren lassen.

5 Ausblick

In diesem Beitrag werden die Ziele der aktuellen Modularisierungsmethoden mit dem hypothetischen Idealbild eines variantengerecht strukturierten Produkts verglichen. Ziel der weiteren Forschung ist es einerseits den Nutzen der Eigenschaften des vorgestellten Idealbilds im industriellen Umfeld zu verifizieren und andererseits den vorgestellten Ansatz zu einer praktikablen und verifizierten Methode weiterzuentwickeln.

Literatur

[1] Anderson, Chris: *The long tail: why the future of business is selling less of more.* New York: Hyperion, 2006. – ISBN 1-401-30237-8.

[2] Jaio, Jianxin; Tseng, Mitchell M.: A *methodology of developing product family architecture for mass customization.* Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 10, 1999.

[3] Schuh, Günter; Schwenk, Urs: *Produktkomplexität managen: Strategien – Methoden – Tools*. 2. Aufl. München: Hanser, 2005. – ISBN 3-446-40043-5.

[4] Harlou, Ulf: *Developing product families based on architectures,* MEK publication, Koppenhagen, 2006. – ISBN 10 87-90130-07-3.

[5] Salvador, Fabrizio: *Toward a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization.* IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 54, 2007.

[6] Pimmler, Thomas U.; Eppinger, Steven D.: *Integration analysis of product decompositions*. ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, 1994.

[7] Browning, Tyson R.: *Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and new Directions.* IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, 2001.

[8] Caesar, Christoph: *Kostenorientierte Gestaltungsmethodik für variantenreiche Serienprodukte: Variant Mode and Effects Analysis (VMEA).* Düsseldorf, 1991.

[9] Franke, Hans-Joachim; Lippardt, Sven; Jeschke, Andrea: *Standardisierung der Produktstruktur zur Verbesserung der Ablauforganisation in einem Unternehmen des Spezialmaschinenbaus*. VDI-Z 135, Nr. 10, 1993.

[10] Blees, Christoph; Krause, Dieter: *On the Development of modular Product structures: A differentiated approach*. Proceedings of the DESIGN 2008, Dubrovnik, 2008.

Herausforderungen der interdisziplinären Produktentwicklung

Robert Watty, Hansgeorg Binz

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart
E-Mail: Robert.Watty@iktd.uni-stuttgart.de; Internet: http://www.iktd.uni-stuttgart.de

Inhalt: *In vielen Bereichen der Technik sind zunehmend intelligente Systeme gefragt, die klassische Anwendungsgebiete vom Maschinenbau bis hin zur Bautechnik revolutionieren. Technische Systeme werden dadurch komplexer und die Produktentwicklung erfordert zunehmend intensive und fächerübergreifende Teamarbeit von Experten aus unterschiedlichen Disziplinen. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit kann durch einen maßgeschneiderten und optimierten Entwicklungsprozess unterstützt werden, der diese besonderen Anforderungen berücksichtigt. Dabei ist das technische Zusammen- und Wechselwirken der Komponenten ebenso zu berücksichtigen wie der gesellschaftliche Kontext einer Produktentwicklung, der z. B. durch Umweltauflagen immer wichtiger wird. Eine einfache Übertragung bewährter Entwicklungsmethodiken ist daher ohne entsprechende Modifikationen nicht zielführend. Nachfolgend werden die Herausforderungen an die interdisziplinäre Zusammenarbeit dargestellt, die die Basis für Anforderungen an daran angepasste Entwicklungsprozesse bilden.*

Abstract: *Nowadays many branches and areas of technology require increasingly intelligent technical systems revolutionising applications in traditional fields like mechanical or civil engineering. Thus technical products become more complex and their development demands intensive and cross-disciplinary teamwork of experts from different domains. A customised and optimised development process supports interdisciplinary collaboration, if it considers these particular requirements and regards the technical interaction of the components as well as the social context of product development, e. g. the tightening of environmental laws. This requires a modification of established product development methodologies beyond simple transfer. This contribution describes the challenges of interdisciplinary teamwork underlying demands to future development processes.*

Stichwörter: *Interdisziplinäre Produktentwicklung*

Keywords: *Interdisciplinary product development*

1 Einleitung

Seit dem Altertum wird die Wissenschaft in Spezialgebiete oder Wissenschaftszweige eingeteilt, die auch als Disziplinen bezeichnet werden [1]. Mit zunehmendem Umfang des Wissens ging eine immer weiter gehende Differenzierung der Wissenschaft einher, so

dass sich Einzelwissenschaften bildeten, die ein begrenztes Themenfeld zum Inhalt haben und sich noch weiter in Teildisziplinen aufgliedern. Die daraus folgende starke Spezialisierung birgt die Gefahr, dass die Experten der einzelnen Disziplinen zwar Spezialisten auf ihrem Gebiet sind, aber immer weniger voneinander wissen. Gleichzeitig erfordert die Lösung aktueller und künftig zu erwartender Problemstellungen, sei es aufgrund komplexer Zusammenhänge z. B. im Umweltbereich oder aufgrund starker Erweiterung der Funktionalität von Maschinen und Anlagen, aber immer stärker Wissen aus mehreren Gebieten. Disziplinäre Forschung stößt damit offensichtlich an ihre Grenzen, denn „Probleme tun uns häufig nicht den Gefallen, sich als Probleme für disziplinäre Spezialisten zu definieren“ [2].

Daraus resultiert bei der Lösung von Problemen zunächst Multidisziplinarität, die als eine gleichberechtigt nebeneinander auf ein gemeinsames Forschungsobjekt gerichtete Aktivität mehrerer Disziplinen definiert ist, bei der eine wirkliche Integration allerdings unterbleibt [3]. Diese Vorgehensweise macht dann Sinn, wenn es darum geht, unterschiedliche Sichtweisen zu einem Problem einzuholen oder unterschiedliche Methoden darauf anzuwenden. Bei interdisziplinären Ansätzen ist dagegen eine Integration von vorneherein Ziel des Problemlösungsprozesses.

Der Begriff der Interdisziplinarität wurde ursprünglich in den frühen 1970er Jahren vom OECD-Zentrum für Bildungsforschung und Innovation geprägt [4] und beschreibt die Re-Integration von fragmentierten disziplinären Wissensbereichen zur Überwindung der Divergenz zwischen gesellschaftlichen Problemlagen und wissenschaftlichen Problemlösungsfähigkeiten. Eine einheitliche Definition des Begriffes und insbesondere eine klare Abgrenzung zu ähnlichen Begriffen wie Trans-, Kreuz-, Multi-, Pluri- oder Infradisziplinarität fehlen allerdings bis heute [5]. Übereinstimmend wird aber von einer engen Beziehung zwischen unterschiedlichen Disziplinen ausgegangen, die durch Austausch und Integration unterschiedlicher Blickwinkel, Forschungsansätze oder theoretischer Bezugsrahmen dazu beiträgt, Probleme zu lösen, die sich monodisziplinär nur unzureichend lösen lassen [6]. Interdisziplinarität ist damit weiter entwickelt als Multidisziplinarität.

Disziplinen können von vorneherein interdisziplinären Charakter haben, wenn ihr Wissen Grundlage für die Arbeit in anderen Disziplinen ist, wie z. B. in den Werkstoffwissenschaften. Weitergehend entstehen aus Interdisziplinarität aber oft auch wieder neue Disziplinen, wobei hier drei Wege unterschieden werden [7], Bild 1.

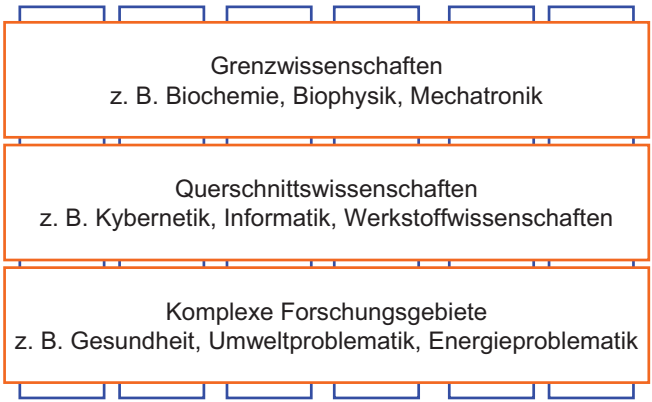


Bild 1: Arten interdisziplinärer Disziplinen

Grenzwissenschaften entstehen dann, wenn die Spezialisierung in einer Disziplin an die Grenze zu einer benachbarten Disziplin stößt, die für weitergehende Forschung notwendig ist. Beispiele sind hier Biochemie und Biophysik oder auch die Mechatronik im technischen Bereich. Querschnittsdisziplinen entstehen, wenn beispielsweise Theorien in unterschiedlichen Disziplinen verwendet werden können und sich daraus ein eigener Forschungsgegenstand entwickelt, wie z. B. in der Kybernetik oder der Informatik. In komplexen Forschungsgebieten werden Problemstellungen erfasst, die eine ganzheitliche Herangehensweise erfordern, die von einzelnen Disziplinen nicht geleistet werden kann. Aktuelle Beispiele sind hier die Umwelt- oder die Energieproblematik.

2 Interdisziplinäre Produktentwicklung

In den Ingenieurwissenschaften kann Interdisziplinarität aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden. Im engeren Sinne sind heutige technische Produkte in der Regel über ein Nebeneinander mehrerer Disziplinen hinaus geprägt von Funktionen und technischen Anforderungen, die auf der weitgehenden Integration von Erkenntnissen aus mehreren Disziplinen beruhen. So müssen die Komponenten von mechatronischen Systemen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden, damit das Gesamtsystem funktioniert. Entsprechend wird in der Produktentwicklung interdisziplinäre Zusammenarbeit im Sinne einer abteilungsübergreifenden Teamarbeit verstanden (z. B. [8]).

Im weiteren Sinne ist Technik aber auch in einen gesellschaftlichen Kontext eingebunden, der z. B. rechtliche, wirtschaftliche, ökologische oder ethische Aspekte berücksichtigt und ebenfalls eine interdisziplinäre Zusammenarbeit speziell mit nichttechnischen Disziplinen erfordert.

In vielen Bereichen der Technik, aber auch der alltäglichen Nutzung von Produkten, sind zunehmend intelligente Systeme gefragt, die klassische Anwendungsgebiete vom Maschinenbau bis hin zur Bautechnik revolutionieren. Möglich werden diese Systeme nur durch Einsatz von weiterentwickelten, intelligenten Konstruktionselementen, die zu einer erweiterten Funktionalität oder – bei gleicher Funktionalität – zu einem geringeren Aufwand bei Herstellung oder Betrieb führen.

Die bisherige Weiterentwicklung von Konstruktionselementen hatte meist zum Ziel, ihre Leistungsfähigkeit zu verbessern, also z. B. die Masse zu verringern oder die Lebensdauer zu verlängern. Typischerweise war ein System, und damit auch seine Komponenten, im Ursprung mehr oder weniger rein monodisziplinär, also z. B. mechanisch, Bild 2.

Multidisziplinäre Weiterentwicklungen kombinieren in vielen Fällen Elemente aus unterschiedlichen Disziplinen, also für den Fall der Mechatronik typischerweise mechanische, elektronische und informationstechnische Elemente, die dann zu durchaus abgestimmten Systemen zusammengesetzt werden. So wirken in Fahrzeugen viele Komponenten aus unterschiedlichen Disziplinen zusammen, Prothesen ersetzen Gliedmaßen und auch Gebäude sind mit Technik versehen und bis zu einem gewissen Grad automatisiert.

Konzeptionelle und funktionale Weiterentwicklungen klassischer Konstruktionselemente hin zu hybriden Konstruktionselementen, mit denen auch Potenziale neuer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen genutzt werden können, fanden in den letzten Jahrzehnten nur vereinzelt statt. Auch die Integration intelligenter Eigenschaften, die z. B. durch eine technologische Weiterentwicklung von Werkstoffen und auch eine frühzeitige Einbindung von Sensoren und Aktoren sowie der entsprechenden Regelungstechnik möglich wäre, wurde bisher nur wenig und eher unsystematisch umgesetzt. Damit wird das Potenzial, Produkte im gesamten Lebenszyklus intelligent auf Veränderungen der Umgebungsbedingungen reagieren zu lassen, nicht optimal ausgeschöpft.

Die Entwicklung solcher neuartigen Elemente wird sicher der nächste Schritt einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Technik sein und stellt auch die Produktentwicklung vor neue Herausforderungen. Während bisherige Konstruktions-

elemente meist monofunktional waren, also z. B. ein Seil die Funktion „Kraft übertragen“ hatte, wird künftig eine verstärkte Funktionsintegration hin zu multifunktionalen Komponenten erfolgen, so dass z. B. in einem Seil zusätzlich Sensoren oder Aktoren integriert sind, die eine Funktionserweiterung um „Signal leiten“ oder „elektrische Energie leiten“ erfordern. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit muss daher erheblich intensiviert werden, um ein reibungsloses Funktionieren der einzelnen Komponenten und ihr Zusammenwirken in einem komplexen System zu gewährleisten. Der Einsatz neuer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen erfordert zusätzlich die Entwicklung neuer Herstellungsverfahren, wodurch die Produktentwicklung technologiegetrieben wird. Die bisher meist getrennte Betrachtung von Produkt- und Technologieentwicklung ist dann nicht mehr möglich.

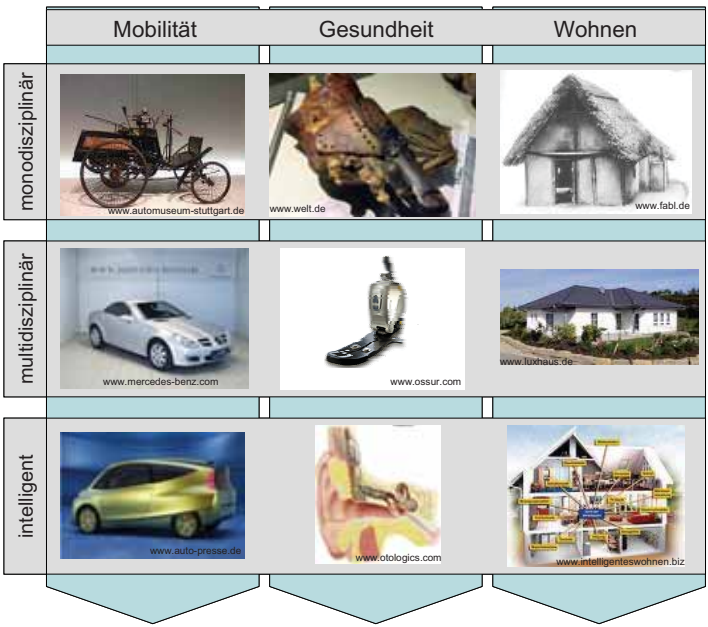


Bild 2: Weiterentwicklung der Technik

Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit ermöglicht dann z. B. Fahrzeuge, deren Konzept auf bionischen Ansätzen beruht und die den Fahrer intelligent unterstützen, Prothesen, die z. B. in Form von Hörgeräten direkt an das menschliche Nervensystem angeschlossen werden oder Gebäude, die auf Umwelteinflüsse intelligent reagieren können.

Intelligenz eines solchen technischen Systems geht in allen Fällen damit einher, dass in den Handlungsspielraum des Menschen als Nutzer eingegriffen wird. Neben rein technischen oder biologischen Fragestellungen erweitert sich Interdisziplinarität damit auch um beispielsweise ethische Aspekte oder Schnittstellenprobleme, die neben physikalischer Anbindung auch eine geeignete Gestaltung von Interfaces betreffen.

Es ergeben sich eine ganze Reihe von Herausforderungen an die interdisziplinäre Entwicklung solcher Produkte bzw. Systeme, die auch eine Erweiterung der etablierten Entwicklungsmethodiken wie der VDI-Richtlinie 2221 erfordern. Die VDI-Richtlinie 2206 für die Entwicklung mechatronischer Systeme ist ein erster Schritt in diese Richtung, der aber aus der Sicht von Fachleuten längst nicht ausreichend ist [9].

3 Herausforderungen der interdisziplinären Produktentwicklung

In der Produktentwicklung wirft Interdisziplinarität eine ganze Reihe von spezifischen Fragen und Problemstellungen auf. Bei monodisziplinärer Vorgehensweise treten diese oft gar nicht auf, aber sobald mehrere Disziplinen beteiligt sind, nehmen sie mit geringer werdender Affinität der beteiligten Fachbereiche zu. Daher müssen bestimmte grundlegende Gemeinsamkeiten, sozusagen auf einer übergeordneten Meta-Ebene, geklärt sein, um eine erfolgreiche interdisziplinäre Produktentwicklung durchführen zu können [7], Bild 3.

Zunächst ist ein Konsens über gemeinsame Ziele erforderlich. An ihnen muss sich die Arbeit der Beteiligten orientieren und dies setzt die Festlegung eines gemeinsamen Verständnisses von einem Endergebnis voraus, das nur auf den Beiträgen der Disziplinen und ihrer Diskussion beruhen kann.

Wesentliche Voraussetzung, um Ziele und weitere Gemeinsamkeiten festlegen zu können, ist eine gemeinsame Sprache als Basis für Kommunikation. Dies muss in Form einer einheitlichen Definition zentraler Begriffe erarbeitet und natürlich als Definition auch beachtet werden. Nur so können Unklarheiten und Uneinigkeiten geklärt werden, die auf einem abweichenden Begriffsverständnis beruhen. So sind z. B. Begriffe wie „Konzept“ in unterschiedlichen Disziplinen mit verschiedenen Bedeutungen belegt. Mit der Kommunikation verknüpft ist aber auch die Kooperation der Disziplinen miteinander, die ein wechselseitiges Verständnis oder noch besser eine Angleichung von Forschungs- und Entwicklungskulturen der einzelnen Disziplinen erfordert. Fehlt diese Voraussetzung für Zusammenarbeit, so besteht die Gefahr von Missverständnissen, Vorurteilen und

gruppendynamischen Differenzen, die dann eine erfolgreiche interdisziplinäre Entwicklung erheblich behindern.

Basierend auf einer einheitlichen und schlüssigen Sprache können die Ziele in eine konkrete Aufgabenbeschreibung umgesetzt werden, die alle Merkmale sowohl des zu bearbeitenden Problems als auch der angestrebten Lösung aus Sicht aller Beteiligten beschreibt.

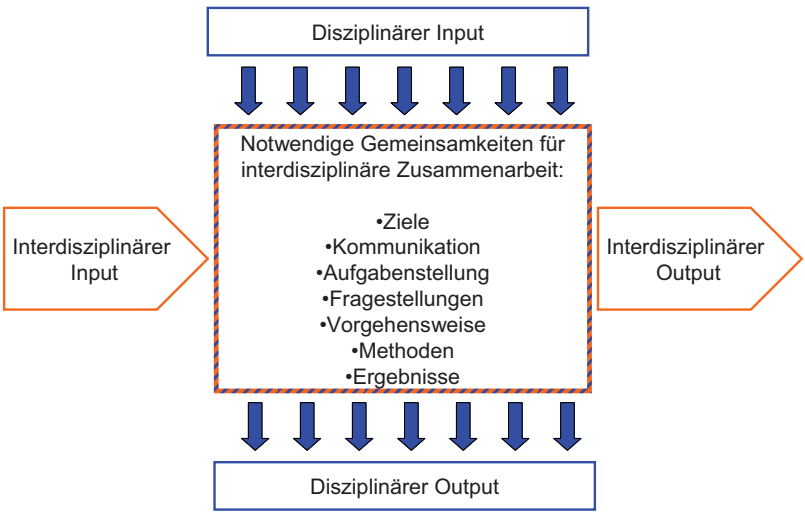


Bild 3: Interdisziplinäre Zusammenarbeit, aufbauend auf [7]

Bezogen auf das Problem müssen hier durchaus unterschiedliche aus der Aufgabenstellung abzuleitende und zu bearbeitende Fragestellungen der einzelnen Disziplinen berücksichtigt werden, die aber dann in eine gemeinsame „lösungsfähige“ Aufgabenstellung eingehen und sich wechselseitig sinnvoll ergänzen sollten. So ergibt sich ein gemeinsamer „interdisziplinärer Input“ bezogen auf eine einheitliche Aufgabenstellung, der nach der interdisziplinären Bearbeitung natürlich in einem konsensfähigen „interdisziplinären Output“ im Sinne einer gemeinsamen Problemlösung münden sollte. Es ist darüber hinaus zweckmäßig, den Zusammenhang zwischen den Teilaspekten der Aufgabenstellung bzw. den Beiträgen der Disziplinen (= disziplinärer Input) ebenso zu formulieren wie die Teilergebnisse, die in die einzelnen Disziplinen zurückfließen (= disziplinärer Output). Alle Disziplinen bringen ihren fachspezifischen Beitrag ein und

sollten relevante Aspekte auch in der Aufgabenstellung oder den darauf beruhenden Fragestellungen wiederfinden.

Im Sinne einer gemeinsam zu bearbeitenden Aufgabenstellung ist es auch wichtig, zugrunde liegende theoretische Ansätze der Disziplinen zu vergleichen und unter Umständen zusammenzuführen, damit möglichst auch eine gemeinsame theoretische Basis vorhanden ist. Es ist sinnvoll, auf diese Weise Fragestellungen der einzelnen Disziplinen explizit abzugleichen, auch, um Synergien der Bearbeitung aus unterschiedlichen Blickwinkeln nutzen zu können, zumindest aber Widersprüche oder Unterschiede im Vorfeld ausräumen zu können. Nicht zuletzt kann so eine interdisziplinäre Wissensbasis für Folgeentwicklungen geschaffen werden.

Im Anschluss muss die eigentliche Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgen. In dieser Phase ergeben sich einige interessante Aspekte, die zunächst einmal mit der Vorgehensweise zusammenhängen. Aus Sicht der einzelnen Disziplinen können andere grundsätzliche Strategien zum Vorgehen, wie z. B. „bottom up“ oder „top down“ bzw. „von außen nach innen“ oder „von innen nach außen“, für das Gesamtprodukt, unter Umständen aber auch für Teilergebnisse der jeweiligen Disziplinen, zweckmäßig sein. Weiter kann nach einer grundsätzlichen Entscheidung über die sequenzielle oder parallele Bearbeitung die Reihenfolge der Bearbeitung einzelner Teilprobleme unterschiedlich sein, und zusätzlich kann auch die Reihenfolge der Bearbeitung von Teilproblemen durch die Disziplinen unterschiedlich gewählt werden, Bild 4.

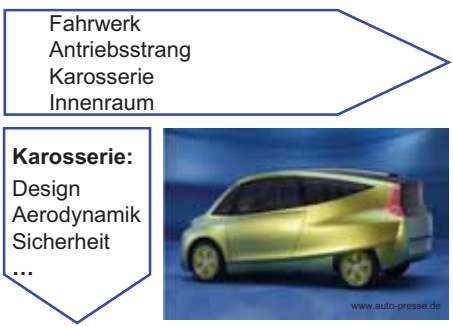


Bild 4: Bearbeitungsschritte bei der KFZ-Entwicklung

Bei einem Fahrzeug wird beispielsweise meist nach Vorgaben von außen (Design) nach innen (Maßkonzept des Passagierraumes) entwickelt. Trotzdem erfolgt in der Regel

eine parallele Entwicklung, bei der Abhängigkeiten zwischen den Bestandteilen, wie z. B. Karosserie und Innenraum, beachtet werden müssen. Bei der Bearbeitung der Karosserie wird üblicherweise ein grundsätzliches Design vorgegeben, an dem sich dann aerodynamische Fragestellungen oder Aspekte des Fußgängerschutzes orientieren. Zusätzlich sind andere Disziplinen, die sich z. B. mit ökologischen und ökonomischen Einflüssen oder neuen Werkstoffen beschäftigen, überlagert. Unterschiedliche Vorgehensweisen sind hier durchaus vorstellbar, für eine sinnvolle Vorgehensweise ist aber in jedem Fall eine sorgfältige Abstimmung der Disziplinen unbedingt erforderlich. Hierzu gehört auch eine sorgfältige Berücksichtigung von Konsensbildung und Integration.

Während der Bearbeitung ergibt sich auch die Notwendigkeit, aus mehreren möglichen Lösungswegen den besten auszuwählen. Interdisziplinär abgestimmte Zielgrößen, Bewertungskriterien, Gewichtungsfaktoren und darauf aufbauende Bewertungsverfahren sind dazu notwendig.

Methoden sind im gesamten Bearbeitungsprozess wichtige Hilfsmittel. Die vorhandenen Methoden der einzelnen Disziplinen sind oft nicht auf interdisziplinäre Zusammenarbeit abgestimmt oder gar nicht dafür geeignet. Für eine Anwendung oder Modifikation ist es wichtig, dass sie gemeinsam als zielführend erachtet werden und z. B. den wissenschaftlichen Kriterien der einzelnen Disziplinen entsprechen. Unzureichende Methoden führen zu ineffizientem Vorgehen, ungenutzten Synergien und damit zu Ergebnissen, die nicht über mono- oder multidisziplinäre Vorgehensweisen hinausreichen.

Wenn dann am Ende einer erfolgreichen interdisziplinären Zusammenarbeit Ergebnisse vorliegen, so ist es wichtig, dass diese für alle Beteiligten verständlich und verwertbar aufbereitet werden können. Über rein produktbezogene Ergebnisse hinaus bietet es sich an, auch den interdisziplinären Entwicklungsprozess zu reflektieren und darauf basierend den Ablauf und die Zusammenarbeit zu optimieren.

Aus diesen und weiteren Besonderheiten resultiert eine Reihe von Anforderungen, die an einen Entwicklungsprozess für künftige weiterentwickelte Produkte gestellt werden müssen. Dazu zählen beispielsweise Methoden zur Ermittlung von Anforderungen aus Sicht des gesamten Produktlebenszyklus, eine erforderliche multifunktionale Systemsicht und eine flexible Anpassung an unterschiedliche Ausgangssituationen bei der Entwicklung. Die Unterschiede zu konventionellen Konstruktionselementen erfordern aber auch eine Anpassung bisheriger Vorgehensweisen in der Produktentwicklung.

4 Zusammenfassung

Mit zunehmender Komplexität und steigendem Funktionsumfang moderner Produkte werden die Abläufe bei der Produktentwicklung mehr und mehr von interdisziplinärer Zusammenarbeit geprägt. Um diesen Wandel bewältigen zu können, ist es sinnvoll, auch die bewährten Entwicklungsmethodiken in den beteiligten Disziplinen zu überprüfen und zu interdisziplinären Vorgehensweisen zu erweitern. Dabei sind eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen, um die Zusammenarbeit technischer Disziplinen zu unterstützen und den gesellschaftlichen Kontext angemessen einzubinden. Aus diesen Herausforderungen lassen sich die Anforderungen an geeignete Entwicklungsmethodiken ableiten.

Literatur

[1] o. V.: *Brockhaus Enzyklopädie*. Leipzig, Mannheim : Brockhaus, 2006.

[2] Hentig, H. von: Interdisziplinarität, Wissenschaftsdidaktik, Wissenschaftspropädeutik. In: Merkur, 25 (1971), S. 855-871.

[3] Moran, J.: *Interdisciplinarity*. London: Routledge, 2002.

[4] Jantsch, E.: *Towards interdisciplinarity and Transdisciplinarity in Education and Innovation*. In: Schürmann, V. (Hrsg.): *Interdisciplinarity – Problems of Teaching and Research in Universities*. Paris: CERI/OECD, 1972, pp. 97-121.

[5] Schmidt, J.: Bionik und Interdisziplinarität. In: Rossmann, T.; Tropea, D.: Bionik. Berlin: Springer, 2005.

[6] Klein, J.: *A Conceptual Vocabulary of Interdisciplinary Science*. In: Weingart, P.; Stehr, N.: *Practising Interdisciplinarity*. Toronto: University of Toronto Press, 2000.

[7] Defila, R.; Di Giulio, A.; Scheuermann, M.: *Forschungsverbundmanagement. Handbuch für die Gestaltung inter- und transdisziplinärer Projekte.* Zürich: Hochschulverlag an der ETH Zürich, 2006.

[8] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[9] Albers, A.; Meboldt, M.: *Workshop „Intelligente Systeme von morgen“.* Berliner Kreis Newsletter 1/2008.

Produktentwicklungsprozesse und ihre Auswirkungen auf PLM-Architekturen

Michael Bitzer, Martin Eigner, Niklas Hochstein und Michael Vielhaber*

Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung, Technische Universität Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str./Geb.44, D-67663 Kaiserslautern
Email: hochstein@mv.uni-kl.de; Internet: http://vpe.mv.uni-kl.de

*Daimler AG - Group Research
Wilhelm-Runge-Str. 11, D-89081 Ulm
Email: michael.vielhaber@daimler.com; Internet: http://www.daimler.com

Inhalt: *Die Auswirkungen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) unterschiedlicher Fertigungstypen auf mögliche PLM-Architekturen werden am Beispiel eines Schiffbau- und eines Automobilbauunternehmens als Repräsentanten eines Einzel- und Serienfertigungsunternehmens hin analysiert. Ziel dieses Beitrags ist es, Erkenntnisse aus den stark divergierenden aber dennoch ähnlich komplexen Fertigungstypen Serienfertigung und Einzelfertigung herauszuarbeiten und mögliche Potentiale für weitergehende Forschungsarbeiten abzuleiten.*

Abstract: *The type of production including the according PEP of an enterprise has impact on possible PLM-solutions. By means of the example of a shipyard and an enterprise representing the automobile industry this will be analysed. The intention of this paper is to extract new findings from these two profoundly diverging but still similarly complex types of production and to formulate tasks for further research.*

Stichwörter: *Product Lifecycle Management (PLM), Produktentwicklungsprozess, Produktentstehungsprozess, Schiffbau, Automobilbau, Einzelfertigung, Serienfertigung*

Keywords: *Product Lifecycle Management (PLM), product development process, product creation process, shipbuilding, automotive industry, individual production, batch production*

1 Einleitung

Verkürzte Entwicklungszeiten, stetig steigender Innovationsdruck und ein wachsendes Qualitätsbewusstsein seitens der Kunden sind nur einige der Faktoren, denen sich produzierende Unternehmen heute am Markt ausgesetzt sehen. Diese Faktoren beeinflussen einerseits direkt die Gestaltung und Entwicklung von neuen Produkten, anderseits aber auch die Unternehmensprozesse – insbesondere den Produktentwicklungsprozess (PEP). Der PEP stellt einen wichtigen Prozess in der

Wertschöpfungskette eines produzierenden Unternehmens dar. Dieser Prozess wird, neben anderen Prozesscharakteristiken [1], maßgeblich von der Fertigungsart des jeweiligen Unternehmens beeinflusst.

Product Lifecycle Management (PLM) berücksichtigt alle Phasen des Produktlebenszyklus und stellt unternehmensweit das Rückgrat für alle produkt- und produktionsrelevanten Daten dar. Wesentliche Aufgabe eines nachhaltig angelegten PLM-Konzeptes ist es, den PEP durch maßgeschneiderte informationstechnische (IT-) Architekturen und entsprechende Methoden zu unterstützen. Dies zeigt, dass ein effektiv und effizient arbeitendes PLM nur im Verbund mit allen im betrachteten Unternehmen eingebetteten IT-Systemen und IT-Konzepten funktionieren kann. Somit bildet PLM ein Teil einer ganzheitlichen, integrierten IT-Unternehmensarchitektur. Um diese Architekturen für weitergehende Untersuchungen zu ermitteln, haben sich prozessorientierte Vorgehensmodelle als Brücke zwischen Prozessen und PLM Architekturen erwiesen.

In diesem Beitrag werden die Auswirkungen des PEP unterschiedlicher Fertigungstypen – am Beispiel eines Schiffbau- und eines Automobilbauunternehmens als Repräsentanten für Einzel- und Serienfertigungsunternehmen – auf mögliche PLM-Architekturen hin analysiert. Grundlage sind Erfahrungen und Erkenntnisse aus Projekten mit einem deutschen Schiffbauunternehmen und einem deutschen Automobilbauunternehmen. Der Fokus bei dem betrachteten Schiffbauunternehmen liegt auf dem komplexen PEP für Megayachten und Spezialschiffe. Der Automobilhersteller entwickelt Fahrzeuge im Premiumsegment. Die Komplexität beider Endprodukte fordert eine Vielzahl spezialisierter IT-Systeme, die durch einen stabilen PLM-Ansatz kombiniert werden müssen.

Ziel dieses Beitrags ist es, Erkenntnisse über nutzbare Synergien aus den stark divergierenden aber dennoch ähnlich komplexen Fertigungstypen Serienfertigung und Einzelfertigung herauszuarbeiten und mögliche Potentiale für weitergehende Forschungsarbeiten zu beschreiben.

2 Methode

Um die in [1] bereits diskutierten Charakteristiken des PEP näher zu untersuchen, wurde im Rahmen dieses Beitrags der Fokus auf unterschiedliche Fertigungstypen gelegt. Dabei wurden die Automobilindustrie und der Schiffbau als markante Vertreter für die Serien- bzw. die Einzelfertigung genutzt. Aufbauend auf industriellen Forschungsprojekten

mit namhaften deutschen Unternehmen in beiden Industriebranchen konnten zahlreiche Einblicke in die Entwicklungsprozesse gewonnen werden und so Unterschiede und Gemeinsamkeiten unter dem Schwerpunkt PLM erkannt werden. Abgeleitet aus diesen Erfahrungen wurden folgende Forschungsfragen für diese Arbeit definiert:

- Welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Produktentwicklungsprozesse lassen sich aus den unterschiedlichen Fertigungsarten ableiten?
- Kann die Fertigungsart einen Einfluss auf die Ermittlung einer PLM-Lösung haben?
- Welche Ansätze können dabei identifiziert werden?

Da in der Literatur eine Vielzahl von unterschiedlichen Definitionen des Produktentwicklungsprozesses zu finden sind und diese teilweise über den gesamten Produktlebenszyklus reichen, wird im Folgenden die für diese Arbeit maßgebliche Abgrenzung vorgenommen.

3 Produktentwicklungsprozess

In der Literatur werden die Begriffe Produktentwicklungsprozess und Produktentstehungsprozess teilweise synonym verwendet, teilweise aber auch sehr unterschiedlich auf die Phasen des Produktlebenszyklus verteilt (z.B. [2]). Im Rahmen dieses Beitrags wird der Produktentwicklungsprozess wie folgt verstanden: Der PEP umfasst die vollständige Beschreibung eines verkaufsfähigen Produktes und all seiner Ressourcen. Dagegen setzt sich die Produktenstehung aus der Produktentwicklung und der Produktion zusammen. Bild 1 zeigt schematisch die Abgrenzung des Produktentstehungsprozesses und des Produktentwicklungsprozesses bezogen auf die Phasen des Produktlebenszyklus.

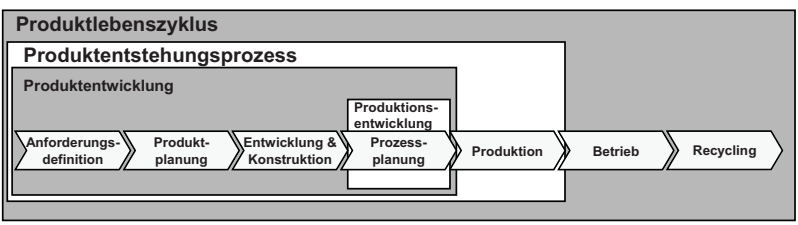


Bild 1: Produktentwicklungsprozess und Abgrenzung zum Produktentstehungsprozess

Die Produktentwicklung umfasst die Phasen von der Anforderungsdefinition bis zur Prozessplanung und beschreibt somit das vollständige Produkt. Als Untermenge der Produktentwicklung ist die Produktionsentwicklung zu sehen. Die hier aufgezeigten Phasen sind vereinfacht sequentiell dargestellt. In der Unternehmenspraxis ist eine rein sequenzielle Anordnung der Phasen und Prozesse im PEP meist unwirtschaftlich.

4 PLM aktuell

PLM ist ein Konzept, das die Integration aller über den PLZ entstehenden Daten und Informationen zu einem Produkt unterstützt. Dabei werden entsprechend den durchlaufenen Phasen nicht nur konstruktionsrelevante, sondern alle produkt- und produktionsrelevanten Daten aufgenommen und gespeichert.

4.1 Situation im Automobilbau

Die PLM Situation in der Automobilindustrie ist geprägt durch branchenspezifische Randbedingungen, die sowohl aus dem Produkt selbst, aber auch aus dem Absatzmarkt und den Unternehmensumfeld beeinflusst werden. Der PEP in der Automobilindustrie wird durch eine Vielzahl von IT-Systemen unterstützt. Diese Systeme werden durch eine so genannte IT-Landschaft oder -Unternehmensarchitektur repräsentiert. Diese Landschaft entwickelte sich über Jahrzehnte nach und nach und ist heute sehr heterogen ausgeprägt. Jedes eingesetzte IT-System unterstützt einen bestimmten Prozess oder Prozessabschnitt im PEP. Diese so genannten lokalen Optima führen aber bei Betrachtung der gesamten IT-Landschaft nicht zwangsläufig zu einem globalen Optimum, was die IT-Unterstützung in der Produktentwicklung betrifft (z.B. [3]).

Besonderheiten der Automobilindustrie, die diese Entwicklung beeinflusst haben und bei der weiteren Betrachtung zur Ermittlung von zukünftigen PLM Lösungen und Architekturen berücksichtigt werden müssen sind z.B. Internationaler Wettbewerbsdruck, große Variantenvielfalt, Verkürzung der Entwicklungszeiten, technologische Umbrüche und hoher Kostendruck [4]. Dies erfordert einen systematischen und gut organisierten Austausch an Daten- und Informationen [5, 6].

Heute werden etwa 60 bis 80 Prozent der Entwicklungsdienstleistungen außerhalb der OEMs (Original Equipment Manufacturers) erbracht. Dies führt zu dem Bedürfnis der

Unternehmen, Systeme zu benutzen, die Informationsverlusten, Mehrfacharbeit und redundanten Daten vorbeugen [5].

4.2 Situation im Schiffbau

Eine moderne Megayacht kann als schwimmende Anlage bezeichnet werden. Ein solches Projekt vereint eine Vielzahl von hoch spezialisierten Gewerken wie z.B. Stahlbau, Ausrüstung, Einrichtung, Antrieb, Elektrik auf engem Raum [7]. Bei hohen Anteilen an Fremdvergaben und parallelisierten Abläufen der einzelnen Gewerke werden Schiffbauprojekte weltweit durch zunehmend kürzere Entwicklungszeiten auf eine harte Probe gestellt. Der Lebenszyklus eines Schiffes (Bild 2), im Speziellen einer Megayacht, wird in allen Phasen durch eine Vielzahl von domänenspezifischen Spezialtools unterstützt.

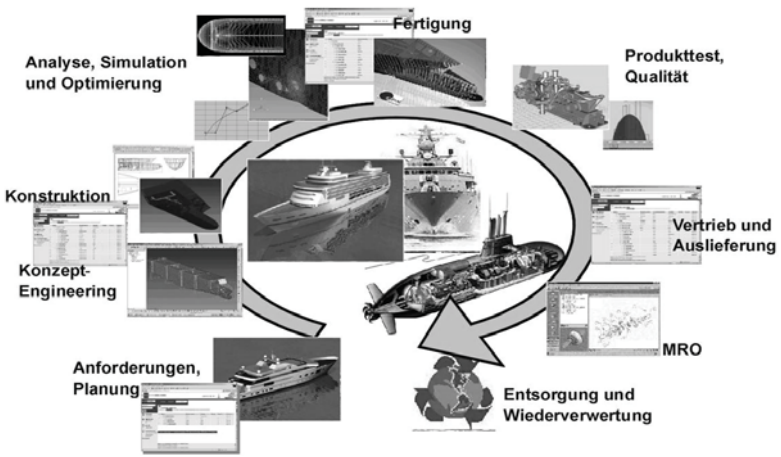


Bild 2: Lebenszyklus im Schiffbau [8]

Neben des einmaligen und stark auf den Kunden ausgerichteten PEP umfasst der Lebenszyklus auch den Bereich „Conversions and Refit“ sowie „After-Sales“- Bereiche. Aktuelle Bestrebungen zielen auf eine Integration der zahlreichen Autorensysteme, um allen am Projekt beteiligten Parteien einen aktuellen Konstruktionsstand als Basis für weitere Prozesse bereit zu stellen. Ähnlich dem Automobilbau wurde erkannt, dass es vielfach zur Ausprägung von so genannten Insellösungen gekommen ist.

5 Einzelfertigung vs. Serienfertigung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Einzel- und Serienfertigung bezogen auf den PEP ist, dass bei Einzelfertigung das Produkt kundenspezifisch geplant und entwickelt wird. Im Gegensatz dazu wird bei den Produkten der Serienfertigung kundenneutral entwickelt [9]. Dies spiegelt sich auch im Kundenbeauftragungsprozess wider (Bild 3). Dabei wird deutlich, dass bei einem Einzelfertiger der Kunde mit seinem erstmaligen Kundenauftrag den gesamten Produktlebenszyklus des kundenindividuellen Produktes anstößt.

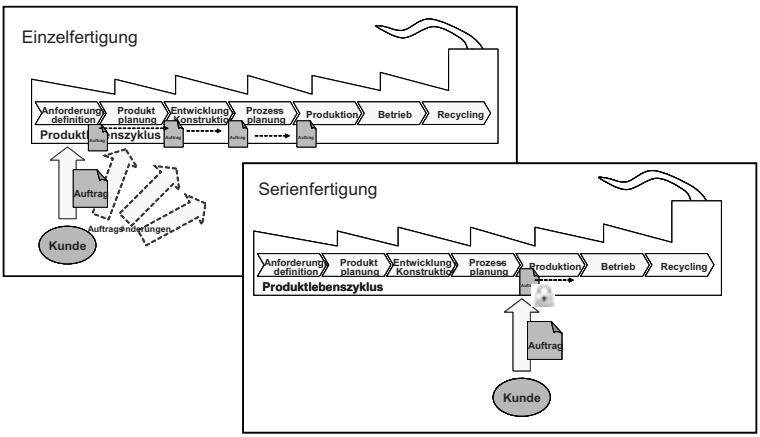


Bild 3: Unterschiedliche Auftragssituationen bei Einzel- und Serienfertigung

Da gerade im Marktsegment der Premiumprodukte die Kundenorientierung und die Berücksichtigung sehr individueller Kundenwünsche maßgeblich ist, kann es im Verlauf der frühen Phasen, über die eigentliche Produktentwicklung bis hinein in die Phase der Produktion zu Änderungen des Kundenauftrags kommen. Diese zu berücksichtigen ist eine der großen Herausforderungen dieser Fertigungsart.

Im Gegensatz dazu zeigt sich der Kunde eines Serienproduktes nicht als Auslöser des gesamten Produktlebenszyklus, sondern als Auslöser direkt vor der Phase der Produktion. An dieser Stelle ist die Produktentwicklung bereits vollständig abgeschlossen. Hier wird bewusst auf Kundeneinflüsse aus z. B. Kundenbefragungen in den sehr frühen Phasen des Produktlebenszyklus im Rahmen von Marktanalysen der Produktplanung verzichtet.

Direkt verbunden mit der Fertigungsart sind weitere Faktoren, die den PEP beeinflussen. Ein Produkt eines Einzelfertigers wird in der Regel nur einmal hergestellt. In der Praxis zeigen sich dort auch Tendenzen hin zu Verwendung von auftragsübergreifenden Komponenten bzw. Gleichteilen, vor dem Hintergrund von Rationalisierungsbestrebungen. Theoretisch jedoch ist somit jeder Kundenauftrag individuell und losgelöst von bereits entwickelten Produkten zu sehen. Im Gegensatz dazu werden bei Serienfertigern häufig Weiterentwicklungen basierend auf Vorgängermodellen oder Produktserien übergreifende Komponenten und Baugruppen genutzt. Als Folge dieses Unterschiedes ergibt sich, dass in der Serienfertigung bereits in den Konstruktionsmethoden Unterschiede zum Einzelfertiger auftreten können. Gerade in der Automobilindustrie sind häufig so genannte Templates in den eingesetzten CAD Programmen zu finden. Über diese Templates können Strukturen und Geometrien bereits vorgegeben sein, und diese werden im Rahmen der Produktentwicklung spezifisch für das jeweilige zu entwickelnde Produkt angepasst.

Schiffbau

Der Schiffbau und speziell der Megayacht Bereich ist stark auf den Kunden ausgerichtet. Die Eigenschaften eines Einzelfertigers werden durch die außerordentliche Komplexität bei ebenso hoher Individualität des Produktes noch herausgestellt. Im Container- und Tankschiffbereich wurden in der Vergangenheit Knowledge-Based-Engineering-
(KBE-)Ansätze entwickelt. Die starke Funktionsausrichtung dieser Produkte macht dies möglich. Im Megayachtbau setzt sich das eine vom anderen Produkt jedoch so stark ab, dass der Anteil wieder verwendbarer Daten sehr gering ist.

Automobilbau

Der PEP in der Automobilindustrie hat spezielle Charakteristika im Vergleich zu z. B. der Flugzeugindustrie oder der Softwareindustrie in Bezug auf Produktlebenszyklus (Dauer, Art der Nutzung etc.), Produktionszahlen, Randbedingungen des Marktes (Wettbewerbssituation, Marktanteil, nationale und internationale Standorte usw.) [10].

Als Serienfertiger werden die Entwicklungsaktivitäten zu großen Teilen kundenneutral durchgeführt. Entgegen der in der Literatur häufig genutzten Darstellungsweise eines Prozesses mit sequentiell angeordneten Phasen und Aktivitäten weist der Entwicklungs-

prozess in der industriellen Praxis ein hohes Maß an Abhängigkeiten und Parallelisierungen zwischen den Teilprozessen und Aktivitäten auf.

6 Vergleich der Fertigungstypen

Die vorigen Kapitel zeigen, dass Automobil- und Schiffbau trotz unterschiedlicher Fertigungstypen ähnliche Potentiale in ihren PLM-Landschaften aufzeigen. Während in der Automobilindustrie weitgehend ein CAD-Autorensystem vorherrscht, ist die CAx-Landschaft im Schiffbau noch stärker von lokalen Spezial-Anwendungen geprägt.

Ein besonders hervorzuhebender Unterschied ist jedoch der Pool mit Produktdaten, die die Automobilhersteller im Laufe Ihrer Modellentwicklung sammeln konnten. Diese Wissensbasis erlaubt es den PEP eines neuen Fahrzeugs auf die Erfahrungen und die getroffenen Entscheidungen der Vorgänger aufzusetzen. Dies führt zu einer hohen Planungs- und Entscheidungssicherheit. Verlässliche Annahmen können getroffen werden und so Downstream-Prozesse frühzeitig und effektiv einbezogen werden. Mit einer Megayacht entsteht ein komplexes Produkt als Einzelstück. Zwar sind etablierte Konstruktionsmethoden in einer Werft vorhanden, eine Anhäufung von Produktwissen wie bei einem Automobilhersteller ist allerdings aufgrund der Individualität des Produktes nur verlangsamt möglich. Zwischenstände in einer Konstruktion können, wie auch beim Automobilbau nur zu einem Zeitpunkt zu nachfolgenden Prozessen weitergegeben werden können, zu dem eine sichere Basis für weitere Konstruktionsschritte besteht. Nur so können erhöhte durch den Konstruktionsprozess selbst bedingte Änderungszyklen vermieden werden. Anders als im Automobilbau steht zusätzlich zu den in der Konstruktion neu erarbeiteten Informationen aber keine, oder eine durch ein ähnliches Schiff lediglich rudimentäre Wissensbasis zur Verfügung (Bild 4), die zum Erreichen der Konstruktionssicherheit beiträgt. Somit ist der Weg zu den jeweiligen Zwischenergebnissen im Schiffbau länger.

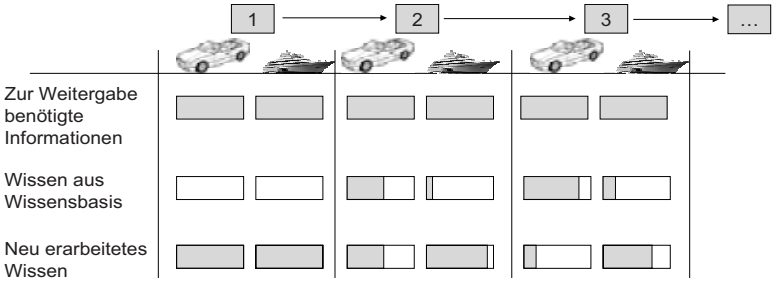


Bild 4: Benötigtes Wissen zur Weitergabe zum nächsten Prozessschritt

Da jeder Einzelprozess jeweils für sich zunächst auf Ergebnisse vorgelagerter Prozesse warten und selbst wieder einen fortgeschrittenen Konstruktionsstand erreichen muss, ergibt sich eine Potenzierung der in den einzelnen Konstruktionsschritten zusätzlich benötigten Zeit. Durch spät eingebrachte Änderungswünsche des Kunden, muss dieser ohnehin schon längere PEP des Einzelfertigers wiederholt und in weit reichenden Schleifen durchlaufen werden. Für die PLM-Strategie und auch für die CAx-Landschaft bedeutet dies im Schiffbau eine Herausforderung beim Parallelisieren der Einzelprozesse und beim Sichern des Produktwissens für spätere Projekte.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Erkenntnis aus dem zuvor aufgeführten Vergleich der beiden Industrien ist der Unterschied im Übertrag von Produktdaten. Während der Automobilbau bei einem Generationswechsel einer Baureihe einen hohen Anteil an Produktdaten und Prozessinformationen als Konstruktionsbasis für die Entwicklung der neuen Fahrzeuge einsetzen kann, einem Yachtbaubetrieb diese Möglichkeit nur in begrenztem Rahmen gegeben (Bild 5). Je höher die Individualität des Produktes, desto geringer wird die Möglichkeit des Einsatzes von Gleichteilen, Konstruktionstemplates oder anderen wieder verwendbaren Produktdaten. Anders ist es bei den Prozessinformationen. Ein großer Anteil der Produktinformationen liegt in den Prozessen. Auch wenn zwei aufeinander folgende Projekte einen geringen Anteil an Überschneidungen im konkreten Produktdatenbereich aufweisen, so ist das Know-how zur Konstruktion einer Yacht in den Methoden des Betriebs vorhanden. Dieses Wissen wird bei Einzelfertigern zumeist durch vielseitige und erfahrene Mitarbeiter bereitgestellt.

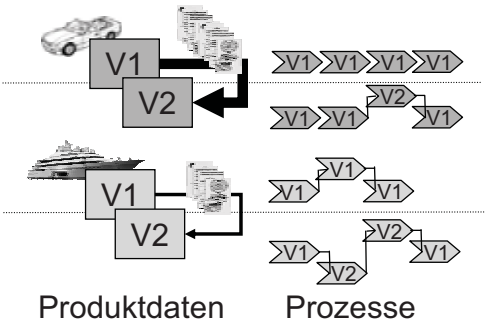


Bild 5: Übertragbarkeit von Produktinformationen

Eine Lösung, dieses Wissen nachhaltig in einem Betrieb zu sichern und verbessert für Nachfolgeprodukte nutzbar zu machen, ist die Erstellung eines Referenzprozesses für den Spezialschiffbau. Dieser, flexibel genug um auf die Individualität der Produkte reagieren zu können, bildet ein Raster für einzelne, gleichbleibende Prozessschritte, welche die Prozessinformationen dauerhaft speichern. Prozessimmanentes Wissen wird aus den einzelnen Gewerken durch einen PDM-Backbone (z.B. [11]) gesammelt und nicht nur für parallelisierte Prozesse im selben Projekt nutzbar gemacht, sondern durch die Funktion des Backbones als Repository auch nachfolgenden Projekten zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise können Produktinformationen als Prozessdaten wiederverwendet werden, was die Entwicklungszeiten und Projektkosten signifikant verbessern wird.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich hinsichtlich der Erstellung flexibler Referenzprozesse für Einzelfertiger, welche es mittels eines Daten-Backbone erlauben nicht nur Produktdaten sondern auch Prozessdaten, welche einen Bestandteil der Produktinformationen ausmachen, für Downstream-Prozesse und nachfolgende Projekte nutzbar zu machen.

Literatur

[1] Bitzer, M., Eigner, M., Vielhaber, M.: *Impacts of Design Process Characteristics on the Selection of PLM Architectures*. In: Proceedings of DESIGN 2008, Dubrovnik, 19.-22.05.08, S. 901-910

[2] Burr, H.: *Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau*. Dissertation, Universität Saarbrücken, Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 44, 2008

[3] Vielhaber, M.: *Assembly Oriented Design*. Dissertation, Universität Saarbrücken, Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 34, 2005

[4] Grienitz, V.: *Technologieszenarien – Eine Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung*. Dissertation, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 151, Paderborn, 2004

[5] Burr, H.; Deubel, T.; Weber, C.; Vielhaber, M.; Haasis, S.: *PLM-Herausforderungen und -Strategien in der Automobilindustrie*. CAD-CAM Report 05/2005, 2005

[6] Eisert, U.; Geiger, K.; Hartmann, G.; Ruf, H.; Schindewolf, S.; Schmidt, U.: *mySAP Product Lifecycle Management: Strategie, Technologie, Implementierung*. Galilieo Press, Bonn, 2001

[7] Vogel, W.: *Auf dem Wege zu einem kohärenten IT-Toolset für integrierte Konstruktions- und Fertigungsabläufe im Schiffbau*. In: Proceedings of Product Life live 2006, Mainz, 07.-08.11.06, S. 37-43

[8] Siemens PLM Software: *Siemens PLM Software - Technologies for Shipbuilding* (interne Darstellung), 2008

[9] Holzbaur, U.: *Entwicklungsmanagement - Mit hervorragenden Produkten zum Markterfolg*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2007

[10] Stauff, I. G.: *Präventive Qualitätssteuerung in der Produktentstehung – Entwicklung eines Steuerungsmodells auf Basis einer Qualitätskostenanalyse im Produktlebenszyklus am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität Halle-Wittenberg; Verlag Dr. Hut, Halle (Saale), 2005

[11] Bergsjö, D.; Burr, H.; Malvius, D.; Malmquist, J.; Vielhaber, M.: *Product Lifecycle Management for Cross-x Engineering Design*. In: Proceedings of ICED 07, Paris, 28.-31.08.07, Paper Nr. 452

Beitrag der Produktentstehung zur Nachhaltigkeit

Rainer Stark, Kai Lindow, Robert Woll, Christian Kind*

Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb,
Fachgebiet Industrielle Informationstechnik PTZ 4, Pascalstr. 8-9, D-10587 Berlin
Email: rainer.stark@tu-berlin.de; Internet: http://www.iit.tu-berlin.de

*Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (Fraunhofer IPK)
Pascalstr. 8-9, D-10587 Berlin
Email: christian.kind@ipk.fraunhofer.de; Internet: http://www.ipk.fraunhofer.de

Inhalt: *Heutige Ansätze, den Produktentstehungsprozess nachhaltig zu gestalten, beschränken sich zumeist auf ökologische und ökonomische Aspekte. Sozial orientierte Aspekte werden ausgeblendet, obwohl Produkte und Prozesse einen unmittelbaren Einfluss auf die Lebensbedingungen heutiger wie zukünftiger Generationen haben. Damit ein Produkt durch seine Eigenschaften eine nachhaltige Entwicklung über den gesamten Lebensweg unterstützt und sicherstellt, sollten die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bereits im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden. Dies erfordert den Einsatz geeigneter Methoden und Werkzeuge. An der Technischen Universität Berlin wurde dazu ein methodischer Ansatz auf Basis von Szenarien und ein Werkzeug für das Kompetenzmanagement von Mitarbeitern eines Unternehmens entwickelt. Mit Hilfe der Szenario-Technik gelingt ein systematischer Blick in die Zukunft, so dass daraus Rückschlüsse auf einen nachhaltigen Produktentstehungsprozess gezogen werden können. Das Kompetenzmanagementwerkzeug unterstützt Projektleiter darin, geeignete Mitarbeiter für bestimmte Prozesse zu ermitteln. Dabei soll das Ziel der geeigneten Qualifikation der Mitarbeiter mit dem Ziel, Mitarbeiter in der Entwicklung ihrer individuellen Kompetenzen zu fördern, abgestimmt werden.*

Abstract: *Various approaches to sustainable product creation primarily address ecological and economical aspects. Social aspects are neglected, even though products and their processes directly influence the living conditions of today's and future generations. As a result, the product properties which are defined during product creation should support and ensure sustainable development throughout their product life cycle. For this purpose, the product creation process requires appropriate approaches and tools. Research conducted at the School of Machine Tools and Factory Management deals, on the one hand, with an approach to sustainable product creation based on scenarios and, on the other hand, with a competence management tool for employees. The systematic look into the future of sustainable products by means of scenarios permits conclusions to be drawn concerning sustainable product creation. In addition, the competence management tool, presented in this paper, supports the project manager's staffing decision of combining both the right qualifications and the individual competence of employees.*

Stichwörter: *Nachhaltigkeit, Produktentstehungsprozess, Szenario-Technik, Kompetenzmanagement*

Keywords: *Sustainability, Product creation process, Scenario planning, Competence management*

1 Einleitung

Um dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung (vgl. [1]) gerecht zu werden, muss die Produktentstehung Produkte hervorbringen, die mit weniger Ressourcen auskommen und zugleich ein Mehr an Nutzen bewirken. Gleichzeitig gilt es vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Produktentstehung, neben dem Produkt an sich auch das zu seiner Wertschöpfung beitragende Umfeld, bestehend aus Markt und Prozessen, über den gesamten Produktlebensweg zu berücksichtigen. Dies erfordert unter Anderem den Einsatz geeigneter Methoden und Werkzeuge.

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin wurde ein Ansatz zur nachhaltigen Produktentstehung entwickelt, der sowohl die soziale Dimension als auch die zur Wertschöpfung erforderlichen Produktionsmittel berücksichtigt. Der Ansatz bedient sich der Szenario-Technik, mit deren Hilfe Zukunftsbilder nachhaltiger Produkte aufgestellt werden, die wiederum Rückschlüsse auf einen angepassten und nachhaltigen Produktentstehungsprozess ermöglichen.

Neben methodischer Vorgehensweise bei der nachhaltigen Produktentstehung, werden Werkzeuge benötigt, die den Entstehungsprozess gezielt unterstützen. Besonders der soziale Aspekt muss hier in die Betrachtung mit einbezogen werden. Ein am IWF entwickeltes Werkzeug zum Kompetenzmanagement dient der Abstimmung des Zieles, Prozesse durch den Einsatz des bestmöglich qualifizierten Personals zu beschleunigen, mit dem konkurrierenden Ziel, auch weniger qualifizierte Mitarbeiter durch herausfordernde Aufgaben in ihrem Lernprozess zu unterstützen.

2 Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit

Die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung definierte 1987 eine nachhaltige Entwicklung als eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen [1]. Auf dieser Grundlage wurden drei Dimensionen für das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung identifiziert: die ökologische, die ökonomische und die soziale Dimension [2].

Die ökologische Dimension umfasst den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen wie Klima, Boden, Wasser und Luft, aber auch die Vielfalt der Arten- und Ökosysteme. Die

Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen auch für nachfolgende Generationen kann, dem Abschlussbericht folgend, nur erreicht werden, wenn die Gesellschaft schonend mit Ressourcen umgeht [2]. Die ökologische Nachhaltigkeit von Produkten und Prozessen definiert sich über deren Emissionen und Ressourcenverbrauch über den gesamten Lebensweg.

Unter der ökonomischen Dimension wird die Zunahme und langfristige Sicherung des Wohlstands der Gesellschaft verstanden. Der Erhalt der Wirtschaft sowie die Sicherung der Wettbewerbs- und Marktfunktionen stellen in diesem Zusammenhang unverzichtbare Ziele dar [2]. Die ökonomische Nachhaltigkeit von Produkten muss differenziert betrachtet werden. Während aus Herstellersicht die Produktionskosten relevant sind, stehen aus Kundensicht die Betriebskosten im Vordergrund [3].

Die soziale Dimension deckt die Forderungen nach zukunftssichernden Lebensstilen und gerechten Verteilungssystemen ab. Besonders die gerechte Verteilung von Wohlstand und Gütern steht hier im Mittelpunkt [2]. Zum einen wird die soziale Dimension der Nachhaltigkeit dadurch bestimmt, wie die Gesellschaft die Auswirkungen von Produkten und Prozessen reflektiert, zum anderen wird diese Dimension vom Wandel der Lebensqualität und der Lebensbedingungen der Gesellschaft beeinflusst.

Eine nachhaltige Entwicklung zeichnet sich dadurch aus, dass alle drei genannten Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigt und miteinander in Einklang gebracht werden. [2]

3 Nachhaltige Produktentstehung

Produkte und Prozesse haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Umwelt und einen mittelbaren Einfluss auf die Lebensbedingungen heutiger und zukünftiger Generationen [4]. Ein nachhaltiges Produkt zeichnet sich dadurch aus, dass es während seines gesamten Lebensweges die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit durch seine Merkmale und Eigenschaften unterstützt und sicherstellt. Im Produktentstehungsprozess (Bild 1) werden die wesentlichen Eigenschaften eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg hinweg weitestgehend festgelegt [4]. Ziel ist es deshalb, die drei Dimensionen des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung in den Produktentstehungsprozess und dadurch auch in das zu entwickelnde Produkt und dessen Lebensweg zu integrieren.

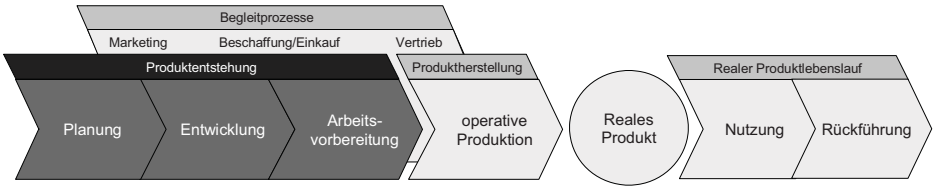


Bild 1: Einordnung des Produktenstehungsprozesses in den allgemeinen Produktlebenszyklus

Unter der Entwicklung nachhaltiger Produkte wird meist nur die Entwicklung ökologisch verträglicher oder ökonomisch erfolgreicher Produkte verstanden. Die soziale Dimension wird in der Regel ausgeblendet. Das Dilemma, was sich bei der Betrachtung der sozialen Dimension herausstellt, ist, dass es bislang keine aussagekräftigen Kriterien gibt, an denen man die soziale Verträglichkeit von Produkten messen kann [3]. So erfolgt eine Bewertung der sozialen Dimension meist indirekt über Rückschlüsse aus der Bewertung der anderen beiden Dimensionen [5]. Das erscheint allerdings nicht zielführend im Sinne des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung. Zukünftig müssen alle drei Dimensionen gleichzeitig und gleichberechtigt berücksichtigt werden.

Bestehende Methoden und informationstechnische Werkzeuge fokussieren in der Regel nur auf eine Bewertung und Verbesserung einzelner Aspekte der Nachhaltigkeit [5]. Darüber hinaus beziehen viele Ansätze zwar den Lebensweg in die Entwicklung nachhaltiger Produkte mit ein, die zur Produktion erforderlichen Produktionsmittel und Produktionsstätten werden bei der gestalterischen Betrachtung jedoch vernachlässigt. Ein ganzheitlicher Ansatz ist somit nicht gegeben.

Indem die nachhaltige Produktentstehung sowohl intern, d.h. Nachhaltigkeitsforderungen beim Entwickeln, als auch extern, d.h. Nachhaltigkeitserfüllung bezogen auf den gesamten Produktlebenszyklus, Zielkriterien der Nachhaltigkeit berücksichtigt, leistet sie einen ganzheitlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung.

4 Methodischer Ansatz auf Basis von Szenarien

4.1 Gestaltungsfeld der Szenarien

Der Gestaltungsraum eines nachhaltigen Produktes grenzt sich durch die Phasen ab, die das Produkt während seines gesamten Lebens durchläuft. Um einen ganzheitlichen Ansatz gerecht zu werden, reicht es jedoch nicht nur aus, den Produktlebenszyklus zu

betrachten, es müssen auch die zur Herstellung des Produktes benötigten Produktionsmittel mit einbezogen werden. Denn ein Produkt kann nur als nachhaltig angesehen werden, wenn es auch nachhaltig hergestellt wird.

Das Gestaltungsfeld, bestehend aus Produkt- und Fabriklebenszyklus, bildet die Grundlage für die Anwendung der Szenario-Technik. Zur Handhabung der Komplexität von realen Produkt- und Fabriklebenszyklen wurde indes ein theoretisches Modell aufgestellt. Betrachtet man den Fabrik- und Produktlebenszyklus als ein ganzheitliches System, so „treffen“ diese in den Phasen der Arbeitsvorbereitung und der Produktion aufeinander (Bild 2). Die Darstellung von Produkt- und Fabriklebenszyklus zeigt, wie eng die jeweiligen Lebensphasen miteinander verknüpft sind, und, dass sie in Wechselwirkung zueinander stehen. Deutlich wird dies in den Phasen der Arbeitsvorbereitung, zum Beispiel anhand der Fertigungsplanung, und der Produktion.

Einflussfaktoren	Dimension
Lebensqualität	sozial
Technikakzeptanz	sozial
Kundengesundheit und -sicherheit	sozial
Produktvarianten	ökonomisch
Nutzungsdauer	ökonomisch
Lebenszykluskosten - Fabrik	ökonomisch
Rohstoffverfügbarkeit und -reichweiten	ökologisch
Funktionalität und Gebrauchstauglichkeit	ökologisch
Emissionen, Abwasser, Abfall	ökologisch
...	...

Bild 2: System aus Produkt- und Fabriklebensweg mit ausgewählten Einflussfaktoren

Ein Gestaltungsfeld stellt, wie auch ein System, einen abgegrenzten Sachzusammenhang mit wirksamen Beziehungen dar, der äußeren Einflussfaktoren unterliegt [6]. Das System aus Produkt- und Fabriklebensweg lässt sich mit Einflussfaktoren, die sich in den jeweiligen Phasen der beiden Lebenszyklen wiederfinden, hinreichend genau für die weitere Betrachtung beschreiben. Weil Aufbau und Funktionsweise des Systems nicht intuitiv erfasst werden können [7], wurden im Rahmen einer Forschungsarbeit über 150 ökonomische, ökologische und soziale Einflussfaktoren identifiziert und in einer Wissensbasis zusammengetragen (Bild 2). Für die effektive Anwendung des hier vorgestellten Ansatzes muss die Wissensbasis, je nach zu entwickelnden Produkt, um technische und technologische Einflussfaktoren erweitert werden.

4.2 Entwickeln nachhaltiger Produkte auf Basis von Szenarien

Die Vorgehensweise zum Entwickeln nachhaltiger Produkte auf Basis von Szenarien stellt Bild 3 übersichtlich dar. Zuerst muss die Wissensbasis um technische produkt- und prozessrelevante Einflussfaktoren erweitert werden. Nach einer qualitativen Bewertung aller Einflussfaktorenpaare mittels Cross-Impact-Analyse[1] lassen sich relevante Einflussfaktoren identifizieren. In der Regel reichen 20 bis 40 Einflussfaktoren aus, um ein System hinreichend genau zu beschreiben. Die tatsächliche Anzahl der ausgewählten Faktoren richtet sich allerdings nach verfügbaren Ressourcen und Fokus des Entwicklungsauftrages. Ausgehend von den relevanten Einflussfaktoren auf das System Produkt- und Fabriklebenszyklus ermöglicht die Szenario-Technik einen in sich konsistenten Blick in die Zukunft.

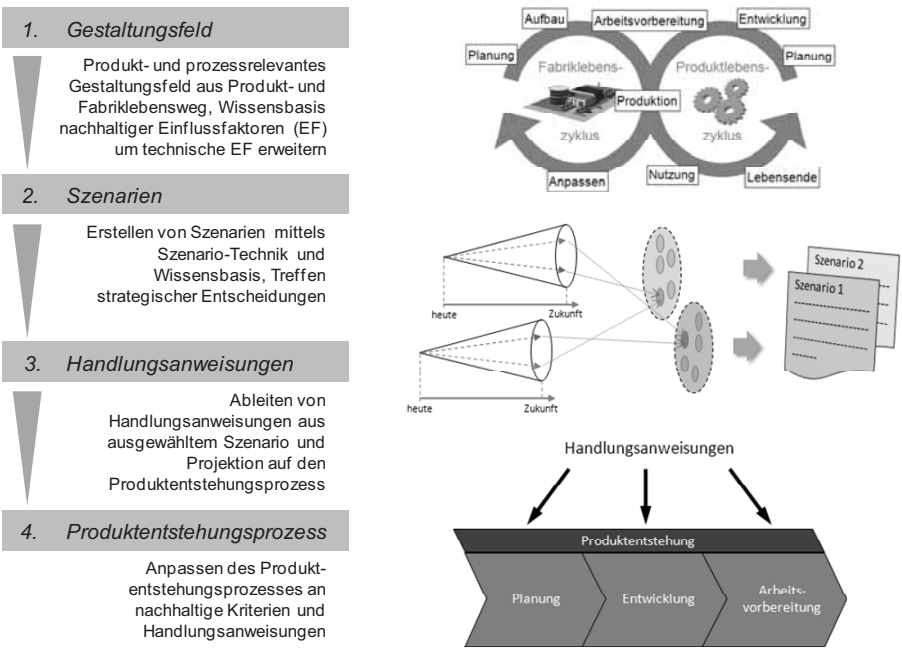


Bild 3: Entwickeln nachhaltiger Produkte auf Basis von Szenarien

[1] Wechselwirkungen der Einflussfaktoren werden anhand von Zahlenwerten definiert und in einer Matrix zusammengetragen. Anhand der Zahlenwerte lassen sich relevante Faktoren bestimmen.

Die Szenario-Technik stellt eine Methode zur strategischen Planung von Produkten und Technologien dar und ist darüber hinaus eine anerkannte Vorgehensweise zum Entwickeln von zukunftsrobusten Entwicklungsstrategien für Unternehmen und globale Gestaltungsfelder. Unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen werden in sich konsistente Zukunftsprojektionen aufgestellt. Aus diesen werden schließlich konsistente Szenarien gebildet. Dabei sollte auf eine Wissensbasis zurückgegriffen werden können, die notwendige Informationen zu den Entwicklungsmöglichkeiten der Einflussfaktoren bereitstellt. [8] [9]

Mit der Anwendung der Szenario-Technik auf das System Produkt- und Fabriklebenszyklus ergeben sich mindestens zwei verbal beschriebene Szenarien, die quantitativ ausgewertet und interpretiert werden müssen. Dazu werden die Auswirkungen der Szenarien auf den Produktentstehungsprozess analysiert und in Form von Handlungsanweisungen festgehalten. Diese können anschließend systematisch auf jeden Schritt der VDI Richtlinie 2221 (Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte [10]) und auf jede Aktivität der integrierten Produktentwicklung [11] projiziert werden. Die Handlungsanweisungen sind immer mehrdimensional zu betrachten: Einerseits verknüpfen sie soziale, ökologische und ökonomische Aspekte der Nachhaltigkeit, andererseits werden die Dimensionen Produkt und Prozess der Produktentstehung berücksichtigt.

Die methodische Vorgehensweise von Produktentstehungsprozessen kann so an nachhaltige Kriterien bzw. Handlungsanweisungen angepasst und der gesamte Produktentstehungsprozess nachhaltig gestaltet werden. Kompromisspotentiale im Produktentstehungsprozess hinsichtlich der Nachhaltigkeit können anhand des beschriebenen Ansatzes identifiziert und zielgerichtet beschrieben und bewertet werden.

Eine Herausforderung zur Weiterentwicklung des Ansatzes stellt neben der Detaillierung des Ansatzes die Informations- und Wissensgenerierung sowie die Informations- und Wissensbereitstellung dar. Der Einsatz bedarfsgerechter informationstechnischer Unterstützung erscheint hier aufgrund des hohen Datenaufkommens als unvermeidlich. Darüber hinaus können in den unterschiedlichen Handlungsanweisungen Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen Interessensgruppen auftreten. Weitere Forschungsaktivitäten sollten einerseits darauf abzielen, die Handlungsanweisungen in Zusammenarbeit mit allen am Produktlebensweg beteiligten Akteuren zu detaillieren und zu konkretisieren. Andererseits bietet es sich an, eine

systematisierte Wissensbasis für die identifizierten Einflussfaktoren zu entwickeln und aufzubauen.

5 Werkzeug für das Kompetenzmanagement

Das Konzept zur Unterstützung des Kompetenzmanagements wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden erarbeitet und in Form eines Software-Prototyps umgesetzt. Datentechnische Grundlage stellt die Abbildung von Fach- und Sozialkompetenzen einzelner Mitarbeiter dar. Für jeden Mitarbeiter kann ein Ist- und ein Soll-Kompetenzprofil angelegt werden. Das Ist-Kompetenzprofil beschreibt die gegenwärtigen Kompetenzen eines Mitarbeiters, wohingegen das Soll-Kompetenzprofil beschreibt, welche Kompetenzen ein Mitarbeiter in Zukunft haben soll. Welche dies genau sind, ergibt sich aus den individuellen Wünschen eines Mitarbeiters in Abstimmung mit dem erwarteten Kompetenzbedarf des Unternehmens und wird üblicherweise in Einzelgesprächen zwischen Mitarbeitern und ihren Vorgesetzten ermittelt.

Da ein Soll-Kompetenzprofil eines Mitarbeiters eine Weiterentwicklung gegenüber seinem Ist-Kompetenzprofil darstellt, muss dieses in jeder einzelnen Kompetenz mindestens gleich stark oder stärker ausgeprägt sein. Aus dem Delta zwischen diesen beiden Profilen ergibt sich der Entwicklungsbedarf für einen Mitarbeiter. Diesen Bedarf ermitteln zu können, ist eine der Zielstellungen des vorgestellten Werkzeuges.

Eine weitere Zielstellung ist es, für einen Prozess die am besten geeigneten Mitarbeiter ermitteln zu können. Eine Grundannahme dabei ist, dass die Dauer, die Kosten und die Qualität der Ergebnisse eines Prozesses von der Qualifikation der Mitarbeiter abhängen, von denen sie durchgeführt werden. Für jede Aktivität innerhalb eines Prozesses kann ein Kompetenzprofil definiert werden, welches den Kompetenzbedarf dieser Aktivität beschreibt. Aus dem Vergleich dieses Profils mit dem Ist-Kompetenzprofils eines Mitarbeiters werden die zu erwartenden Kosten sowie die zu erwartende Dauer und Qualität abgeleitet. Verschiedene Zuordnungen von Mitarbeitern zu einem Prozess können anhand dieser Werte verglichen werden.

Um für eine gegebene Zuordnung von Mitarbeitern zu einem Prozess ermitteln zu können, welche Bearbeitungsdauer und welche Kosten zu erwarten sind, kann für die Prozessdurchführung mithilfe des vorgestellten Werkzeuges eine Simulation durchgeführt werden, welche die Dauer und Kosten jeder einzelnen Aktivität in Abhängigkeit ihres

Kompetenzbedarfsprofils und dem Ist-Kompetenzprofil des jeweils zugeordneten Mitarbeiters berechnet. Auf diese Art und Weise können verschiedene Zuordnungen von Mitarbeitern zu einem Prozess leicht bewertet und verglichen werden.

Die Zielstellung, einen Prozess nur Mitarbeiter mit ausreichend hohen Ausprägungen der benötigten Kompetenzen zuzuordnen, kann zwar zu einer höheren Effizienz führen, bringt aber auch den Nachteil mit sich, dass die Mitarbeiter relativ wenig dazu lernen können, da sie das nötige Wissen bereits besitzen. Ein Bestandteil einer geeigneten Personalentwicklungsstrategie ist deshalb auch der Einsatz weniger kompetenter Mitarbeiter an der Seite kompetenter, erfahrener Mitarbeiter, damit sie neues Wissen in der Praxis sammeln zu können. Diese Strategie steht aber mit der Zielstellung einer reinen Optimierung der Prozesseffizienz im Widerspruch. Deshalb ist die dritte Zielstellung des vorgestellten Kompetenzmanagementsystems, eine Entscheidungshilfe zu entwickeln, die dabei hilft, diese beiden Interessenslagen in Einklang zu bringen. Eine solche Lösung ist noch nicht in das Kompetenzmanagementsystem integriert worden, soll aber aufgrund ihres hohen Potentials in weiteren Forschungsvorhaben erarbeitet werden. Grundlage soll dabei eine Bewertungsfunktion bilden, die in Abhängigkeit von Gewichtungen unterschiedliche Konstellationen von Zuordnungen von Mitarbeitern zu Prozessen bewertet. Bei der Gewichtung muss abgewägt werden, ob und wie stark für einen bestimmten Prozess die Mitarbeiterentwicklung zu Lasten der Prozesseffizienz gefördert werden soll.

Die Zuordnung möglichst hoch qualifizierter Mitarbeiter zu einem Prozess, zielt mit Zeit, Kosten und Qualität auf Faktoren der ökonomischen Nachhaltigkeitsdimension ab, während die Personalentwicklung mit der Qualifikationsförderung die soziale Nachhaltigkeitsdimension berücksichtigt. Da die Zuordnung von Mitarbeitern zu einem Prozess keine direkte Auswirkung auf die ökologische Dimension hat, kann durch die Abwägung der beiden zuerst genannten Zielstellungen eine im Sinne der Nachhaltigkeit ganzheitliche Entscheidungsfindung unterstützt und somit ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung geleistet werden.

6 Ausblick

Die Fortführungen der beschriebenen Forschungsarbeiten sind schon jetzt auf eine Erweiterung des Fokus auf Ganzheitlichkeit und Nachhaltigkeit ausgerichtet. Offen sind

jedoch noch Fragestellungen, wie die Produktentstehung insgesamt verändert werden muss, um alle Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung und gleichzeitig die weitgehend vollständige Betrachtung miteinander verflochtener Produkt- und Fabriklebenswege gezielt zu berücksichtigen. Eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung nachhaltiger Produkte an das System Produkt- und Fabriklebensweg stellt die Wissensgenerierung und Wissensbereitstellung dar. Lösungsansätze sollen in dem am IWF geplanten Sonderforschungsbereich 809 „Nachhaltige industrielle Wertschöpfungsnetze“ erarbeitet werden.

Literatur

[1] World Commission on Environment and Development: *United Nations General Assembly: Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.* Nairobi: 1987

[2] N.N.: *Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung.* Deutscher Bundestag 13. Wahlperiode: Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“. 26.06.1998

[3] Finkbeiner, M.: *Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten und Prozessen - vom Leitbild zur Umsetzung.* Internationales Produktionstechnisches Kolloquium, Technische Universität Berlin, Berlin: 2007

[4] Stölting, W.: Lebenszyklusorientierte strategische Planung von Remanufacturing-Systemen für elektr(on)ische Investitionsgüter. VDI Verlag, Düsseldorf: 2006

[5] Herrmann, C.; Bergmann, L.; Halubek, P.; Stehr, J.; Thiede, S.: *Life Cycle Engineering – State of the Art and Research Perspectives.* 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering 2008, The University of New South Wales, Sydney, Australia: 2008

[6] Wilms, F.E.P. [Hrsg.]: *Szenariotechnik - Vom Umgang mit der Zukunft.* Haupt Verlag, Bern Stuttgart Wien: 2006

[7] Daenzer, W.: *Systems Engineering – Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben.* Verlag Industrielle Organisation, Zürich: 1987

[8] Gausemeier, J.: *Szenario-Technik als Werkzeug nachhaltiger Unternehmensentwicklung.* 12. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium, Technische Universität Berlin, Berlin: 2007

[9] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: *Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien*. Hanser Fachbuch, 2. bearbeitete Auflage, München: 1996

[10] Richtlinie VDI 2221. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.* VDI Gesellschaft Entwicklung und Konstruktion Vertrieb: Mai 2005

[11] Schäppi, B.; Andreasen, H. M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F.-J. [Hrsg.]: *Handbuch Produktentwicklung*. Carl Hanser Verlag, München Wien: 2005

[12] Krause, F.-L.; Hayka, H.; Kind, C.; Rothenburg, U.: *Nachhaltigkeit durch virtuelle Produktentwicklung*. 12. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium, Technische Universität Berlin, Berlin: 2007

Pattern Languages als Framework zur Erstellung eines Entwicklungsleitfadens

Jörg Feldhusen, Frederik Bungert

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen
Email: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de; bungert@ikt.rwth-aachen.de;
Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

Inhalt: *Pattern Languages sind ein in den siebziger Jahren in der Architektur entwickeltes Konzept zur Strukturierung und Bereitstellung von archetypischem Lösungswissen. Obwohl Pattern Languages seit den neunziger Jahren eine weite Verbreitung in der Informatik erfahren haben, ist das Konzept in der Produktentwicklung bisher weitgehend unbekannt. Vor diesem Hintergrund diskutiert der vorliegende Beitrag die Anwendung von Pattern Languages zur methodischen Erschließung der Produktentwicklung. Insbesondere die unternehmensindividuelle Aufbereitung von produkt- und technologiespezifischem Lösungswissen in Form eines Entwicklungsleitfadens steht dabei im Fokus der Betrachtungen.*

Abstract: *Pattern Languages have been developed in the 70s as an approach to capture and provide archetypal solution knowledge. Although this concept has been extensively applied to computer sciences, it was barely noticed in engineering sciences. This contribution discusses a pattern-based holistic methodology for product development and describes according engineering guidelines in detail.*

Stichwörter: *Pattern Language, Wissensmanagement, Entwicklungsleitfaden*

Keywords: *Pattern Language, Knowledge Management, Engineering Guidelines*

1 Einleitung

Ein Schlüssel zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens liegt in der kontextgerechten Verfügbarkeit von Wissen. Aus diesem Grunde werden in der Praxis der Produktentwicklung häufig sog. Entwicklungs- oder Konstruktionsleitfäden eingesetzt. Ein Entwicklungsleitfaden bezeichnet im Allgemeinen eine indizierte Sammlung von unternehmensspezifischem Konstruktionswissen. Entwicklungsleitfäden können zwar in Papierform realisiert werden, den Stand der Technik definieren aber CM-Systeme (Content Management), die einen Web-basiert Zugriff erlauben und die Erstellung der Inhalte durch Templates vereinfachen.

Während CM-Systeme geeignet sind, die im Rahmen der Implementierung eines Entwicklungsleitfadens auftretenden Anforderungen zu erfüllen, ist die Strukturierung der

Inhalte häufig mit Problemen verbunden. In Abhängigkeit von Benutzer und Anwendungsfall treten unterschiedliche Informationsbedürfnisse auf, denen die Struktur des Entwicklungsleitfadens Rechnung tragen muss. Beispielsweise kann ein Entwicklungsleitfaden prozessorientiert oder produktorientiert strukturiert werden. Eine prozessorientierte Struktur eignet sich eher als Orientierungshilfe für unerfahrene Entwickler, während eine produktorientierte Struktur die gezielte Lösung singulärer Probleme unterstützt. Darüber hinaus sind weitere Arten der Strukturierungen denkbar. Die Auswahl einer geeigneten Struktur ist aber problematisch, da hierbei stets nur eine beschränkten Menge von Bedürfnissen erfüllt wird, während andere Bedürfnisse unberücksichtigt bleiben müssen. An dieser Stelle bieten Pattern Languages als Framework zur Erstellung eines Entwicklungsleitfadens eine Lösung.

2 Pattern Languages

2.1 Historie

Pattern Languages wurden ursprünglich in den siebziger Jahren durch den Architekten Christopher Alexander entwickelt. Ziel war es, „archetypisches“ (in Urform vorliegendes) Gestaltungswissen aus dem Bereich der Architektur in einfacher Form zu dokumentieren und sowohl für Architekten als auch Bauherren nutzbar zu machen [1] [2] [3]. 1987 wurde dieser Ansatz von Beck und Cunningham im Rahmen eines Experiments aufgegriffen, um objektorientierte Softwarekonzepte für Anwendungsexperten ohne hinreichende Programmierkenntnisse begreifbar zu machen [4]. In der darauf folgenden Dekade wurden zahlreiche weitere Pattern Languages zu mannigfaltigen Themenstellungen aus der Informatik entwickelt, so dass der Ansatz heutzutage in diesem Bereich weit verbreitet ist. Weitere Pattern Languages wurden zu Problemen der Betriebswirtschaft und Erziehungswissenschaften entwickelt. Sogar Pattern Languages über die Erstellung einer Pattern Language existieren

2.2 Konzeption

Als Bestandteile einer Pattern Language beschreiben Pattern jeweils zu einem wiederkehrenden Problem die anwendungsinvarianten Eigenschaften gültiger Lösungen. Durch Herstellung eines Anwendungsbezugs lassen sich hieraus konkrete Lösungen

ableiten. Zusätzlich sind die Patterns untereinander problemorientiert verknüpft, d.h. es existieren so genannte konstituierende Verweise zwischen Pattern, deren Probleme und Lösungen einander bedingen und vervollständigen.

Pattern besitzen eine einheitliche Struktur, welche Art, Anordnung und Erscheinungsbild der einzelnen Inhaltsbestandteile definiert. Darüber hinaus sind die Inhalte eines Pattern aber entsprechend dem jeweils dargestellten Sachverhalt frei formulierbar.

3 Pattern Languages in der Produktentwicklung

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.1 erwähnten Fachgebieten sind Pattern Languages in der Produktentwicklung noch weitgehend unbekannt. Die Ähnlichkeit dieser Gebiete mit der Produktentwicklung legt jedoch die These nahe, dass das Konzept der Pattern Languages für die Entwicklung mechanischer und mechatronischer Produkte ebenso geeignet ist. Dementsprechend treibt das Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt) der RWTH Aachen die Entwicklung einer PLM-Pattern Language voran [5] [6] [7] [8]. Dieser Ansatz verfolgt das Ziel der Entwicklung einer PLM-Methodik, um damit einerseits einen methodischen Bezug zum übergeordneten Bereich der Betriebswirtschaft herzustellen und andererseits vorhandene Methodiken aus dem Bereich der Produktentwicklung, wie beispielsweise die Konstruktionsmethodik, zu integrieren.

Nach Pahl/Beitz formuliert eine Methode Handlungsanweisungen zur Erreichung eines bestimmten Ziels. Eine Methodik wiederum ist als ein planmäßiges Vorgehen gemäß einem System von handlungsorientiert zueinander in Relation gesetzten Methoden definiert. Demnach erfordert eine Methodik einen expliziten Bezug der Methoden zueinander. Während dieser Bezug in der Konstruktion durch die chronologische Reihenfolge der Anwendung der Methoden gegeben ist, kann eine zeitliche Ordnung der PLM-Methoden nicht eindeutig bestimmt werden.

Hier bieten Pattern Languages einen Lösungsansatz: Gemäß obiger Definition kann jedes Pattern als eine Methode interpretiert werden. Eine Pattern Language stellt somit eine Methodik dar. Zugleich erfordert eine Pattern Language aufgrund ihrer problemorientierten Struktur keine chronologische Ordnung der Pattern (hier: Methoden).

4 Erstellung eines Entwicklungshandbuches

Eine Methodik verbessert generell aufgrund des systematischen Transfers von Anwendungswissen in die Praxis die Effizienz der abgeleiteten Handlungen und steigert durch die Förderung von zielorientiertem Verhalten die Effektivität dieser Handlungen. Daher bietet jede Methodik und folglich insbesondere die in Kapitel 2 vorgestellte Pattern Language per se einen Mehrwert in der praktischen Anwendung. Darüber hinaus ist es möglich, den Nutzen des Pattern-Konzeptes für ein einzelnes Unternehmen durch unternehmensspezifische Erweiterungen zu steigern und zugleich das Problem der eindeutigen und vollständigen Strukturierung von Sachverhalten zu lösen, welches gewöhnlich bei der Erstellung eines herkömmlichen Entwicklungshandbuches auftritt. Eine derartige Erweiterung, welche auf einer Individualisierung bestehender Pattern durch Relativierung der zu Grunde liegenden Archetypen basiert und mittels eines Schichtenkonzepts algemeingültiges mit unternehmens- und mitarbeiterspezifischem Wissen verknüpft, wird im Folgenden erörtert.

4.1 Ausgangssituation

Übliche Probleme eines herkömmlichen Entwicklungshandbuches sind zurückzuführen auf die Auswahl und die Erstellung der *primären Zugriffsstruktur*. Dies ist eine Zugriffsstruktur, welche dem Benutzer einen wahlfreien (d.h. direkten und von einer Historie unabhängigen) Zugriff auf die jeweils relevanten Inhalte ermöglicht und darüber hinaus die physische Ordnung der Inhalte innerhalb des Entwicklungshandbuches bestimmt. Um den Zugriff auf sämtliche Inhalte zu gewährleisten, ist eine primäre Zugriffsstruktur *dichtbesetzt*, d.h. sie indiziert jedes Inhaltselement [9].

Bei der Erstellung der primären Zugriffstruktur ist eine Entscheidung über die Art dieser Struktur zu treffen. Hier stehen grundsätzlich verschiedene Zugriffsstrukturen zur Disposition (z.B. funktions-, konstruktions-, oder fertigungsorientiert). Die Festlegung auf eine dieser Alternativen birgt in der Praxis insofern Konfliktpotential, als der Benutzer zum Zugriff auf die Inhalte des Entwicklungsleitfadens mittels der primären Zugriffstruktur zum aktuellen Kontext herstellt. Daher sind die Präferenzen für eine bestimmte Zugriffsstruktur stark vom jeweiligen Benutzer abhängig.

Eine in der Praxis häufig auftretende Problemquelle ist darüber hinaus die Auswahl einer inhaltlichen Gliederung, die zu einer *dünnbesetzten* (nicht alle Inhaltselemente

indizierenden /SCHN04/) Zugriffsstruktur führt. Obwohl eine solche Entscheidung im Einzelfall unter fachlichen Gesichtspunkten vorteilhaft erscheint, würden dadurch manche Inhalte vom direkten Zugriff ausgeschlossen.

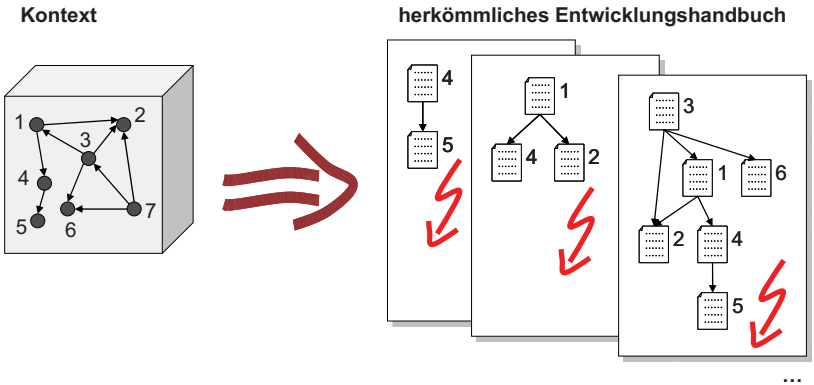


Bild 1: Erstellung der primären Zugriffsstruktur eines herkömmlichen Entwicklungshandbuches

Ein weiteres Problem nach der Auswahl des Typs der primären Zugriffsstruktur (siehe oben) betrifft den Aufbau dieser Struktur in Abhängigkeit des in Form eines *Kontextgraphs* vorliegenden Kontextes (Bild 1). Um einen wahlfreien Zugriff zu ermöglichen, muss der Kontextgraph in eine Baumstruktur überführt werden. Je Wahl des Wurzelknotens werden dabei aber nicht alle Kontexte erfasst (Bild1, rechts). Zwar ist es vergleichsweise unproblematisch, anhand eines (wie in Bild 1, links) konkret vorliegenden Graphs einen geeigneten Wurzelknoten zu bestimmen, allerdings ist die abzubildende Kontextstruktur im Gegensatz dazu in der Praxis gewöhnlich nicht bereits im Vorfeld bekannt.

4.2 Individualisierung von Archetypen durch Relativierung

Zur Lösung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Probleme bieten sich Pattern Languages an. Allerdings steht das den Pattern Languages zu Grunde liegende Konzept archetypischer Lösungen einer unternehmensspezifischen Repräsentation von Wissen entgegen. Um das ursprüngliche Konzept der Pattern Languages auf konkrete Anwendungsszenarien zu übertragen ist daher zunächst eine unternehmens- oder mitarbeiterspezifische Individualisierung von Archetypen durch sukzessive Relativierung derselben erforderlich.

Obwohl ein Archetyp definitionsgemäß generell ein urtümliches, generisches und damit unabhängig vom Anwendungszusammenhang und zeitlichen Bezug gültiges Konzept darstellt, bezieht sich der Referenzcharakter eines konkreten Archetyps stets auf eine bestimmte Domäne. Durch diesen Domänenbezug findet jeweils sowohl eine logische als auch eine zeitliche Relativierung der universellen Gültigkeit der Archetypen statt.

Führt man die Relativierung von Archetypen konsequent fort, so ergibt sich eine stärkere Individualisierung, d.h. Restriktion des Gültigkeitsbereiches. Gleichzeitig lassen sich in zunehmendem Maße auch nur in einem bestimmten Bereich gültige Konzepte als Archetypen auffassen. Insbesondere können unternehmensspezifische Urbilder als Archetyp interpretiert werden [6].

Analoge Betrachtungen lassen sich für die Mengen der gültigen Archetypen aus Sicht verschiedener Mitarbeiter oder Gruppen von Mitarbeitern eines Unternehmens anstellen [6].

Während die nicht relativierten Archetypen zum Grundwissen jedes Mitarbeiters gehören (sollten), begründen unternehmensindividuelle Archetypen den spezifischen Wettbewerbsvorsprung eines Unternehmens. Mitarbeiterspezifische Archetypen wiederum stellen ein unerschlossenes Potential dar. Für Archetypen jedes Individualisierungsgrades ist somit ein Konzept zur Dokumentation und darauf aufbauenden innerbetrieblichen Verbreitung des zu Grunde liegenden Wissens erforderlich.

4.3 Strukturierung und Kontextbezug

Das ursprüngliche Konzept der Pattern Langauges kann mit Hilfe eines Schichtenkonzeptes derart erweitert werden, dass neben generischem archetypischen Lösungswissen auch gemäß dem in Abschnitt 4.2 erläuterten Ansatz der Relativierung von Archetypen unternehmens- und mitarbeiterindividuelles archetypisches Lösungswissen in einem patternbasierten Entwicklungsleitfaden integrierbar ist [6]. Hierdurch lassen sich die Probleme hinsichtlich der Erstellung der primären Zugriffsstruktur eines Entwicklungshandbuches (Abschnitt 4.1) lösen.

Eine Pattern Language stellt eine primäre Zugriffsstruktur dar: Einerseits ist durch die konstituierenden Verweise einer Pattern Language und darüber hinaus die durchgängig definierte inhaltliche Gliederung jedes Pattern die physische Ordnung der Inhalte festgelegt. Andererseits ist die durch eine Pattern Language dargestellte Zugriffsstruktur dichtbesetzt. Dies liegt im hierarchischen Aufbau einer Pattern Language und der damit

zusammenhängenden Verschachtelung von Eingangs- und resultierenden Kontexten der Pattern begründet.

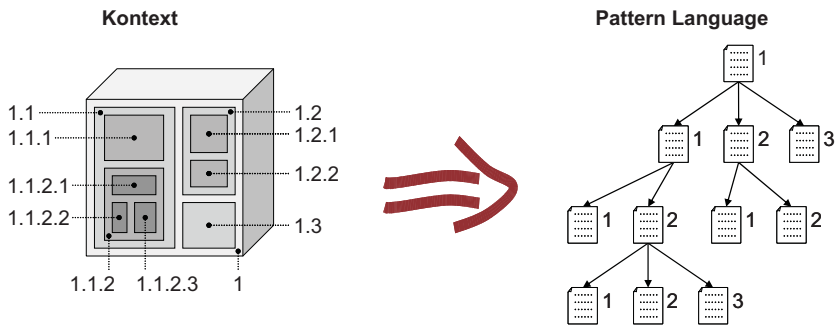


Bild2: Ableitung der Struktur einer Pattern Language

Zur Erstellung eines pattern-basierten Entwicklungshandbuches wird dessen Struktur ausgehend von einem maximal umfänglichen Kontext und einem zugehörigen Wurzelpattern, zunächst in Top-Down-Richtung aufgebaut. Dieses Vorgehen entspricht einer „Entfaltung“ der ineinander verschachtelten Kontextcluster, aus der eine „natürliche Ordnung“ der Inhaltselemente resultiert (Bild 2). Im Gegensatz zur Erstellung einer primären Zugriffsstruktur auf Basis eines Kontextgraphs (Abschnitt 4.1) ist durch den maximal umfänglichen Kontext insbesondere ein Wurzelknoten (hier: Wurzelpattern) eindeutig bestimmt, so dass die erläuterten Probleme der Überführung eines Kontextgraphs in eine unvollständige Zugriffsstruktur (Bild 1) vermieden werden.

Durch Ergänzung so genannter sekundärer Verweise einer Pattern Language lassen sich auch nicht-lösungsbezogene (z.B. funktions-, konstruktions-, fertigungs-, modulorientierte, oder chronologische) Beziehungen zwischen verschiedenen Kontexten (vgl. Bild 1, links) darstellen und in ein Entwicklungshandbuch integrieren (Bild 3). Dabei ist es sogar möglich, verschiedene sich bei Verwendung eines herkömmlichen Entwicklungshandbuches ausschließende Arten der Strukturierung zu berücksichtigen und somit den heterogenen Anforderungen der Nutzer diesbezüglich zu entsprechen.

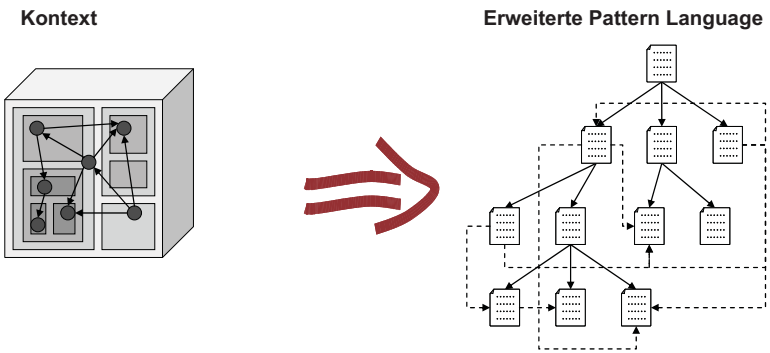


Bild 3: Erweiterung einer Pattern Language um kontextbezogene sekundäre Relationen

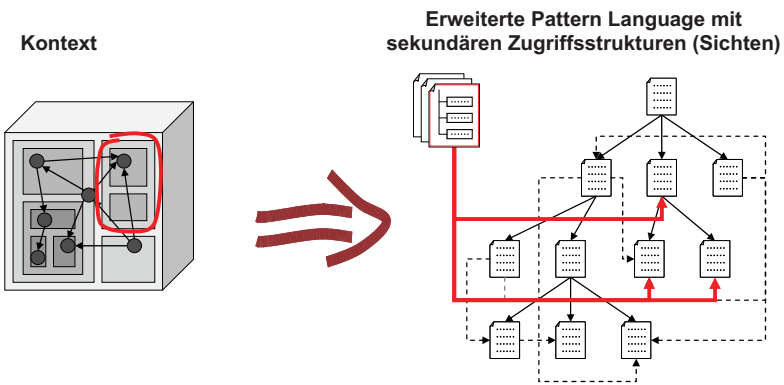


Bild 4: Realisierung von spezifischen Sichten mittels sekundärer Zugriffsstrukturen

Liegt für ein Entwicklungshandbuch bereits eine primäre Zugriffstruktur vor, so können beliebige sekundäre (d.h. zusätzliche, möglicherweise dünnbesetzte) Zugriffstrukturen ergänzt werden (Bild 4). Hiermit ist es beispielsweise möglich, durch die isolierte Abbildung einzelner Kontextcluster oder die Verknüpfung ausgewählter Inhalte verschiedener Kontextcluster, einzelnen Nutzern oder Nutzergruppen individualisierte Sichten zur Verfügung zu stellen. Insbesondere das eingangs erwähnte Problem dünnbesetzter, aufgrund fachlicher Erwägungen aber erwünschter Zugriffsstrukturen lässt sicht durch die Realisierung in Form einer Sicht lösen.

5 Technische Umsetzung

Da in einem sich kontinuierlich wandelnden betrieblichen Umfeld papierbasierte Handbücher erfahrungsgemäß zu einer rasch nachlassenden Aktualität der Inhalte führen, bieten sich webbasierte CMS (Content-Management-Systeme) als Alternative an. Aktualisierungen oder Ergänzungen von Inhalten werden durch ein CMS nach erfolgter Freigabe unmittelbar wirksam, so dass lediglich ein unerheblicher zeitlicher Verzug zwischen Eingabe und Verfügbarkeit von Inhalten besteht.

Zur CMS-basierten Implementierung eines Entwicklungsleitfadens sind statische Inhalte ausreichend, sofern lediglich unternehmensspezifische Pattern verwendet werden. Mitarbeiterspezifische Pattern erfordern jedoch hybride (statische und dynamische) Inhalte, da in diesem Fall in Abhängigkeit vom jeweiligen Benutzer bzw. seiner Gruppenzugehörigkeit die entsprechenden Pattern und Konkretisierungs-Relationen anzuzeigen oder auszublenden sind. Gleiches gilt für sekundäre Relationen zwischen Pattern einer benutzerspezifischen Schicht und Pattern der Unternehmens- oder der generischen Schicht.

In ähnlicher Weise können sekundäre Zugriffsstrukturen (vgl. Bild 4) für bestimmte Benutzer oder Benutzergruppen zugreifbar gemacht oder verborgen werden. Alternativ ist die Implementierung einer Selektionsvorrichtung – beispielsweise in Form einer Liste – denkbar, welche dem Benutzer jederzeit eine autonome Auswahl der zu verwendenden Sicht erlaubt.

Da die primäre Zugriffsstruktur die physische Ordnung der Inhalte eines Entwicklungshandbuches festlegt, kann es bei der Aktualisierung der primären Zugriffsstruktur allerdings zu Inkonsistenzen innerhalb der sekundären Zugriffsstrukturen kommen. Abhilfe schaffen hier folgende Maßnahmen:

- Minimierung von Überschneidungen zwischen den Bereichen, welche durch eine sekundäre Zugriffsstruktur referenziert werden
- Vorrangige Aufnahme von fixen Inhalten in die sekundären Zugriffsstrukturen
- Referenzierung der primären Zugriffsstruktur durch ein fixes Regelwerk

6 Zusammenfassung

Pattern Languages bieten große Potentiale zur methodischen Erschließung der Produktentwicklung über die Konstruktionstechnik hinaus. Der im vorliegenden Beitrag beschriebene, auf der Relativierung von Archetypen basierende Ansatz, macht Pattern Languages darüber hinaus für die Erstellung unternehmensspezifischer Entwicklungshandbücher geeignet. Hierdurch lassen sich die bei der Entwicklung herkömmlicher Entwicklungshandbücher auftretenden Probleme, welche mit der Entwicklung einer primären Zugriffsstruktur in Zusammenhang stehen (verschiedene zur Disposition stehende Arten, unter fachlichen Gesichtspunkten vorteilhaft, aber dünnbesetzt; Aufbau in Abhängigkeit eines nicht explizit bekannten Kontextgraphs), lösen.

Literatur

[1] Alexander, C.; Silverstein, M.; Angel, S.; Ishikawa, S. and Abrams, D.: *The Oregon Experiment*. New York: Oxford University Press, 1975

[2] Alexander, C.; Ishikawa, S. and Silverstein, M.: *A Pattern Language*. New York: Oxford University Press, 1977.

[3] Alexander, C: *The Timeless Way of Building*. New York: Oxford University Press, 1979.

[4] Beck, K.; Kunningham, W.: Using Pattern Languages for Object-Oriented Programs. Technical Report CR-87-43, Tektronix, Inc., September 17, 1987, Presented at the OOPSLA'87 workshop on Specification and Design for Object-Oriented Programming, 1987.

[5] Feldhusen, J.; Bungert, F.: *Towards 'The Timeless Way of Product Lifecycle Management'*. In Krause, F.-L. (ed.): Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Berlin, u.a.: Springer, S. 555-564, 2007.

[6] Feldhusen, J.; Bungert, F.: PLM Pattern Language: An Integrating Theory of Archetypal Engineering Solutions. In Takata, S.; Umeda, Y. (ed.): Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE), London: Springer, S. 125-130, 2007.

[7] Feldhusen, J.; Bungert, F.: Pattern Languages: An Approach to Manage Archetypal Engineering Knowledge. In: Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED '07), S. 581-582, 2007.

[8] Feldhusen, J.; Bungert, F.: A Pattern-Based Methodology for Product Lifecycle Management. In: Proceedings of the 5th International Conference on Product Lifecycle Management (PLM '08), Seoul, 2008.

[9] Schneider, M.: Implementierungskonzepte für Datenbanksysteme. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.

Gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten - Verantwortung und Einfluss seitens der Produktentwicklung

Dirk Hanusch, Herbert Birkhofer

Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt
Magdalenenstr. 4, D-64289 Darmstadt
Email: hanusch@pmd.tu-darmstadt.de; Internet: http://www.pmd.tu-darmstadt.de

Inhalt: *Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung beruht auf den drei Dimensionen ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Nachhaltigkeit. Während Unternehmen bisher ihren Fokus auf ökonomische und ökologische Aspekte gelegt haben, wird durch die angestrebte Veröffentlichung eines Leitfadens zur gesellschaftlichen Verantwortung von Organisationen eine Entwicklung angestoßen, welche vermehrt auch soziale Belange ins Blickfeld von Unternehmen rückt. Kriterien für die gesellschaftlich nachhaltige Gestaltung des Kerngeschäfts durch nachhaltige Produkte weisen jedoch nur mittelbaren Produktbezug auf. Konstruktive Maßnahmen haben folglich nur einen geringen Einfluss auf die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten. Dennoch ist es seitens der Produktentwicklung notwendig, Nachhaltigkeitskriterien an das Produkt aufzunehmen und in den Produktentstehungsprozess zu integrieren, da diese die Basis für nachfolgende Entscheidungen und Prozesse bilden.*

Abstract: *The concept of sustainable development is founded on the three dimensions economical, ecologal and social sustainability. Whereas companies direct their focus on economical and ecological aspects, the planned publication of a guideline on social responsibility of organisations triggered a development that is bringing social issues into the view of companies. Criteria for socially sustainable core business by sustainable products show only indirect product reference. Hence, constructional measures have only a limited influence on the social sustainability of products. Nevertheless, the product development has to collect and integrate sustainability criteria into the product creation process because they are the basis for subsequent decisions and processes.*

Stichwörter: *Gesellschaftliche Nachhaltigkeit, Unternehmerische Verantwortung, Produktentwicklung.*

Keywords: *Social sustainability, corporate responsibility, engineering design*

1 Einleitung

In Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft wird in der Diskussion der letzten Jahre vermehrt die Verantwortung der Industrie für eine nachhaltige Entwicklung hervorgehoben. Die Einführung von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen, das Aufgreifen seitens der Wissenschaft vorgeschlagener Methodiken und ganzheitlicher Ansätze wie z. B. Life-Cycle-Costing oder EcoDesign weisen auf die ökonomischen und ökologischen

Bemühungen von Unternehmen zur Wahrnehmung ihrer Verantwortung hin. Im Produktentstehungsprozess besteht nach derzeitigem Stand der Dinge die Herausforderung darin, ein Produkt zu entwickeln und zu produzieren, das Kundenwünsche möglichst gut erfüllt, zugleich durch Umsatz und Gewinn die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens sichert und durch Schonung der Umwelt die Lebensgrundlage nachfolgender Generationen erhält. Es sind also kunden- und unternehmenseigene sowie umweltbezogene Anforderungen in einem Produkt bestmöglich miteinander zu vereinen.

Ausgehend von der umfassenden Definition von Nachhaltigkeit, wonach eine nachhaltige Entwicklung auf ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Aspekten basiert, stellt sich jedoch die Frage, ob zukünftig auch die gesellschaftliche Nachhaltigkeit eine stärkere Rolle in den Nachhaltigkeitsbemühungen von Unternehmen spielen muss. Für die Produktentwicklung gälte es gegebenenfalls zu klären, wodurch sich ein gesellschaftlich nachhaltiges Produkt auszeichnet und welche Gestaltungsmöglichkeiten daraus resultieren.

2 Gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen

Wenn einleitend dargelegt wurde, dass sich Nachhaltigkeitsbestrebungen von Unternehmen im Wesentlichen auf die ökonomische und ökologische Dimension beziehen, muss einschränkend hinzugefügt werden, dass Unternehmen sehr wohl bereits Maßnahmen zur Übernahme gesellschaftlicher Verantwortung umsetzen: Im Sinne einer Corporate Citizenship stellen Unternehmen z. B. Geld- oder Sachspenden bereit (Corporate Giving) oder unterstützen das ehrenamtliche Engagement ihrer Beschäftigen (Corporate Volunteering). Grundlegende Tendenz ist jedoch eine Beschränkung auf die Bereitstellung von Unternehmensressourcen zugunsten der lokalen Gesellschaft der Betriebsstandorte [1].

In einem Vergleich der aufgezählten Maßnahmen und Aktivitäten mit den Möglichkeiten, welche Unternehmen unter der Zielsetzung der ökologischen Nachhaltigkeit offen stehen, muss jedoch ein qualitativer Unterschied attestiert werden: Die von Unternehmen praktizierten Maßnahmen zur Umsetzung gesellschaftlicher Nachhaltigkeit scheinen derzeit einen Stand aufzuweisen, den der Umweltschutz bereits spätestens zu Beginn des Jahrzehnts überschritten hat. Analog zu vorherigen

ökologischen Maßnahmen stehen im sozialen Bereich heute das Unternehmen, seine Mitarbeiter und das direkte Umfeld sowie spezifische Zielgruppen im Fokus. Die ökologische Verantwortung wird heute jedoch durch wesentlich weiter gefasste Betrachtungen und Strategien wahrgenommen. Wenn auch der Transfer vorhandenen Wissens auf diesem Feld in die tägliche wirtschaftliche Praxis noch nicht abgeschlossen ist, so stehen für den Umweltschutz doch bereits sehr umfassende und weitreichende Ansätze zur Anwendung bereit. Insbesondere die umweltgerechte Gestaltung von Produkten wird im Rahmen einer lebenslauforientierten Betrachtung – Stichwort Life-Cycle-Thinking - wesentlich auf Bereiche und Aspekte ausgedehnt, die sich nicht mehr im unmittelbaren Umfeld des herstellenden Unternehmens abspielen. Der Wandel weg von der eingegrenzten, auf das engere Umfeld des Unternehmens beschränkten, hin zu einer lebenslauforientierten, ökologischen Betrachtung ist auf europäischer Ebene durch das Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik (IPP) dokumentiert [2]. Heute stellen EcoDesign oder Design for Recycling als umfassende Ansätze und Methodiken sowie europäische Richtlinien wie die WEEE, RoHS und REACH als institutionelle Grundlagen Ergebnisse dieser Entwicklung dar.

Für die Möglichkeiten auf dem Feld der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit ist ein vergleichbarer Stand noch nicht erreicht. Zum einen fehlt sowohl ein übergeordneter normativer Rahmen, der ein einheitliches Verständnis für die Problematik fördert und Maßnahmen zur Verbesserung des Zustandes definiert. Zum anderen weisen - wie bereits angedeutet - die Maßnahmen zur Übernahme gesellschaftlicher Verantwortung bisher eine ganz andere Qualität auf. Es handelt sich unter dem Konzept der Corporate Social Responsibility (CSR) oftmals um singuläre, selten auf Dauer angelegte Tätigkeiten, ein Bezug zum Kerngeschäft fehlt in der Regel [3]. Allerdings scheint sich derzeit eine - der im ökologischen Bereich vergleichbare - Entwicklung anzubahnen, durch welche die genannten Missstände behoben werde, zugleich aber auch neue Herausforderungen für Unternehmen geschaffen werden könnten.

Der neue internationale Standard ISO 26000, dessen Veröffentlichung für Ende 2010 geplant ist, stellt einen Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung dar. Er richtet sich sowohl an privatwirtschaftliche Unternehmen als auch an öffentliche Organisationen, soll jedoch nur empfehlenden Charakter haben und keine verbindliche Vorschrift darstellen. Erklärte Ziele des Standards sind die Schaffung eines einheitlichen Verständnisses vom Begriff Soziale Verantwortung, das Überführen übergeordneter Grundsätze in

wirkungsvolle Handlungen sowie das Herausarbeiten und Verbreiten erfolgreicher, bereits praktizierter Handlungsoptionen zur Umsetzung von gesellschaftlicher Verantwortung [4]. In diesem Sinne wird Gesellschaftliche Verantwortung im vierten Arbeitsentwurf zur ISO 26000 [5] definiert als

"responsibility of an organization for the impacts of its decisions and activities on society and the environment, through transparent and ethical behaviour that

- *contributes to sustainable development, health and the welfare of society;*
- *takes into account the expectations of stakeholders;*
- *is in compliance with applicable law and consistent with international norms of behaviour; and*
- *is integrated throughout the organization and practiced in its relationships."*

Weiterhin heißt es:

"Activities include products, services and processes."

Die gewählte Formulierung zeigt deutlich, dass der Begriff der gesellschaftlichen Verantwortung im Sinne der ISO 26000 weiter gefasst ist, als es in bisherigen Konzepten teilweise der Fall ist. Die Übernahme dieser Verantwortung erstreckt sich - als Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung - zukünftig auch auf die Gestaltung von physischen Produkten und Dienstleistungen und damit das Kerngeschäft von Unternehmen. Dies bedeutet, dass Unternehmen nicht nur durch freiwillige Aktivitäten, wie z. B. Sponsoring, sondern auch durch eine nachhaltige Gestaltung der Hauptgeschäftsprozesse gesellschaftliche Verantwortung übernehmen müssen. Für Unternehmen, deren Kerngeschäft auf Entwicklung, Produktion oder Handel von physischen Produkten basiert, muss für die Produktentwicklung folglich geklärt werden, wodurch sich sozial nachhaltige Produkte auszeichnen und ob bzw. wie gesellschaftliche Verantwortung umgesetzt und Produkte unter gesellschaftlichen Gesichtspunkten gezielt optimiert werden können.

3 Kriterien für die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten

Die Identifikation geeigneter Anforderungen bzw. Kriterien zur Überprüfung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit gestaltet sich schwierig. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene wissenschaftliche Projekte zur Bewertung der sozialen Nachhaltigkeit von Produkten durchgeführt. Als Beispiele sind die Projekte PROSA und GaBi zu nennen.

- Das Forschungsvorhaben PROSA des unabhängigen Öko-Institut in Freiburg wurde im Rahmen der Sozial-ökologischen Forschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Arbeitsinhalt war die Entwicklung der gleichnamigen Bewertungsmethode (**Pro**duct **S**ustainability **A**ssessment), mit der sich Produktportfolios, Produkte und Dienstleistungen bewerten lassen sollen. Die Methode beinhaltet optional neben der ökologischen und ökonomischen Betrachtung durch Umweltbilanz (Life Cycle Assessment/LCA) und Lebenszyklus-Kosten-Analyse (Life Cycle Costing/LCC) eine so genannte Sozialbilanz (Social Life Cycle Assessment/SLCA) [6].
- Die Abteilung für Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi) des Lehrstuhls für Bauphysik der Universität Stuttgart bietet mit Ihrer Bilanzierungssoftware die Möglichkeit, die Umweltbilanzierung von Produkten (LCA) um soziale Aspekte zu ergänzen [7].

Die in den Projekten verwendeten Kriterien eigenen sich zwar zur Beurteilung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit eines Produktes, scheinen auf den ersten Blick aber gleichwohl nur einen geringen bzw. indirekten Produktbezug aufzuweisen: Diese vermeintlich wiedersprüchliche Situation lässt sich dadurch erklären, dass sich die Kriterien sowohl bei PROSA als auch bei GaBi zu einem Großteil auf Bedingungen und Zustände im Unternehmen und seinem Umfeld beziehen. Arbeitsbedingungen wie Gesundheit, Sicherheit oder Qualifikation, politische und rechtliche Rahmenbedingungen wie Gewerkschaftsfreiheit, Chancengleichheit oder Gleichberechtigung bilden die Hauptaspekte in den Betrachtungen. Lediglich den Kriterien der Kategorie *Qualität des Produktes/der Dienstleistung* des PROSA-Kataloges lässt sich auf den ersten Blick ein direkter Produktbezug bescheinigen.

Auch die Analyse anderer Quellen für mögliche Kriterien gesellschaftlicher Nachhaltigkeit von Produkten weist ein vergleichbares Ergebnis auf: Sowohl im Leitfaden der *Global Reporting Initiative* zur Gestaltung von Nachhaltigkeitsberichten [8] als auch der Entwurf zur ISO 26000 [4] beinhalten kaum Kriterien, die eindeutigen Produktbezug haben. Zusammenfassend ist also festzustellen, dass die geprüften Kriterienkataloge zwar Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten bereitstellen, diese Kriterien aber überwiegend einen Umweg über die Rahmenbedingungen innerhalb der produzierenden Unternehmen und deren Umfeld beschreiten. Wenn die verfügbaren Kriterien zur Beurteilung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit von Produkten aber nur

geringen oder indirekten Produktbezug aufweisen, stellt sich die Frage, ob die Produktentwicklung überhaupt einen Einfluss auf die entsprechenden Kriterien hat. Stattdessen liegt die Vermutung nahe, dass die Entscheidungen, die Einfluss auf die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten haben, an anderen Stellen des Unternehmens getroffen werden.

4 Einflussmöglichkeiten in der Produktentwicklung

Die Frage nach dem potentiellen Einfluss der Produktentwicklung auf die einzelnen Kriterien für die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten lässt sich eingehender durch die *Analyse mit Wirkketten* untersuchen. In ihrer ursprünglichen Form dient die Methode *Analyse mit Wirkketten* der Identifizierung von Zusammenhängen zwischen Produkteigenschaften, die durch die Produktentwicklung festgelegt werden, und Umweltbeeinträchtigungen des Produktes. Hierzu wird versucht, die Ketten von Einflüssen, die einzelne Umweltbeeinträchtigungen bedingen, aufzustellen und bis auf die Ebene von Produkteigenschaften herunter zu brechen. Die identifizierten Eigenschaften lassen sich durch die Produktentwicklung gegebenenfalls gezielt zur Reduzierung der Umweltbeeinträchtigung manipulieren. Auf Grund der Tatsache, dass Umweltbeeinträchtigung durch verschiedene Eigenschaften eines Produktes (z.B. Geometrie und Material) beeinflusst werden können, entstehen aus mehreren Wirkketten verzweigte Wirkbäume [9] [10]. Interpretiert man negative Ausprägungen von Bewertungskriterien bzw. Indikatoren für die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten analog den Umweltbeeinträchtigungen als „Gesellschaftsbeeinträchtigungen“, lässt sich die Analyse mit Wirkketten auch für die Herleitung von Zusammenhängen zwischen der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit von Produkten und deren Eigenschaften anwenden. Da die Produkteigenschaften im Wesentlichen in der Produktentwicklung festgelegt werden, lassen sich so existierende Einflussmöglichkeiten der Produktentwicklung auf die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten identifizieren.

Die Anwendung des beschriebenen Vorgehens auf Kriterien für die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten bestätigt den Eindruck aus der ersten Beurteilung der vorhandenen Kriterienkataloge. Aus den beispielhaft aufgestellten Wirkketten und –bäumen lassen sich zwar Zusammenhänge zwischen einzelnen Kriterien und beispielsweise den Herstellkosten oder den verwendeten Produktionsverfahren ableiten,

die große Anzahl anderer Einflüsse relativiert jedoch die Bedeutung dieser einzelnen. Folglich ist der Einfluss der Produktentwicklung im konstruktiven Sinne zu vernachlässigen.

Wenn aber kein bzw. nur ein geringer unmittelbarer Einfluss im Sinne konstruktiver, gestalterischer Maßnahmen auf die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten besteht, stellt sich die Frage, ob sich die Produktentwicklung überhaupt mit dem Thema beschäftigen sollte oder ob eine Berücksichtigung in anderen Unternehmensbereichen nicht den Ansprüchen an eine nachhaltige Gestaltung des Kerngeschäfts genügt.

Die Antwort auf diese Frage hängt wesentlich von der Sichtweise auf Bedeutung, Kompetenzen und Verantwortlichkeit der Produktentwicklung innerhalb eines Unternehmens ab. In einer eingegrenzten Sichtweise umfasst die Produktentwicklung lediglich die Kerntätigkeiten Entwicklung und Konstruktion. In diesem Sinne ist der gestalterische Einfluss der Produktentwicklung wie bereits erwähnt so gering, dass eine Ausrichtung auf gesellschaftliche Nachhaltigkeit nicht zielführend erscheint. Betrachtet man in einer integrierenden Sichtweise jedoch den gesamten Produktentstehungs- [11] bzw. Produkterstellungsprozess [12] - im Sinne aller Prozesse und Arbeitsschritte von der Idee bis zur Auslieferung an den Kunden - wird deutlich, welche Verantwortung bei der Produktentwicklung liegt (Bild 1).Mit der ersten Phase im Produktentwicklungsprozess, der Klärung der Aufgabenstellung und dem Aufstellen der Anforderungsliste wird das wesentliche Leitwerk geschaffen, an dem sich nachfolgende Entscheidungen und Prozesse aller in den Produktentstehungsprozess eingebundenen Abteilungen orientieren müssen bzw. gegen deren Anforderungen sie nicht verstoßen dürfen. Anforderungen die dort nicht genannt und aufgenommen werden, werden folglich keine Berücksichtigung in der Prozesskette finden [13]. Will ein Unternehmen seine Produkte gesellschaftlich nachhaltig gestalten, ist es in einem prototypischen Prozess also unumgänglich, dass bei der Erstellung der Anforderungsliste auch Nachhaltigkeitsanforderungen zu gesellschaftlichen Aspekte aufgenommen werden.

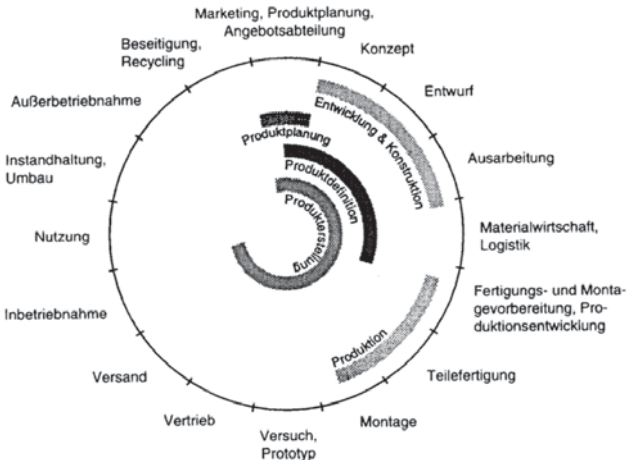


Bild 1: Die Produkterstellung im Produktlebenslauf [12]

Eine vollständige Integration ökologischer und gesellschaftlicher Anforderungen in die Anforderungsliste stellt insbesondere für komplexe Produkte, die ohnehin eine Vielzahl technischer und wirtschaftlicher Anforderungen erfüllen müssen, eine kaum zu erfüllende Aufgabe dar. Dies ist insbesondere mit der Anzahl und den komplexen, zum Teil konkurrierenden Zusammenhängen der Nachhaltigkeitsanforderungen zu begründen. Aktuelle wissenschaftliche Ansätze versuchen derzeit geeignete Softwaresysteme zu entwickeln, die auch eine Verwaltung von Nachhaltigkeitsanforderungen zulassen. Die Grundlagen hierfür entstammen beispielsweise dem Requirements Engineering aus der Software- und System-Entwicklung [14]. Pragmatischere Ansätze könnten beispielsweise darauf beruhen, die Verantwortung für übergeordnete Themenkomplexe in separate Arbeitsmittel auszulagern. Für ökologische Anforderungen werden beispielsweise Stoffverbots- oder Stoffsubstitutionslisten verwendet, auf welche die Produktentwicklung leicht zugreifen kann. In abgewandelter Form sind vergleichbare Listen oder auch nur Erweiterungen vorstellbar, welche die Arbeitsbedingungen bei der Gewinnung bestimmter Rohstoffe oder bei einzelnen Lieferanten berücksichtigen.

5 Fazit

Zusammenfassend lassen sich aus den dargelegten Sachverhalten und Argumentationsgängen wesentliche Erkenntnisse für produzierende Unternehmen ableiten:

1. Ausgehend von der Veröffentlichung des geplanten internationalem Standards ISO 26000 zur gesellschaftlichen Verantwortung von Organisationen und den im aktuellen Entwurf gewählten Formulierungen sind für Unternehmen geänderte Ansprüche hinsichtlich der Übernahme der gesellschaftlichen Verantwortungen zu erwarten. Es gilt, zukünftig alle Dimensionen von Nachhaltigkeit, also auch die soziale zu berücksichtigen. Dies betrifft insbesondere die Gestaltung der Kerngeschäftsprozesse und somit auch die Gestaltung von Produkten.

2. Die Kriterien für die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten haben nach derzeitigem Stand der Dinge nur mittelbaren Produktbezug und sind folglich nur sehr eingeschränkt durch die Produktentwicklung mittels konstruktiv gestalterischer Maßnahmen gezielt zu beeinflussen

3. Dennoch muss die Produktentwicklung einen wesentlichen Beitrag leisten, wenn Unternehmen nachhaltige Produkte auf den Markt bringen wollen. Dies liegt darin begründet, dass die erste Phase im Produktentstehungsprozess, das Aufstellen der Anforderungen an das zukünftige Produkt die Grundlage für alle nachfolgenden Schritte und Maßnahmen im Produktentstehungsprozess bildet. Nur so können andere Unternehmensbereiche wie Produktion und Einkauf entsprechende Vorgaben in ihren Entscheidungen und Aktivitäten umsetzen.

Literatur

[1] Braun, S.: *Gesellschaftliches Engagement von Unternehmen in Deutschland.* In: *APuZ. Aus Politik und Zeitgeschichte.* Beilage zur Wochenzeitung *Das Parlament.* Heft 31/2008, Frankfurt a. Main, 2008. http://www.bpb.de/files/M5B1J7.pdf (07.08.2008)

[2] Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.): *Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik.* Brüssel 2001, http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=de&type_doc=COMfinal&an_doc=2001&nu_doc=68 (30.07.2008)

[3] Leitschuh, H.: *CSR ist gut, Nachhaltig Wirtschaften ist besser.* In: *uwf – UmweltWirtschaftsForum.* 16. Jg., Heft1/2008, Berlin/Heidelberg, Springer, 2008, S. 45 – 48. http://dx.doi.org/10.1007/s00550-008-0065-4 (30.07.2008).

[4] International Organization for Standardization: *ISO and Social Responsibility*, Geneva, 2008, http://www.iso.org/iso/socialresponsibility.pdf (30.07.2008)

[5] International Organization for Standardization, *Guidance on Social Responsibility. Working Draft 4.1*, Geneva, 2008, section 3.15, http://isotc.iso.org/livelink/livelink/7187271/N137__WD4.1_Guidance_on_Social_Responsibility?func=doc.Fetch&nodeid=7187271 (30.05.2008).

[6] Grießhammer, R.; Buchert, M.; Gensch, C.-O.; Hochfeld, C.; Rüdenauer, I.: *PROSA - Klartext zur sozialen und gesellschaftlichen Dimension von Produkten.* In: *uwf – UmweltWirtschaftsForum*. 12. Jahrgang, Heft 1/2004, Berlin/Heidelberg, Springer, 2004, S. 42-46.

[7] Barthel, L.: *Soziale Größen in der Ganzheitlichen Bilanzierung (LCWE).* http://www.ikpgabi.uni-stuttgart.de/download/deutsch/Einlageblatt%20Flyer_LCWE.pdf (30.07.2008).

[8] GRI – Global Reporting Initiative (Hrsg.): *Sustainability Reporting Guidelines*. Version 3.0, 2006. http://www.globalreporting.org/NR/rdonlyres/ED9E9B36-AB54-4DE1-BFF2-5F735235CA44/0/G3_Guidelines ENU.pdf (04.08.2008).

[9] Oberender, C.; Birkhofer, H.: *Analysis of Product Characteristics and Influencing Factors on Environmental Impacts – An Approach for Deducing Requirements Focused on the Use Phase.* In: Seliger, G. et al.: *Proceedings of the Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering*. Berlin, 2004, S. 281 – 286.

[10] Oberender, C.: *Die Nutzungsphase und ihre Bedeutung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte.* Diss., Düsseldorf, VDI Verlag, 2006. – ISBN 3-18-338501-5, S. 70 – 95.

[11] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl., Berlin, Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[12] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.* 3., akt. Aufl., München/Wien, Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN-10: 3-446-40733-2.

[13] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.): *VDI-Richtlinie: VDI 2221. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.* Beuth Verlag, Berlin, 1993.

[14] Hanusch, D.; Birkhofer, H.: *The requirements list in the product creation process. Opportunity or obstacle on the way to sustainable business?* EDIProD' 2008. Engineering Design in Integrated Product Development. Gdynia, Polen 2008.

Know-How-Schutz der Produktmodelle in der Virtuellen Produktentwicklung

Michael Abramovici, Valentin Meimann

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik (ITM), Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstrasse 150, D-44780 Bochum
Email: michael.abramovici@itm.rub.de, valentin.meimann@itm.rub.de;
Internet: http://www.itm.rub.de

Inhalt: *Die zunehmende Virtualisierung des Produktentwicklungprozesses hat zur Folge, dass heutige CAD-Modelle zu Wissensspeichern und somit zu Trägern des unternehmensspezifischen Know-Hows werden. Das in virtuellen Modellen integrierte Wissen stellt für Unternehmen einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor dar und muss somit vor unkontrolliertem Zugriff geschützt werden.*

In dem vorliegenden Beitrag wird ein prozessorientierter Ansatz vorgestellt, der die Produktentwicklungsprozesse eines Unternehmens in ihrer Gesamtheit berücksichtigt. Den Kern der vorgestellten Lösung bildet ein methodisches Regelwerk für die Know-How-Schutz gerechte Entstehung Virtueller Produkte. Die Anforderungen an die IT-gestützte Lösung stammen aus der Analyse von typischen Use Cases, deren Bestandteile neben den Kooperationsmodellen der Unternehmen und denkbarer Bedrohungsszenarien auch wissensintensive Datenaustauschprozesse berücksichtigen.

Abstract: *The increasing virtualisation of the product development process leads to today's CAD models becoming knowledge storage units and thus carriers of company-specific know-how. The knowledge integrated in virtual models represents a decisive competitive factor for companies and must therefore be protected from uncontrolled access.*

This paper presents a process-oriented approach considering a company's product development process in its entirety. The core of the solution being put forward frames a methodical set of rules for development of virtual products in a know-how protecting fashion. The requirements for the IT-supported solution stem from the analysis of typical use cases, whose elements also consider knowledge-intensive data exchange processes alongside the company corporation models and possible threat scenarios.

Stichwörter: *Virtuelle Produktentwicklung, Virtuelles Produkt, Know-How-Schutz*

Keywords: *Virtual Product Development, Virtual Product, Intellectual Property Protection*

1 Einleitung

Die Entwicklung und Einführung neuer Produkte ist für ein nachhaltiges und profitables Unternehmenswachstum unverzichtbar [1, 2]. Die zunehmende Virtualisierung des Produktentwicklungprozesses hat zur Folge, dass heutige Produktmodelle zu Wissensspeichern und somit zu Trägern des unternehmensspezifischen Know-Hows werden. Der weit über Produktgeometrie hinaus gehende Informationsgehalt innerhalb von virtuellen Produktmodellen schließt neben dem konstruktionstechnischen Wissen auch Informationen über nachgelagerte Prozesse ein, wie Fertigung, Montage, Qualitätssicherung etc. Dieses Wissen stellt für Unternehmen einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor dar und muss somit vor unkontrolliertem Zugriff effektiv geschützt werden.

Die gegenwärtige Situation bei den entwicklungsintensiven Unternehmen in Bezug auf Know-How-Schutz lässt jedoch deutliche Defizite erkennen. Zwar erlauben heutige IT-Lösungen bei Bedarf die Reduzierung des integrierten Wissensgehalts bei den virtuellen Modellen (s. g. Modellverdummung), es fehlen aber ganzheitliche Lösungen, die neben den modellbezogenen Aspekten auch Entwicklungsprozesse sowie produktbezogene Aspekte berücksichtigen.

Als Folge dessen sind die betroffenen Unternehmen mit vielfältigen Problemen konfrontiert. Das entwendete Know-How, wenn es nicht nur die optische Produktgestaltung betrifft, lässt sich in fremden Produkten sehr schwer erkennen. Gleichzeitig erhalten die unehrlichen Unternehmen Produktdaten und -informationen, die für Qualität des physikalischen Endproduktes maßgeblich sind, ohne dabei in die Produktentwicklung zu investieren. Die in Virtuellen Produkten unter Umständen enthaltenen Konfigurationsparameter und Konstruktionsregeln erlauben sogar eine gezielte Produktanpassung und Weiterentwicklung der eigenen Produkte, was zu sinkenden Marktanteilen des Urhebers führen kann.

Die rechtlichen Randbedingungen können den ausufernden Schaden der Produktpiraterie zwar eindämmen, sie greifen aber erst nachdem dieser Schaden schon eingetreten ist. Die Durchsetzung der Urheberrechte auf internationaler Ebene wird zudem durch eine uneinheitliche Rechtslage zusätzlich erschwert [3].

Im Rahmen eines Industrieprojektes am ITM wird bei einem Kooperationspartner gegenwärtig ein Konzept umgesetzt, das die Sicherstellung des Wissensschutzes schon in

der frühen Produktentwicklungsphase berücksichtigt. Im Folgenden wird das Konzept und der Stand der Implementierung vorgestellt.

2 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Virtuelle Produktentwicklung

Unter dem Begriff *Virtuelle Produktentwicklung* (VPE) versteht man im weitesten Sinne alle rechnerunterstützten Entwicklungsprozesse, einschließlich der Konzipierung, Konstruktion sowie Simulation der Entstehung und des Verhaltens künftiger Produkte [4]. Die rechnerunterstützte Geometriemodellierung, als Ausgangsbasis für nachgelagerte rechnerintegrierte Prozesse, bildet dabei den Kern der VPE. Die hochintegrierten CAx-Systeme (wie z.B. CATIA V5 von Dassault Systemes) bieten in der Regel umfangreiche Funktionsmodule, die den ganzen Produktentstehungsprozess durchgehend unterstützen. Ein zunächst als Prinzipentwurf entstehendes Produkt erhält im Laufe der Entwicklung eine bestimmte geometrische Gestalt und anschließend physikalische und fertigungstechnische Eigenschaften und Attribute, die eine Verifizierung des Produktverhaltens schon in den frühen Entwicklungsphasen ermöglichen [5]. Das *Virtuelle Produktmodell* als Ergebnis des Entwicklungsprozesses beinhaltet somit das komplette Entwicklungs-Know-How in Form von integrierten Features, Regeln, Parametern und Produktstruktur (Bild 1).

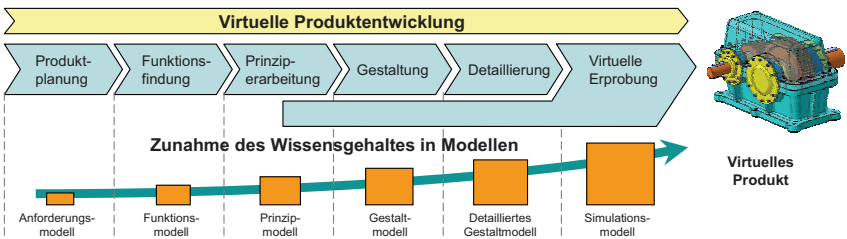


Bild 1: Zunahme des Wissensgehalts in Virtuellen Produktmodellen entlang des Produktentwicklungsprozesses (in Anlehnung an [6, 7, 8])

Wissensintegration in Virtuelle Produktmodelle

Aus den Verknüpfungen von Beschreibungen und der Vernetzung der Informationen entsteht ein auf den Prozess ausgerichtetes Wissen [9]. Dieses im Modell integrierte Wissen lässt sich in *Produktwissen* und *Prozesswissen* unterteilen [10, 11]. Das

Produktwissen wird in einem Virtuellen Produktmodell in der Regel durch integrierte Variantenparameter über z.B. Gestalt, Funktion, Werkstoffe oder logische und mathematische Beziehungen zwischen einzelnen Elementen bzw. Features repräsentiert.

Das Prozesswissen kann nachträglich aus der Entstehungsgeschichte eines Modells, den Elementengruppierungen oder der Anwendung bestimmter Modellierungsmethoden rekonstruiert werden. Die Integration von semantischen Features für die Erzeugung fertigungsgerechter Konstruktionen erlaubt ebenfalls Schlüsse auf firmeninterne Produktionsprozesse.

Innovationsnetzwerke

Der in der Wirtschaft zunehmend zu beobachtende Trend zur Spezialisierung auf die Kernkompetenzen [12] und die gleichzeitig steigende Produktkomplexität zwingt die Unternehmen, ihre Produkte innerhalb von komplexen *Innovationsnetzwerken*, zu denen teilweise auch miteinander im Wettbewerb stehende Partner gehören, zu entwickeln [13] (Bild 2).

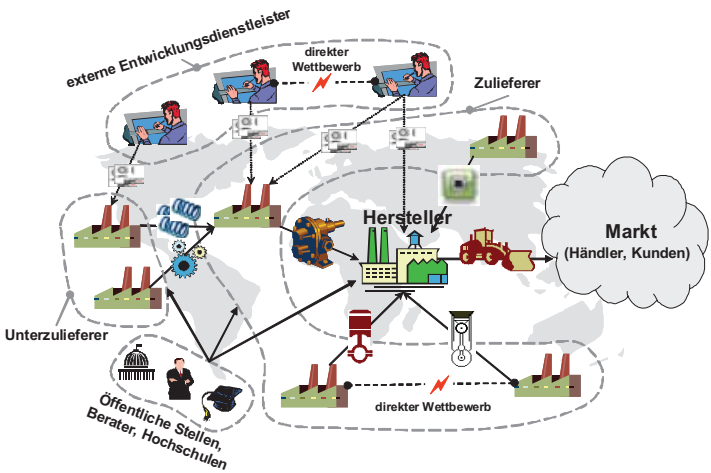


Bild 2: Teilnehmer eines Innovationsnetzwerkes (in Anlehnung an [14])

Um hohen Kundenanforderungen gerecht zu werden, versuchen die beteiligten Unternehmen ihre Entwicklungsprozesse zu parallelisieren und Produktdaten schon in den frühen Entwicklungsstadien auszutauschen. Die bestehenden IT-Systeme bieten zwar für

die Austauschprozesse eine sichere Umgebung in Form von elektronischer Autorisierung und Verschlüsselung, können aber einen unkontrollierten Wissenstransfer durch die Informationsweitergabe an Dritte nicht verhindern.

3 Stand der Technik und der Forschung

Die am Markt verbreiteten CAD/CAx-Systeme (z. B. NX von Siemens PLM oder CATIA V5 von Dassault Systemes) verfügen über bestimmte Grundfunktionalitäten, die prozesstechnisch einen einfachen Know-How-Schutz der Virtuellen Produkte gewährleisten. So lassen sich in allen CAD-Systemen die Produktmodelle aus *nativen*, also systemspezifischen, in *neutrale Formate* konvertieren, wie z.B. STEP oder IGES. Als Folge dieses Vorgangs werden alle firmenspezifischen Informationen ebenso wie einzelne Features und Strukturelemente aus dem Modell entfernt. Es entsteht dabei ein geometrisches Modell, das als Metadaten einige grundlegende Informationen über das Erzeugersystem enthält. Diese Lösung der Know-How-Schutz-Problematik eignet sich besonders gut für geometrisch einfache Produktmodelle, weil trotz eines hohen Reifegrades der neutralen CAD-Schnittstellen einige komplexe Geometrie-Elemente nicht einwandfrei konvertiert werden.

Eine andere Methode der Modellaufbereitung für den Datenaustausch besteht darin, die kompletten Baugruppen, bestehend aus mehreren Einzelteilmodellen, zu einem einzigen Modell zusammenzufassen. Auch in diesem Fall wird der Informationsgehalt im Modell stark reduziert. Im Unterschied zu der Konvertierung in ein neutrales Format bleibt hier das Modell in seinem Originalformat bestehen.

Diesen Lösungen ist gemeinsam, dass die Konvertierung auch das Entfernen der assoziativen Beziehungen zwischen einzelnen Elementen und Modellen bedeutet.

Ein anderer zu beobachtender Trend in Produktdaten-Austausch-Netzwerken ist das s.g *Digital Rights Management* (DRM). DRM hat seinen Ursprung in der Unterhaltungsindustrie und hat zum Ziel, dem Urheber eines elektronischen Inhaltes die Möglichkeit zu geben, die Art der Nutzung seines Eigentums durch die Nutzer auf Basis einer zuvor getroffenen Nutzungsvereinbarung technisch zu erzwingen [15]. Ein repräsentatives Beispiel für ein DRM-System im technischen Bereich ist die web-basierte Plattform OpenDXM GlobalX von PROSTEP. Das System ist modular aufgebaut und bietet die Möglichkeit, Daten verschlüsselt über das Internet zu übertragen. Der

Empfänger kann mit Hilfe eines Passwortes und eines zusätzlichen Schlüssels auf die Inhalte zugreifen [16].

Eine solche Lösung ist für die Anwendung bei intensiven Datenaustauschprozessen in einem Partnernetzwerk gut geeignet. Es besteht aber die Gefahr, dass die mit einem bestimmten kryptographischen Verfahren verschlüsselten digitalen Inhalte bei kritischen Änderungen des Anbietermarktes (Firmenübernahmen, Insolvenzen etc.) nicht mehr nutzbar sind. Zudem wird das eigentliche Wissen aus dem Modell nicht entfernt, sondern der Zugang dazu lediglich erschwert.

Eine Alternative zu den zuvor beschriebenen Ansätzen bieten IT-Tools, die nach vordefinierten Regeln die Produktmodelle gezielt vereinfachen (Modellverdummung). Auf diese Weise lassen sich bestimmte Modellelemente, wie z.B. Variantentabellen oder Constraints, entfernen. Die zurzeit für die kommerzielle Anwendung angebotenen Systeme sind z.B. IPPro (:em AG), Knowledge Editor (PROSTEP) und IPP (MDTVision). Sie erlauben dem Anwender eine detaillierte Festlegung der zu entfernenden Elemente. Die zugrunde liegende Logik basiert auf internen CAD-systemspezifischen Parametern und lässt sich z.B. durch firmenspezifische Bezeichnungen erweitern. So können alle Modellelemente, die einem bestimmten Typ zugehören (z. B. „Parameter“) oder einen bestimmten String in der Bezeichnung enthalten (z.B. „IP-Schutz“), automatisch entfernt werden. Dadurch entsteht jedoch die Gefahr, dass bei eventuellen Eingabe-Fehlern entsprechende Elemente vom System nicht erkannt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle existierenden IT-gestützten Lösungen frühestens in der Produktgestaltungs-Phase anwendbar sind und frühere Phasen des Produktentwicklungsprozesses nicht berücksichtigen bzw. nicht unterstützen.

4 Konzept zum ganzheitlichen Know-How-Schutz der Virtuellen Produktmodellen

Das am ITM entwickelte Konzept für den Know-How-Schutz Virtueller Produktmodelle berücksichtigt neben dem geometrischen CAD-Modell auch die frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses. Das Konzept deckt den Standardkonstruktionsprozess für die Entwicklung von Neukonstruktionen ab, der drei Hauptkomponenten – Funktionsstruktur, Wirkstruktur, Bauzusammenhang – beinhaltet [17].

In der Phase der Funktionsstrukturmodellierung werden die Funktionen identifiziert, die ein besonderes Know-How des Unternehmens darstellen. Bei einem Getriebebauer können solche Funktionen z.B. Kraftübertragung oder Wellenlagerung sein. Im Produktkontext werden einzelne Funktionen durch bestimmte Bauteile erfüllt. Dabei kann eine Funktion durch mehrere Bauteile realisiert werden. Gleichzeitig kann ein Bauteil mehrere Funktionen erfüllen. Zwischen Funktionen und dazugehörigen Bauteilen besteht also eine n-n-Beziehung. Im Modellierungskontext werden einzelne Bauteile durch bestimmte Features repräsentiert. Zwischen den Bauteilen und Feautures besteht eine 1-n-Beziehung (Bild 3).

Bei der Modellaufbereitung unter Berücksichtigung von Know-How-Schutz Aspekten können einzelne Features über die Abhängigkeit von zu schützenden Einzelteilmodellen automatisch identifiziert werden.

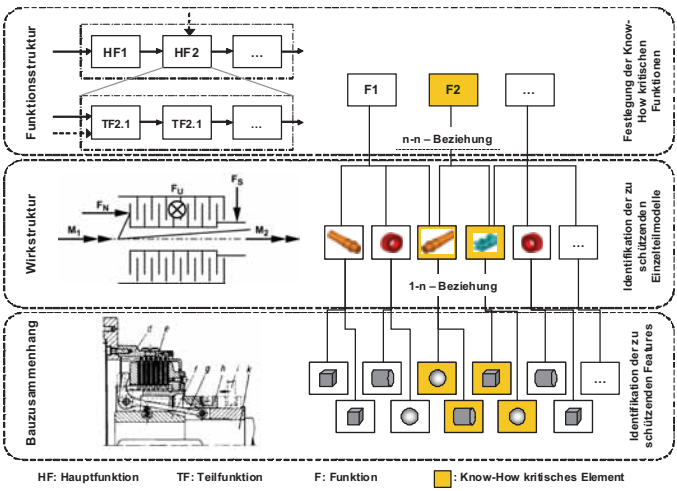


Bild 3: Zusammenhang zwischen den Geometrieelementen und dem Konstruktionsprozess

Prozessmodell

Das Know-How-Schutz Konzept besteht im Wesentlichen aus einem Prozessmodell und einem IT-Tool „IP-Editor“ und sieht eine Integration in das firmenspezifische PDM-System vor (Bild 4).

Die oberste Prozessebene beschreibt den gesamten Ablauf des Datenaufbereitungsprozesses für den Datenaustausch mit externen Partnern. Der IP-

Editor stellt die erforderliche Schnittstelle dar und wird durch einen automatischen Workflow gesteuert. Wird ein Modell für den Datenaustausch aufbereitet, startet eine automatische Ähnlichkeitssuche im PDM-System und identifiziert ähnliche Modelle (ähnliche Geometrien, Anwendungen, Kunden etc.) mit hinterlegten IP-Profilen. Wird kein Suchergebnis gemeldet, so ist es erforderlich, ein für die Bauteilfamilie spezifisches IP-Profil anzulegen. Das Anlegen der IP-Profile wird durch den IP-Editor unterstützt. Das Profil beinhaltet Informationen über die erforderlichen Geometriemanipulationen, die der Modellvereinfachung dienen. Das sind z.B. Entfernen oder Manipulation der Parameter, Vereinfachung der Modellstruktur, Ersetzen der Know-How kritischen Features durch vordefinierte Geometrieelemente.

Neben den bauteilspezifischen Features wird auch in separaten modellübergreifenden IP-Profilen der Umgang mit besonderem Technologiewissen definiert. Dieses Wissen kann in einem Modell durch bestimmte semantische Features wie z.B. Bohrungen mit Fertigungsparametern repräsentiert werden.

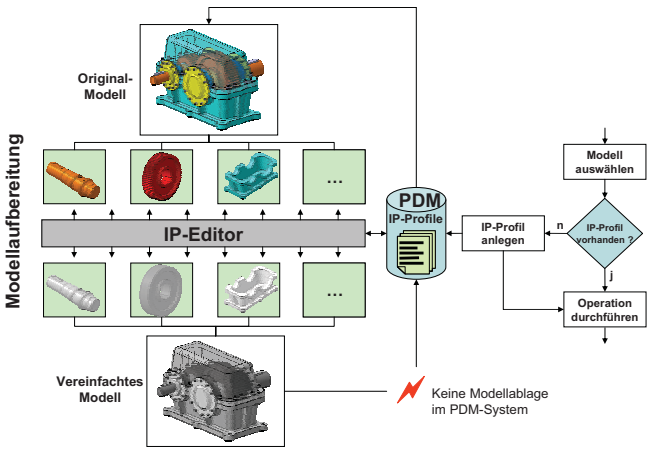


Bild 4: Prozess der Modellaufbereitung

Um den Datenverwaltungsaufwand zu reduzieren, wird das für den Datenaustausch erzeugte vereinfachte Produktmodell im PDM-System nicht gespeichert, sondern direkt an den Empfänger weitergeleitet. Es wird lediglich ein Vorgang mit Produktnummer und Profilkombination im PDM-System hinterlegt, was eine wiederholte reproduzierbare Modellaufbereitung ermöglicht.

5 Verifizierung des Know-How-Schutz Konzeptes

Das im Kapitel 4 beschriebene Know-How-Schutz Konzept wird zurzeit im Rahmen einer Industriekooperation bei einem mittelständischen Automobilzulieferer in der Praxis verifiziert. Der aktuelle Stand der Implementierung konzentriert sich auf die Integration des IT-Tools „IP-Editor“ in das vorhandene CAD-System CATIA V5. Bild 5 zeigt die Programm-Oberfläche, in der der Anwender neben den dargestellten Zusammenhängen zwischen einzelnen Modellen auch entsprechende Operationen – IP-Profile – für kritische Features definieren kann. Die ersten Anwendertests haben gezeigt, dass neben der gestiegenen Datenqualität der vereinfachten Modelle auch große Zeitersparnisse durch integrierte Automatismen auftreten.

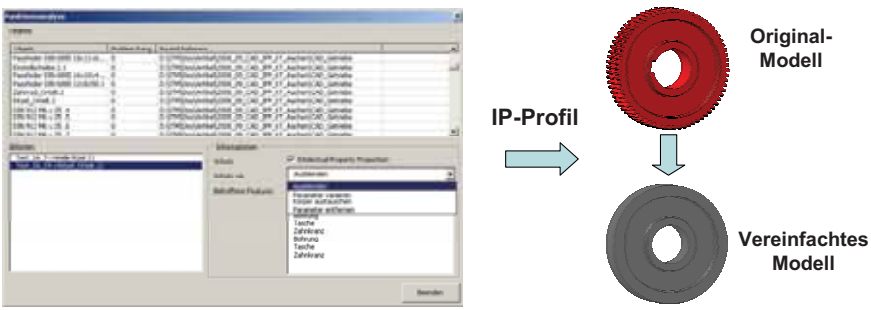


Bild 5: Funktionsweise des IP-Editors

6 Zusammenfassung

Der Schutz des geistigen Eigentums gewinnt in den heutigen entwicklungsintensiven Unternehmensnetzwerken immer mehr an Bedeutung. Die bestehenden IT-Lösungen ermöglichen inselartige Verbesserungen der Situation, es fehlt jedoch an einem ganzheitlichen Know-How-Schutz der Virtuellen Produkte.

Das am ITM entwickelte Know-How-Schutz Konzept berücksichtigt neben den modellbezogenen Aspekten auch die Entwicklungsprozesse, beginnend in den frühen Produktentwicklungsphasen. Die Integration der Know-How-Schutz Merkmale wird schon bei der Funktionsstrukturerstellung und später bei der Modellerstellung durch das IT-Tool „IP-Editor“ automatisch unterstützt. Eine tiefe Integration in das unternehmensspezifische PDM-System dient der Standardisierung und der Optimierung der

Datenaustauschprozesse und verhindert effektiv eine unkontrollierte Verbreitung des unternehmensspezifischen Wissens.

Literatur

[1] Brockhoff, K.: *Produktpolitik*, 4. Auflage, Stuttgart, Lucius & Lucius, 1999

[2] Han, J. K.; Kim, N.; Srivastava, R.: *Market Orientation and Organizational Performance: Is Innovation a Missing Link?*, Journal of Marketing 4/1998

[3] Wildemann, H.; Ann, C; Broy, M.; Günthner, W. A.; Lindemann, U.: *Plagiatschutz – Handlungsspielräume der produzierenden Industrie gegen Produktopiraterie*, Forschungsbericht, TCW, München, 2007

[4] Abramovici, M.; Meimann, V.: *Ein Ansatz zur Erhöhung der Stabilität der CAD-Modelle für die Verbesserung der Modell-Wiederverwendung in der Virtuellen Produktentwicklung*, Tagungsband 5. Kolloquium Konstruktionstechnik, Dresden, 2007

[5] Spur, G.; Krause, F.-L.: *Das virtuelle Produkt*, Hanser, München, 1997

[6] Strohmeier, O.: *Integration von Wissensmodulen in den virtuellen Produktentwicklungsprozess*, Dissertation, Shaker, Aachen, 2006

[7] Stekolschik, A.: *Ein Beitrag zum ganzheitlichen Qualitätsmanagement von CAD-Modellen in der Produktentstehung*, Dissertation, Shaker, Aachen, 2007

[8] Bossmann, M.: *Feature-basierte Produkt- und Prozeßmodelle in der virtuellen Produktentstehung*, Dissertation, Saarbrücken, 2007

[9] Chasiotis, C.: *Prozessbegleitende Wissensdokumentation und integrierte Wissensvisualisierung in der Digitalen Produktentwicklung*, Dissertation, Shaker, Aachen, 2006

[10] Weber, C.; Franke, H.-J.; Stelzer, R.: *Wissensmanagement*, In: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung, Gausemeier, J. – Hrsg., Carl Hanser, München Wien, 2007

[11] Kleiner, S.; Kirsch, S.: *KBE und IPro-Lösungen für den Know-How-Schutz im Engineering mit CATIA V5*, Tagungsband Intellectual Property Protection Day, Darmstadt, 2006

[12] Mischler, G.: *Spezialisten wachsen am schnellsten*, Financial Times Deutschland, Onlineausgabe vom 25.06.2008 (http://www.ftd.de/unternehmen/industrie/:Mittelstand%20Spezialisten/374615.html)

[13] Ritter, T.: *Innovationsnetzwerke*, In: Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement, Albers, S.; Gassmann, O.: – Hrsg., Gabler, Wiesbaden, 2005

[14] Gemünden, H.G.: *Innovationen in Geschäftsbeziehungen und Netzwerken*, Arbeitspapier des Institutes für Angewandte Betriebswirtschaftlehre und Unternehmensführung der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1990

[15] Arlt, C.: *Digital Rights Management Systeme: Der Einsatz technischer Maßnahmen zum Schutz digitaler Inhalte*, Beck Juristischer Verlag, 2006

[16] Hering, U.: *Beim Datenaustausch macht Masse die Klasse*, CAD-CAM Report 3/2008

[17] Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre*, Springer, Berlin, 1993

Untersuchung der Kontaktspannungen bei der Métaizeau-Nagelung
Der Kompromiss zwischen Stabilität und Nekrose

Hans-Peter Prüfer

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, D-44801 Bochum
Email: hp@itm.ruhr-uni-bochum.de; Internet: http://www.itm.ruhr-uni-bochum.de

Inhalt: *Die elastisch-stabile Marknagelung nach Métaizeau ist ein etabliertes Verfahren zur Stabilisierung von Frakturen der langen Röhrenknochen bei Kindern und Jugendlichen. Das mechanische Prinzip, bei dem vorgebogene Stahldrähte unter Spannung in den Markraum eingebracht und dort fixiert werden, ist tendenziell gut verstanden. Die Eigenschaften der Métaizeau-Nagelung hängen von den Parametern Markraumgeometrie, Frakturlage und -form sowie der Geometrie der Vorbiegung ab. Eine zu geringe Vorbiegung bietet keine hinreichende Stabilisierung, wogegen eine zu starke Vorbiegung zwar eine hohe Steifigkeit der Verbindung liefert, gleichzeitig aber auch hohe Spannungen im Bereich des Kontaktes Knochen-Nagel, die zu nekrotischen Knochenveränderungen führen können. In diesem Beitrag werden Vorschläge zur Bestimmung der Kontakteigenschaften in Abhängigkeit von den genannten signifikanten Einflussparametern mittels der FEM gemacht und bewertet. Als Versagenskriterium werden aus dem Wolffschen Transformationsgesetz und der Mechanostat-Theorie nach Frost kritische Werte für Spannungen und elastische Dehnungen in der umgebenden Knochenstruktur abgeleitet.*

Abstract: *The Métaizeau-nailing is a well-established technique of stabilizing juvenile fractures of the long bones. The success of this therapy depends on the curvature of the nail, achieved by the process of pre-bending which determines the biomechanical properties of the connection of the fractured parts. A weak bending is equivalent to an unstable connection, a strong bending results in high contact pressure, thus causing necrotic effects in the bone mass. In this paper we propose strategies for the numerical determination of the contact properties. These are correlated with limit strains from Frost's mechanostat model, giving an easily predictable failure criterion and finally some hints for a correct bending .*

Stichwörter: *FEM, Kontaktproblem, Fraktur, Nagelung, Mechanostat*

Keywords: *FEM, contact analysis, bone fracture, intramedullary nailing, mechanostat*

1 Einleitung - Reprise

Die elastisch-stabile Marknagelung nach Métaizeau ist ein schonendes Verfahren zur Stabilisierung juveniler Frakturen der langen Röhrenknochen. Trotz ihrer offensichtlichen Vorteile gegenüber traditionellen Techniken wie etwa der Küntscher-Nagelung wird sie erstaunlich wenig angewendet, was zu einem großen Teil auf ihre Komplexität zurückzuführen ist, da sowohl die Vorbiegung der Nägel als auch ihre Applizierung erhebliche manuelle Fertigkeiten des Orthopäden voraussetzen. Um dem Verfahren zu neuer Popularität zu verhelfen, haben wir vorbereitende Simulationen vorgeschlagen, die den Orthopäden vereinfachte Richtlinien im Sinne eines reproduzierbaren Vorgehens an die Hand geben sollten. Dabei konnten die grundsätzlichen Therapieprobleme und die Einschränkungen der möglichen Simulation weitgehend identifiziert werden. Dieser Beitrag setzt an den noch nicht bzw. noch befriedigend gelösten Teilaufgaben aus der Vorarbeit [1] auf.

2 Typische Probleme

In einem relativ aktuellen Beitrag hat Métaizeau die Anwendung seines Verfahrens noch einmal detailliert erläutert und Erweiterungen der Therapiemöglichkeiten vorgestellt. So können die Métaizeau-Nägel nicht nur wie ursprünglich vorgesehen zur Behandlung von Femurfrakturen eingesetzt werden, sondern ebenso für Frakturen von Humerus, Ulna, Radius etc. Bild 1 zeigt beispielhaft die Fixierung eines Metacarpus.

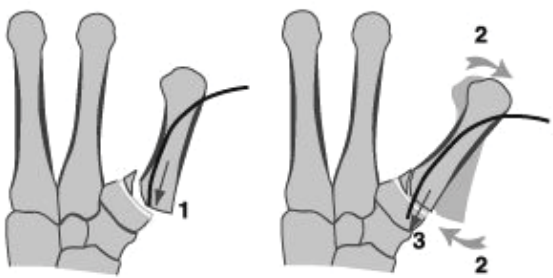


Bild 1: Metacarpusfixierung (Daumen)

In dieser Arbeit sind einerseits die Bilder der Fehlanwendungen von Interesse, weil sie die Notwendigkeit der zu erstellenden Richtlinien begründen, andererseits zeigen sie auch, welche komplexen Biegungsformen benötigt werden und wie sehr diese Formen von der Geschicklichkeit des Orthopäden abhängen (Bild 2, [2]).

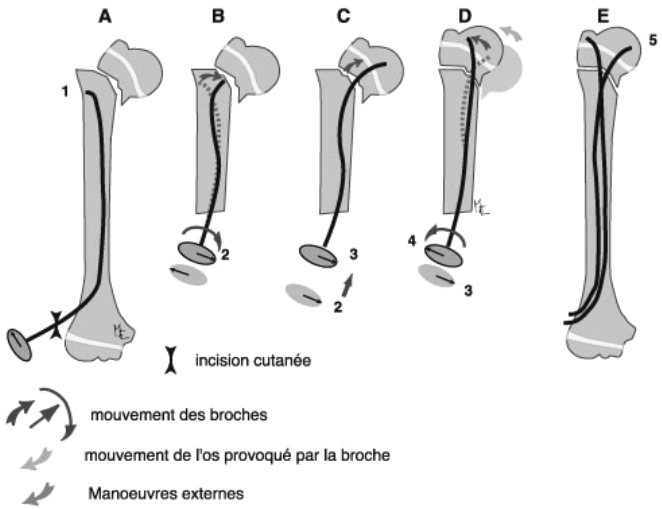


Bild 2: Einige Biegungsformen während des Einbaus

3 Die Bildung von Modellen

Die Therapie, also die Vorbereitung/Biegung des Nagels sowie sein Einbau, basiert vollständig auf handwerklichen Tätigkeiten des Orthopäden, der zwar Werkzeuge verwendet, aber keine Kalibrierung nutzt, so dass ein reproduzierbares Vorgehen ausgeschlossen ist. Die Orientierung erfolgt anhand des Röntgenbildes der Fraktur, und es ist klar, dass eine für den Therapeuten unbefriedigende Form des Nagels durch ggf. mehrere Nachbiegevorgänge angepasst wird. Ähnliches lässt sich auch über den Vorgang des Einbaus sagen, der quasi heuristisch rückgekoppelt ist.

Die Modellierung derartiger willkürlicher Prozesse ist mit den üblichen Simulationstechniken nicht zu erreichen. Wollte man das Verhalten des Orthopäden in einen Rückkopplungszweig einbauen, so müsste man dieses Verhalten zunächst erfassen, typischerweise mittels neuronaler Netze. Diese Vorgehensweise ist zwar

möglich, aber für den vorgesehenen Zweck viel zu aufwendig. Wir wollen daher nicht den Therapieprozess selbst modellieren, sondern wir beschreiben stattdessen die geforderten Ergebnisse nach wesentlichen Zwischenschritten und leiten daraus ihre relevanten Eigenschaften ab. Es handelt sich somit um eine eingeschränkte Form des reverse engineering.

Die Vorbiegung des Nagels kann nicht mit akzeptablem Aufwand simuliert werden, wenn das Vorgehen des Orthopäden exakt nachgebildet werden soll. Zur Abschätzung der mechanischen Eigenschaften der Métaizeau-Nagelung ist jedoch die exakte Form der Vorbiegung – die ohnedies nicht reproduzierbar ist – von eher marginalem Interesse. Benötigt werden dagegen die Restspannungen in der verformten Struktur. Daher sollte es genügen, den Biegevorgang so zu simulieren, dass eine brauchbare, ungefähr C-förmige Nagelgeometrie entsteht. Als Resultat erhält man dann aus der FE-Analyse eine verformte Struktur mit eingeprägten Restspannungen und plastischen Dehnungen, die für nachfolgende Analysen nutzbar ist. Diese Vorgehensweise ist nicht nur reproduzierbar, sondern bietet die Möglichkeit, durch Änderung der Biegewerkzeuge eine Geometriesynthese vorzunehmen.

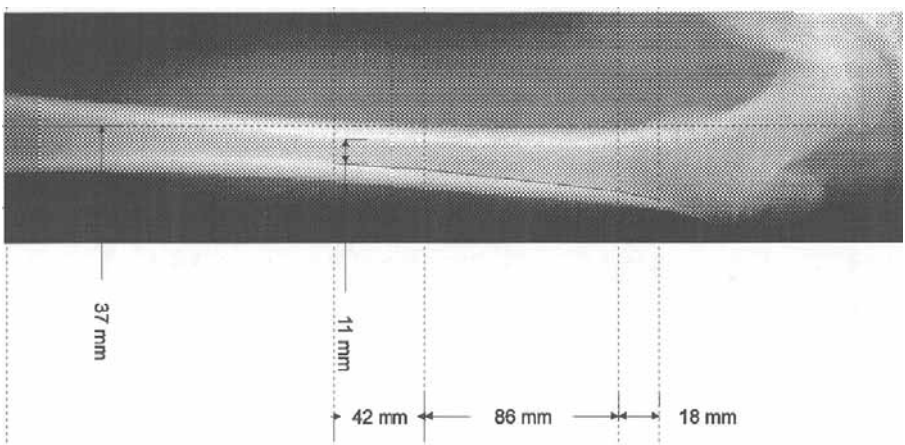


Bild 3: Femur eines 13jährigen mit einigen Abmessungen

Zur Simulation des eingebauten Nagels wird die Geometrie des Knochens benötigt. Zwar ist langfristig die patientenindividuelle Anpassung der Nagelung vorgesehen, für die hier interessierenden Voruntersuchungen genügt eine typische, hinreichend generische

Geometrie. Als erster Ansatz bietet sich die FE-gerechte Nachmodellierung des materiellen Holzmodells der experimentellen Untersuchungen an. Es basiert auf einem konkreten Röntgenbild (Bild 3). Es fällt auf, dass die reale Außenkontur des Knochens keineswegs wie die des Modells zylindrisch ist.

4 Knochenschwund und Knochenwachstum

Die Gestalt und der innere Aufbau von knöchernen Strukturen sind nicht nur genetisch bedingt, sondern unterliegen in entscheidendem Maße dem Einfluss äußerer Kräfte. Als Erster hat dies Julius Wolff 1892 in seinem Transformationsgesetz formuliert, welches durch Harold Frost 1960 in Form der Mechanostat-Theorie stark erweitert wurde [3].

Wolff konnte die Ausbildung der makroskopischen Knochenform dadurch erklären, dass sie den äußeren Kräften folgt. Eine ähnliche Überlegung liegt im Übrigen auch der Optimierung nach Mattheck [4] zugrunde, die von der Hypothese ausgeht, dass die Natur Kerbspannungen vermeidet. Darüber hinaus entdeckte Wolff die Ausrichtung der Trabekel, die ebenfalls dem Kraftfluss folgt. Zum Verständnis sei angemerkt, dass der Knochen keinesfalls eine homogene Masse bildet, sondern eine interne Struktur aufweist: Man unterscheidet zwischen der compacta, die eher hartholzähnlich aufgebaut ist, und der spongiosa, die einer netz- bzw. schwammartigen Struktur entspricht. Sie besteht aus zusammenhängenden Bälkchen, den Trabekeln, und diese weisen die kraftflussbedingte Orientierung auf.

Wolff konnte Form und Struktur – die Qualität – knöcherner Strukturen durch eine statische Betrachtung erklären. Darauf aufbauend gelang es Frost, das Phänomen von Knochenschwund und Knochenwachstum mittels elastischer Verformungen zu begründen. Die Knochenmasse – die Quantität – kann sich auch nach Abschluss des Wachstums deutlich ändern. Hierfür sind nach Frost die durch kurzzeitige Maximalkräfte bedingten elastischen Dehnungen des Knochens maßgebend. Den Zusammenhang kann man Bild 4 entnehmen. Dabei entsprechen 1000μStrain einer logarithmischen Dehnung von 0.1%.

Für uns ist hier wichtig, dass die Mechanostat-Theorie einen Grenzwert der Dehnung als Versagenskriterium liefert: Wird dieser Grenzwert deutlich überschritten, ist eine Fraktur zu erwarten. Für den kritischen Bereich unterhalb der Frakturdehnung kann dagegen bei langfristiger Einwirkung eine Knochennekrose entstehen.

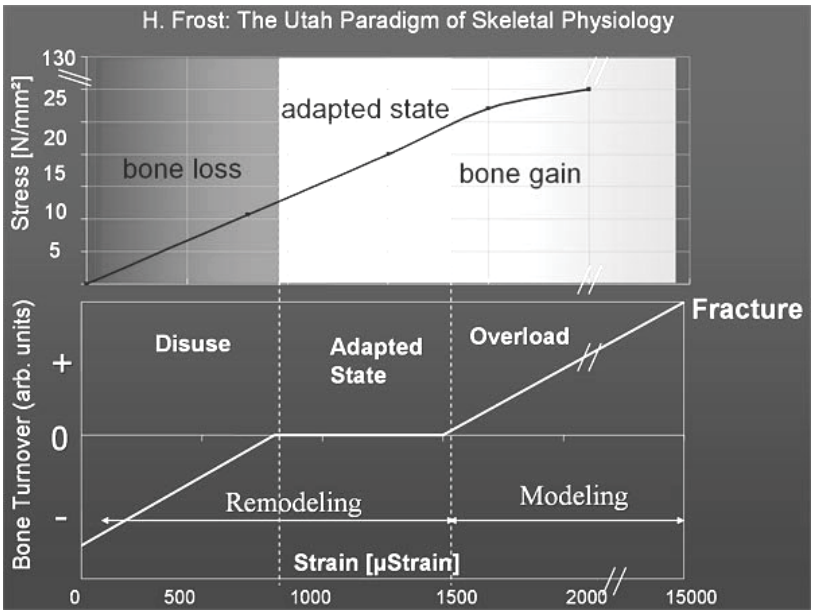


Bild 4: Mechanostat-Modell

5 Neue Simulationen

In der Basisuntersuchung [1] wurden Grundsätze zur Modellbildung aufgestellt, und es konnte eine erste Simulation des Biegeprozesses durchgeführt werden. Es stellte sich allerdings heraus, dass die gewählte Art der Weganregung nicht flexibel genug war, um ein hinreichend großes Spektrum an Formen zu erzeugen. Daher wurde eine konventionellere Art der Biegesimulation mit einer feststehenden Form und einem beweglichen Werkzeug entworfen, die weniger Konvergenzprobleme bereitete.

Der Biegeradius entspricht im Wesentlichen dem Formradius, der erreichbare Biegewinkel hängt von der Werkzeugzustellung und der Werkzeugposition ab. Mit der gewählten Konfiguration wird allerdings nur eine einfache Biegung erreicht. Wird ein echter Korbbogen gewünscht, ist eine zweite Biegung erforderlich. Dass darauf verzichtet zunächst werden kann, werden wir bei der Betrachtung der Knochengeometrie begründen. Eine typische Biegung zeigt Bild 5. Hier erkennt man auch die Werkzeugkonfiguration.

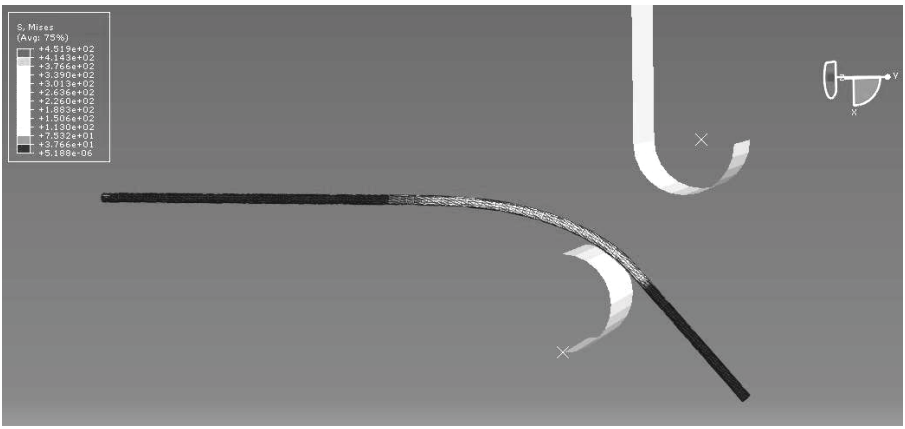


Bild 5: Nagel mit Vorbiegung und Werkzeugkomponenten

Die Simulation der Einbausituation erweist sich als problematischer. Im Gegensatz zu den Annahmen unserer Voruntersuchungen ist es nicht realistisch, den Montageprozess detailliert numerisch zu simulieren. Die größten Schwierigkeiten bereitet hier die Beweglichkeit des Nagels (Starrkörperbewegung), die durch den Orthopäden zur gezielten Positionierung des Nagels im Markraum ausgenutzt wird. Da die durch den Einbauvorgang selbst bedingten mechanischen Effekte wie erhöhte Kontaktpressungen nur kurzzeitig auftreten, genügt es, einen eingebauten Nagel zu betrachten. Eine mechanische Annäherung an den Einbauzustand lässt sich finden, indem ein vorgebogener Nagel mit Fest- und Loslager gefesselt wird und die Anpassung an den Einbauraum durch kinematische Umkehrung, hier also einfach die Zustellung des Knochens, ersetzt wird. Die so betrachtete Struktur ist nicht vollständig äquivalent, sollte aber die notwendigen Hinweise auf kritische Stellen geben können. Bild 6 zeigt die Geometrie des Knochens entsprechend dem Holzmodell zusammen mit einem Nagel. Wegen der gekrümmten Kontur des Markraums, die sich zur Frakturstelle links verengt, ist eine weitere Biegung des Nagels ebendort nicht sinnvoll.

Bei der Durchführung der FE-Analysen stellte sich allerdings heraus, dass auch dieses vereinfachte Modell nicht ohne intensive zusätzliche Untersuchungen verwendbar ist. Insbesondere sind die Kontaktbedingungen nur schwer einzuhalten. Dies dürfte sowohl den Materialgesetzen als auch der schwierigen Behandlung echter 3D-Kontakte geschuldet sein.

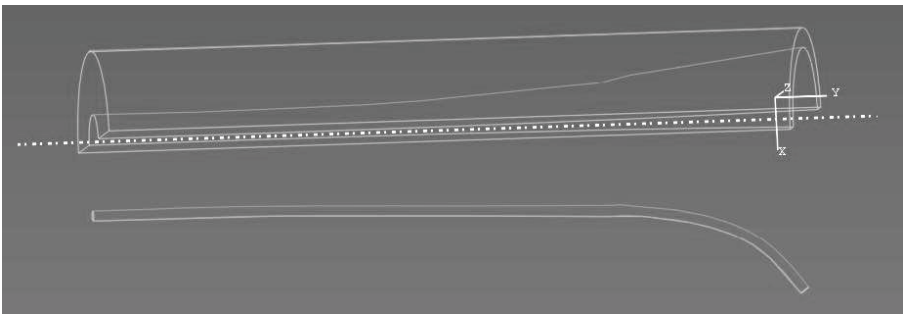


Bild 6: Knochenkontur mit vorgebogenem Nagel

Aufgrund der Konvergenzprobleme bei der Analyse des Kontakts zwischen zwei verformbaren Komponenten wurde alternativ der Nagel durch eine nichtverformabre, geometrisch äquivalente Struktur ersetzt. Durch diese weitere Vereinfachung entsteht ein Fehler, der zu hohe Spannungen in der Knochenstruktur liefert, ebenso dürfte wegen der Unverformbarkeit des Nagels, das Spannungsmaximum zu weit links liegen und einen zu hohen Gradienten aufweisen. Das Verhalten des Verbundes ist dennoch tendenziell abschätzbar. Das Ergebnis dieser Analyse (Bild 7) zeigt in der Tat die erwarteten Dehnungsüberhöhungen im Bereich der Fraktur (am linken Rand). Bemerkenswert sind dabei die Dehnungen auf der Symmetrieebene des Knochens, die aus den Tangentialspannungen resultieren. Sie liegen in der gleichen Größenordnung wie die Dehnungen an der Kontaktstelle.

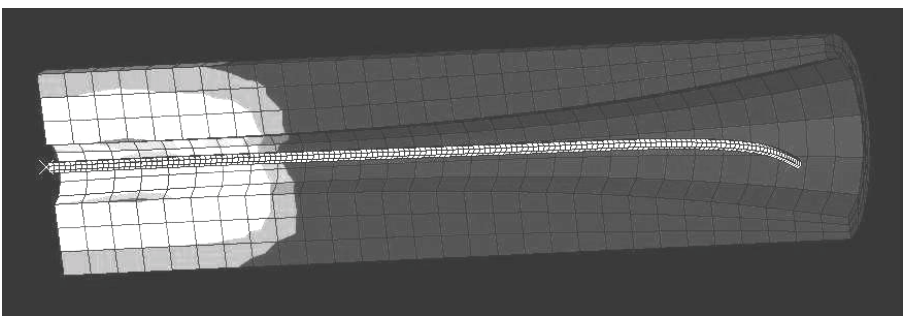


Bild 7: Dehnungen in der Knochenstruktur (Zwischenschritt)

Die berechneten Maximaldehnungen liegen bei dem dargestellten Zwischenschritt, der einer Zustellung des Nagels von ca. 0.2mm entspricht, im Bereich von 0.8%. Im Sinne des Mechanostat-Modells entspricht dies 8000µStrain. Dieser Wert wird als Overload verstanden, allerdings wird die Bruchgrenze von 15000µStrain noch nicht erreicht. Daher besteht hier zwar noch nicht die Gefahr des Strukturversagens durch Bruch, aber eine Nekrosegefährdung an der Kontaktstelle ist nicht auszuschließen, denn dieser Wert überschreitet die typische Maximaldehnung von ca. 2000µStrain.

Im Gegensatz zur realen Knochenstruktur ist die Wanddicke in der Umgebung der Fraktur wegen der zylindrischen Außenkontur zu groß. Daher sind die berechneten Dehnungen eher zu klein. Weitere Rechnungen sollten in jedem Fall eine besser angepasste Beschreibung der Knochengeometrie auf der Basis des Röntgenbildes (Bild 3) nutzen, da der Bezug zur ursprünglichen experimentellen Arbeit [5] infolge der starken Vereinfachungen ohnehin nicht mehr sinnvoll auswertbar ist.

6 Bewertung – Was ist erreichbar?

Es ist offensichtlich, dass die Idee einer vollständigen numerischen Simulation der Métaizeau-Nagelung zu optimistisch war. Der zunehmende Anteil an drastischen Modellvereinfachungen zeigt überdeutlich die Grenzen der aktuell verfügbaren Simulationswerkzeuge. Die wahrscheinlich größte Schwierigkeit ist in der Erfassung der menschlichen Interaktion zu sehen, die letztlich sowohl den Biegevorgang als auch die Applizierung des Nagels in entscheidendem Maße bestimmt. Dennoch sind wenigstens quantitative Aussagen möglich, die einer mechanisch begründbaren Erklärung des grundsätzlichen Verhaltens der hier betrachteten Therapieform dienen können. Weitere Parameterstudien, die aus rechentechnischen Gründen bis jetzt noch nicht in hinreichendem Umfang möglich waren, sollten die vorläufigen Ergebnisse stützen und präzisieren. Hierzu ist es in jedem Fall erforderlich, die Algorithmen zur dreidimensionalen Kontaktanalyse weiter zu evaluieren. Hier bieten sich weitere Simulationen mit weniger komplexen orthopädischen Fixierungstechniken an, bei denen weniger störende Nebeneffekte zu erwarten sind, zum Beispiel die Ostesynthese mit verschraubten Platten.

7 Zum Schluss

Alle Vereinfachungen hatten zum Ziel, das komplexe System der elastisch-stabilen Marknagelung für eine Bearbeitung mit Standardalgorithmen aufzubereiten. Dass dies nicht das letzte Wort bleiben sollte, liegt auf der Hand. Jede Verbesserung der Simulationstechnik für den Fall der Métaizeau-Nagelung unterstützt die numerische Analyse biomechanischer Effekte. Die dargestellten Untersuchungen haben unser Verständnis für die Modellierung von mechanischen Verbünden aus biologischen und technischen Komponenten erweitert. Als zukünftiger Bereich für Simulationen ist auf dieser Basis sehr gut die Prothetik vorstellbar; neuartige Beinprothesen beispielsweise werden nicht nur kraftschlüssig mit dem Stumpf verbunden, sondern können auch mittels geeigneter stiftschraubenartiger Adapter fest mit dem Knochen werden.

Literatur

[1] Prüfer, Hans-Peter: *Simulation der Einbausituation des Nancy-Nagels. Richtlinien zur Vorbiegung.* 5. Gem. Koll. Konstruktionstechnik, Dresden 2007

[2] Métaizeau, JP: *L'embrochage des fractures du membre chez l'enfant*. Maîtrise Orthopédique 116, September 2002

[3] Frost, Harold M.: *The Utah Paradigm of Skeletal Physiology Vol. 1,2*, ISMNI, 1960

[4] Mattheck, Claus: *Design in der Natur*. 4., überarb u. erw. Aufl. Rombach, Freiburg im Breisgau 2006

[5] Lippeck, André, Schlacht, Thorsten: *Konstruktionssystematische und experimentelle Untersuchungen eines nicht-linearen Osteosyntheseverfahrens.* Konstruktiver Entwurf, Ruhr-Universität Bochum, 1995

Kopplung von Mehrkörpersimulation und experimenteller Untersuchung von Gelenkendoprothesen

Christian Kliewe, Klaus Brökel, Rainer Bader*, Christoph Wörnle**

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD, Universität Rostock
*Orthopädische Klinik, Universität Rostock
**Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik, Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2, D-18059 Rostock
Email: christian.kliewe@uni-rostock.de; Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Die Optimierung von Hüftendoprothesen erfordert die umfassende Kenntnis der Verhältnisse im Gelenk. Für Verschleiß- und auch Luxationsuntersuchungen sind die für die jeweilige Belastungssituation auftretenden Gelenkkräfte zu bestimmen. Um die Belastungsverhältnisse realitätsnah untersuchen zu können, sind experimentelle Prüfeinrichtungen erforderlich. Die Nachbildung der Weichteilsituation in Form von Muskeln, Sehnen, Bändern und der Kapsel ist praktisch nicht machbar. Eine Möglichkeit zur theoretischen Bestimmung der Gelenkkräfte besteht in der Mehrkörpersimulation (MKS). Mittels der inversen Dynamik wird für das mehrfach unterbestimmte System die Gelenkkraft berechnet. Die MKS kann jedoch keine Einflüsse aus der Gelenkgeometrie und der Materialpaarung erfassen. Dazu ist eine Kopplung von MKS mit einem Versuchsaufbau eines künstlichen Gelenks denkbar. Dies setzt voraus, dass die MKS und auch die Steuerung des Prüfstandes über geeignete Schnittstellen für den Datenaustausch verfügen. Die Bewegungen und die Krafteinleitung sind von einem Industrieroboter realisierbar. Eine echte Kopplung beider Komponenten stellt eine „Hardware in the Loop"-Lösung dar. Hier werden von der MKS die Koordinaten und die Kräfte als Sollwerte einem Roboter vorgegeben. Der Roboter führt diese Kraft-Weg-Vorgabe aus, erfasst dabei die Ist-Daten und gibt diese an die MKS zurück.*

Abstract: *The optimization of artificial hip joints requires the comprehensive knowledge of conditions. For wear, and also luxation investigations are to determine the joint forces arising out of the respective load situation. In order to be able to examine load conditions close-to-reality, experimental testing facilities are necessary. The reproduction of the tissue like muscles and tendons are not possible. A possibility for the theoretical determination of the joint-forces is the multi-body simulation (MBS). By means of inverse dynamics, joint force of the redundant system is determined. The MBS can seize however no influences from joint geometry and the material pairing. In addition a coupling of MBS with an experimental setup of an artificial joint is conceivable. This presupposes that the MBS and also the controlling of the testing device have suitable interfaces for data exchange. The movements and the force application are executable by an industrial robot. A genuine coupling of both components represents a "Hardware in the loop" solution. The coordinates and the forces are given to a robot. The robot implements this force, seizing thereby the actual data and returns these to the MBS.*

Stichwörter: *Hüftendoprothese, Mehrkörpersimulation, Hardware in the loop*

Keywords: *hip joint, multibody simulation, hardware in the loop.*

1 Einleitung

Die Testung von Hüftendoprothesen ist unverzichtbar für deren weitere Optimierung. Für Verschleißuntersuchungen stehen eine Vielzahl von Prüfständen verschiedener Hersteller zur Verfügung. Diese erfüllen die Anforderungen der Prüfnorm ISO 14242 mit deutlich eingeschränkten Bewegungsumfängen. Mit der vorhandenen Prüftechnik ist es nicht möglich, Bewegungen im Rahmen der physiologischen Grenzen und darüber hinaus auszuführen. Dies ist jedoch notwendig, wenn die Gelenkstabilität untersucht werden soll. Dazu sind Auslenkungen erforderlich, die bis zur Luxation des Gelenks reichen. Entsprechend der Prüfnorm werden die beiden Gelenkkomponenten entsprechend ihrer anatomischen Anordnung eingespannt. Es werden 3-achsig Schwenkbewegungen ausgeführt und einachsig die Last aufgebracht. Damit sind diese Prüfaufbauten nicht geeignet, die angestrebten Untersuchungen durchzuführen.

2 Ziel der Untersuchungen

Im Rahmen der jetzigen Arbeit soll ein Konzept für einen Prüfaufbau entwickelt werden, mit dem es möglich ist, die Kraftverhältnisse im Gelenk in den jeweiligen Gelenkstellungen nachzubilden. Ein generelles Problem dieser Untersuchungen ist die Bestimmung der Kräfte und Momente am Gelenk. Die Nachbildung der das Gelenk umschließenden Weichteile aus Muskeln, Sehnen und Bändern sowie der Kapsel ist praktisch nicht machbar. Aus ethischen Gründen ist es nicht möglich, Untersuchungen an lebenden Patienten mit den notwendigen Auslenkungen und dem damit verbundenen Risiken durchzuführen. Es liegen nur für ausgewählte Bewegungsmuster Messdaten vor [2]. Diese wurden an Patienten ermittelt, deren Endoprothesen mit DMS ausgestattet wurden, sodass die Messdaten per Telemetrie übertragen werden konnten [1]. Diese wenigen Datensätze bilden weitestgehend die Grundlage für die Validierung der theoretischen Ansätze. Die Nachbildung der Kraftverhältnisse kann somit nur derart gelöst werden, dass die Kräfte im Gelenk auf theoretischem Wege bestimmt und durch Aktuatoren aufgebracht werden. Die resultierende Gelenkkraft setzt sich aus Massen- und Trägkeitskräften sowie einer aus der Muskelspannung resultierenden Komponente

zusammen. Die Schwerkraft und die Trägheitskräfte können mit den klassischen Methoden der Mehrkörperdynamik bestimmt werden. Eine besondere Problematik besteht jedoch in der Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Muskeln. Die Realisierung der Bewegungen ist mit einem konventionellen 6-achsigen Knickarmroboter (Bild 1) oder auch mit einem speziellen Mechanismus [5] mit 6 Freiheitsgraden möglich. Der Roboter muss in der Lage sein, 3-achsige Drehungen sowie Verschiebungen in allen 3 Achsen auszuführen, wobei zusätzlich Kräfte und Momente in allen Richtungen entsprechend der Gelenkstellung und der äußeren Belastung in die Endoprothese eingeleitet werden müssen.

Bild 1: Versuchsaufbau mit Hüftendoprothese [3]

Der Roboter ist mit einer Kraft-Weg-Steuerung auszurüsten. Somit führt der Roboter weggesteuert die Schwenkbewegungen aus und leitet in den freien Translationsrichtungen die Lasten ein.

3 Kopplung von Roboter und MKS

Es ist einerseits möglich, den Roboter zur Ausführung der Bewegung und zum Aufbringen der in der MKS berechneten Lastdaten zu verwenden. Dies würde jedoch nur eine Visualisierung der MKS bedeuten und den Einsatz eines Roboters nicht rechtfertigen. Eine echte Kopplung stellt eine *Hardware in the Loop*- Lösung dar. Hier werden von der MKS die Koordinaten sowie auch die Kräfte als Sollwerte einem Roboter vorgegeben. Der Roboter führt diese Kraft-Weg-Vorgabe aus und erfasst dabei mittels eines Kraft-

Momenten-Sensors sowie der Drehgeber der Roboterachsen die Ist-Daten und gibt diese an die MKS zurück. Auf diese Weise lassen sich auch Luxationsvorgänge simulieren, bei denen nach Impingement, dem Anschlagen der Prothesenteile, das Gelenk aus der Pfanne herausgehebelt wird. Dabei wird das Drehzentrum des Kugelgelenks aufgehoben und geht in ein rheonomes Gelenk über. Die Bewegungsbahn des Kugelkopfes wird weiterhin vom Roboter erfasst und an den Simulationsrechner übergeben, so dass diese Parameter wiederum in der MKS für die Berechnung der Muskelkräfte einfließen.

4 MKS mit AnyBody®

Eine Möglichkeit zur theoretischen Bestimmung der Gelenkkräfte besteht in der MKS. Dabei wird ein System aus starren Körpern, den Knochen, gelenkig miteinander verbunden. Für die Nachbildung der Muskeln stehen mehrere Federmodelle zur Verfügung. Je nach Komplexität wird auch das geschwindigkeitsabhängige Verhalten der Muskeln berücksichtigt. An einem menschlichen Hüftgelenk wirken 23 Muskeln. Damit liegt ein mehrfach unterbestimmtes System vor, bei dem mehr Aktuatoren zur Verfügung stehen, als für die Ausführung der Bewegung notwendig sind. Um dennoch für alle Muskeln die jeweilige Zugkraft bestimmen zu können, wird mittels der inversen Dynamik unter Einführung weiterer Randbedingungen wie dem Minimum der eingesetzten Energie das Problem gelöst.

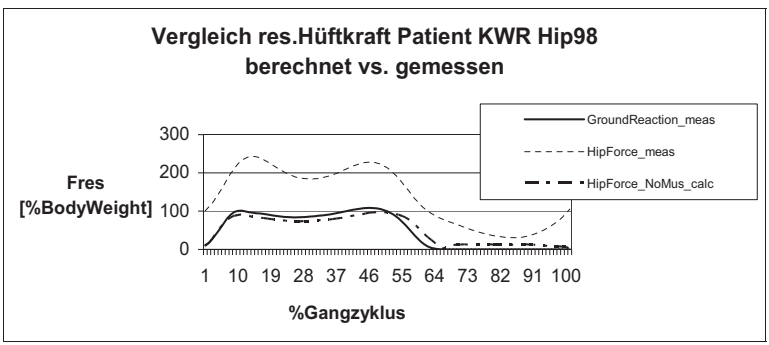


Bild 2: Resultierende Hüftkontaktkraft

Wie in der Studie von Bergmann et al. [4] gezeigt wurde, sind die in vivo auftretenden Gelenkkontaktkräfte höher als die resultierende Kraft in den Gelenken einer kinematischen

Kette. Die in vivo gemessene Hüftkontaktkraft beim normalen Gehen war mehr als doppelt so groß wie die kinetisch resultierende Hüftgelenkkraft (Bild 2). Der Unterschied zwischen diesen Kräften, das heißt der Anteil der Gelenkkontaktkraft, der nicht aus den Bodenreaktions-, Gravitations- und Trägheitskräften resultiert, wird vor allem durch die Muskeln verursacht.

Mit dem kommerziellen MKS-System *AnyBody®* wurden eine Reihe von Untersuchungen angestellt, um die speziellen Probleme der Muskelnachbildung zu erfassen. Zur Bewertung der Modellbildung und deren Parametrisierung sowie der Einflüsse von Muskeltyp, Kalibrierung und Kontraktionsgeschwindigkeit wurde das in *AnyBody®* bereitgestellte Modell *Gait3D* verwendet (Bild 3). Bei dem Modell *Gait3D* handelt es sich um ein freistehendes und lauffähiges Mehrkörpermodell. Der simulierte Gangzyklus basiert auf einer kinematischen Analyse, die wiederum durch Marker an den einzelnen Segmenten gesteuert wird. Die Bewegungsbahnen wurden mittels *motion capturing* aufgezeichnet. Im *Gait3D*-Modell wird eine äußere Kraft angesetzt, welche als gemessene Bodenreaktionskraft über den Fuß eingeleitet wird.

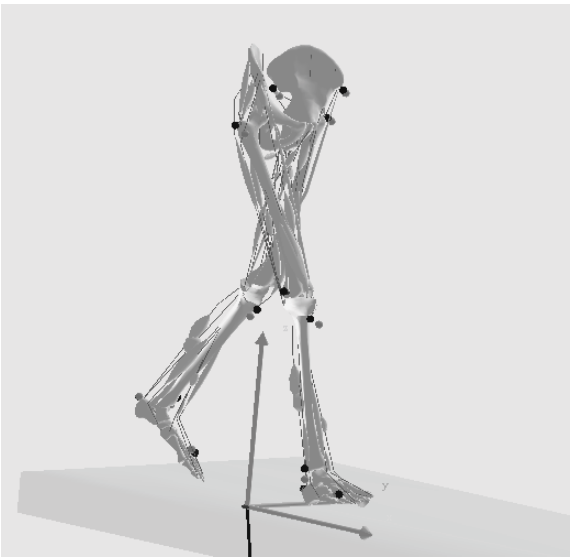


Bild 3: MKS-Modell Gait3D

Zuerst wurde mit dem *Gait3D*-Modell der Einfluss der verwendeten Muskeltypen verglichen. Es zeigt sich, dass das einfache Muskelmodell *AnyMus*, dessen maximale Muskelkraft nur vom physiologischen Muskelquerschnitt abhängt, für einen langsamen Gangzyklus recht gute Ergebnisse liefert (Bild 4). Das wesentlich komplexere Muskelmodell *Mus3E*, dass auf der Definition von Hill [4] basiert und durch 12 Parameter beschrieben wird, liefert erst bei großen Auslenkungen und hohen Geschwindigkeiten bessere Ergebnisse.

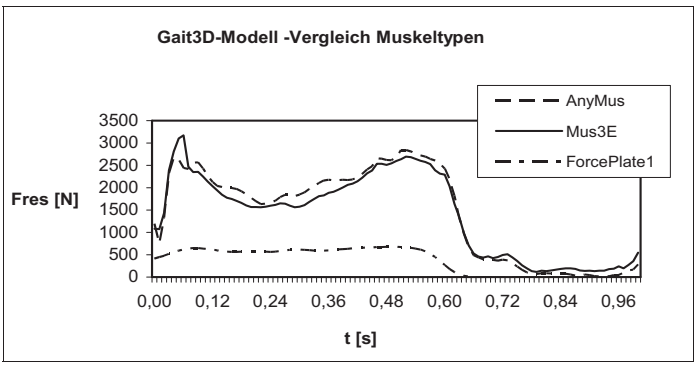


Bild 4: MKS-Modell Gait3D

Eine weitere Besonderheit bei der Berechnung der Gelenkkräfte einer kinematischen Kette, an der Muskeln angreifen, ist das Erfordernis der Kalibrierung der Muskeln. Beim Hill´schen Muskelmodell *Mus3E* werden u.a. die momentane Länge des Muskels und die momentane Kontraktionsgeschwindigkeit berücksichtigt. Somit muss innerhalb der natürlichen Bewegungsgrenzen das gelenkig verbundene Segmentpaar ausgelenkt werden, sodass die sich einstellende kürzeste Muskellänge bestimmt werden kann. Dabei darf der Muskel nicht erschlaffen und seine Kraft geht gegen Null. Je weiter ein Segment beim Kalibrieren ausgelenkt wird, desto größer wird die vom sich dabei verkürzenden Muskel aufbrachte Vorspannung sein, wenn das Segment wieder in die Nulllage oder in die entgegen gesetzte Endlage bewegt wird. Das Kalibrieren ist beim 1-Parameter-Modell *AnyMus* nicht notwendig, da hier die aktuelle Muskellänge nicht berücksichtigt wird.

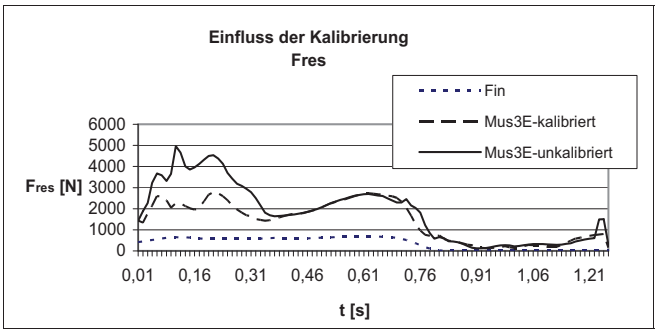


Bild 5: Kalibrierung Modell Gait3D

Ausgehend vom in AnyBody® bereitgestellten *Gait3D*-Modell wurde das MKS-Modell reduziert auf die zwei Segmente Pelvis (Becken) und Femur (Oberschenkel), so dass die Randbedingungen in der Modellbildung dem geplanten Prüfaufbau entsprechen (Bild 6). Das Pelvissegment wird dabei ortsfest gelagert. Die aus dem Gait3D-Modell ausgelesenen Bewegungen sowie die Kniekräfte werden in den Femur in Form einer äußeren Last eingeleitet. Beim 2-Segment- Modell wurden die Knoten, welche ursprünglich auf dem Tibia-Segment angeordnet waren, auf den Femur übertragen

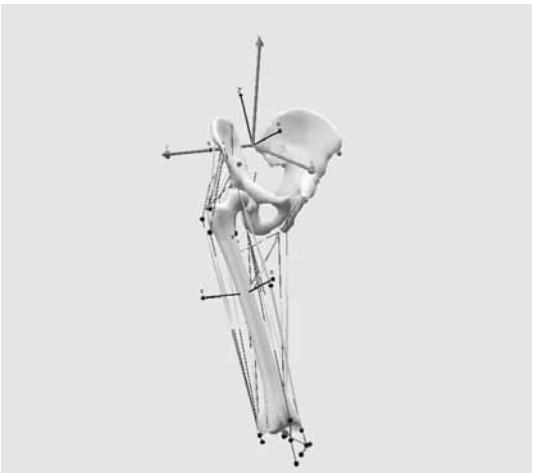


Bild 6: Zwei-Segment-MKS-Modell (Pelvis ortsfest -Femur)

Somit sind alle Muskeln an den beiden Segmenten Pelvis und Femur angelenkt. Die mit der Bewegung der Tibia einhergehende Streckung einiger über das Kniegelenk durchlaufender Muskeln ist in diesem Modell nicht gegeben. Um den Einfluss der über das Kniegelenk hinaus verlaufenden Muskeln abschätzen zu können, wurden diese Muskeln aus dem Modell entfernt. Es zeigt sich, dass sich die Kräfte im Kniegelenk und im Hüftgelenk verringern (Bild 7). Weniger Muskeln bewirken demzufolge eine geringere Vorspannung. Die verbleibenden Muskeln müssen jedoch größere Kräfte aufbringen, um das für die Bewegung notwendige Antriebsmoment zu erzeugen.

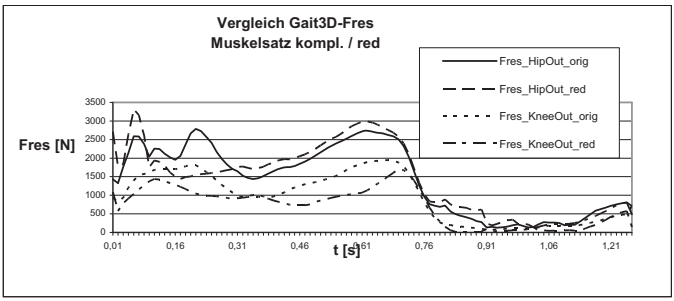


Bild 7: Vergleich vollständiges und reduziertes GAIT3D-Modell

Der Vergleich der resultierenden Hüftkraft beim Gait3D-Modell gegenüber dem auf zwei Segmente reduzierten Modell zeigt eine gute Übereinstimmung beim Verlauf (Bild 8). Die Differenzen in der Amplitude sind zum einen auf die fehlenden Massenkräfte aus dem Unterschenkel als auch durch die geringere, als äußere Last eingeleitete Kniekraft zu erklären.

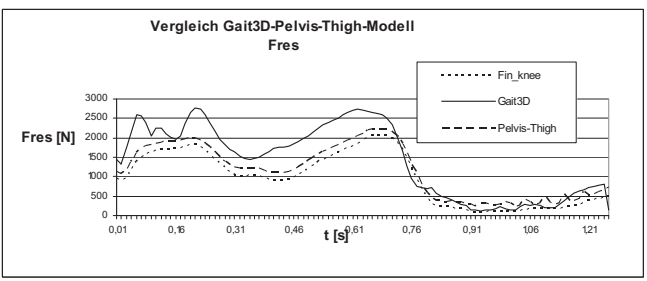


Bild 8: Vergleich vollständiges und reduziertes GAIT3D-Modell

Die durchgeführten Untersuchungen lassen folgenden Schluss zu. Das reduzierte Zwei-Segment-Modell gibt die resultierende Gelenkkraft mit einer Abweichung von max. 20 % wieder, auch wenn mit dem 1-Parameter-Muskelmodell gerechnet wird. Es sollten jedoch alle Muskeln enthalten sein. Entscheidend sind die äußeren Lasten in Form der gemessenen Bodenreaktionskräfte. Das MKS-Modell sollte möglichst einfach gehalten werden. Diese Forderung ergibt sich schon aus der notwendigen Rechnerleistung. Das MKS-System *AnyBody®* verfügt nicht über die notwendigen Schnittstellen zum Datenaustausch, weshalb auf ein offenes System wie z.B. *Mobile* ausgewichen werden muss. Erste Voruntersuchungen [3] haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, ein auf einem Simulationsrechner laufendes MKS-Modell mit dem Steuerungsrechner des Roboters gemäß Bild 9 zu koppeln. Der zyklische Datenaustausch zwischen Simulationsrechner (Server) und Steuerungs-PC (Client) des Roboters erfolgt im 12 ms-Takt. Zunächst werden vom Steuerungs-PC die Ist-Daten des Roboters (Position, Kräfte und Momente) empfangen, extrahiert und im XML-Format an den Simulationsrechner gesendet. Im ersten Simulationsschritt werden neue Sollwerte in der MKS für den Roboter berechnet und an dessen Steuerungs-PC zurück gesendet sowie die Schleife erneut ausgeführt.

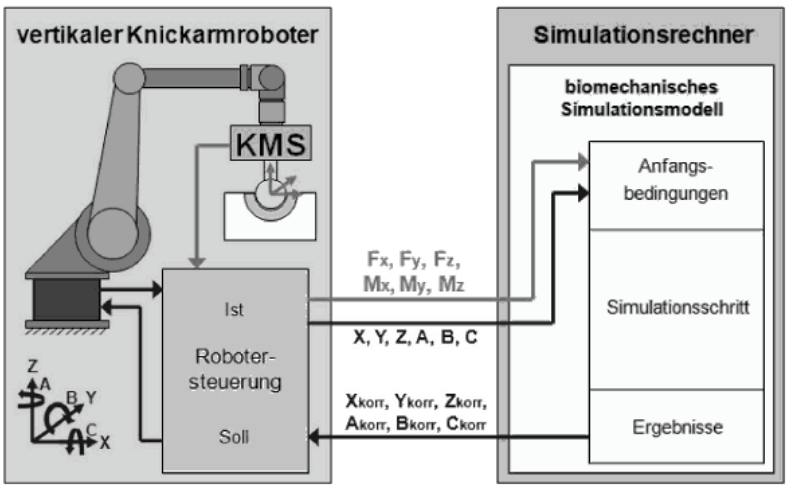


Bild 9: Kopplung MKS-System mit dem Roboter [3]

Bei diesem Versuchsaufbau spielt die Eigendynamik des Roboters eine große Rolle. Die Massenträgheit wie auch Trägheit der Leistungselektronik führt dazu, dass die berechneten Bahnkorrekturen nicht schnell genug ausgeführt werden können. Der Simulationsrechner muss innerhalb einer Abfragezeit von 12 ms den nächsten Simulationsschritt berechnen, was bei einem komplexen biomechanischen Modell der Hüfte nur mit entsprechender Rechenleistung machbar ist. Der Datenaustausch wird abgebrochen, wenn die Sollwerte für die Bahnkorrekturen nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen. Die Abweichung der Bahnkurven des Roboters konnte durch Verringerung der Simulationsschrittweite kompensiert werden. Damit hat der Roboter mehr Zeit, um die Bahnkorrekturen auszuführen.

Die Durchführung der Simulationen wird in Echtzeit nicht möglich sein. Dies ist jedoch nicht problematisch, da für jeden Simulationsschritt die Kräfte unter Berücksichtigung der dynamischen Verhältnisse quasi in Echtzeit berechnet werden, nur die Ausführung des Simulationsschrittes durch den Roboter erfolgt zeitverzögert. Der Einfluss geschwindigkeitsabhängiger Größen wie z.B. der Reibung im realen Gelenk des Versuchsaufbaus wird nicht berücksichtigt.

Literatur

[1] Bergmann G: In vivo Messung der Belastung von Hüftimplantaten. Verlag Dr. Köster, Berlin, 1997

[2] Bergmann G, Deuretzbacher G, Heller M, Graichen F, Rohlmann A, Strauss J, Duda GN: Hip contact forces and gait patterns from routine activities. J Biomech 34:859-871, 2001

[3] Fischer M : Machbarkeitsstudie Hardware in the Loop-Simulation eines menschlichen Hüftgelenks mit einem kraftgeregelten Industrieroboter, Diplomarbeit, 2008

[4] Hill A., The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. Proceedings of the Royal Society of London B 126, 136–195, 1938

[5] Kliewe C, Bewegungs- und Luxationssimulator für Endoprothesen, Shaker Verlag, 2006

Strength Scaling in Composite Laminate Design

Ahmad Rehan, Karl-Heinrich Grote, Christiane Beyer

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Maschinebau
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Email: {ahmad.rehan, grote, beyer}@ovgu.de

Abstract: *Unlike conventional materials design the scaling phenomena in composite materials design is not very well understood. Question arises in the mind of a designer, how to scale up a composite materials design? Is design safe based on strength values from small test coupons? In this paper scaling effects in composite materials design are discussed and specially effects of ply-level and sub-laminate scaling. It is observed that in ply-level scaling strength reduces and in sub-laminate scaling strength remains same or some times increases with increase in size. A major purpose of this paper is to highlight the design techniques in scaling a composite materials design and a step towards increasing confidence building of industry in composite scale design and testing.*

Stichwörter: *Skalierung, sub-laminate, ply-level,strength.*

Keywords: *Scaling, sub-laminate, ply-level,strength.*

1 Introduction

The interest and research activities in composite materials have increased exponentially since last 3 or 4 decades. Thanks to their versatile beneficial properties and more importantly their cost effectiveness with time. The prices of steel and other conventional materials are increasing and that of the composite materials are coming down. A “breakeven point” is approaching for number of applications, makes the composite ideal material for the industry. Composite industry is in its childhood relative to the metal. Comprehensive data base for design of composite is not yet available as for the metals. This makes analytical studies uncertain in composites. Large safety factors need to be taken which directly affect the cost of the design. Moreover material properties available in literatures are mostly based on small scale coupons tested in laboratory. Large scale designs based upon small scale material data involve discrepancies. These discrepancies need to be understood and then can be identified by proper scaling laws. More importantly, boundaries need to be defined for the scaling laws validity or their extrapolation limits.

Interest in scale modelling techniques is growing day by day because structural responses can be predicted with good accuracy and also at less cost but strength is a phenomenon which has attracted many researchers because of its distinct response. Number of studies in recent decades have shown that strength has variable response with size and scaling method. [1]. Mostly strength theories do not account for size effect [2]. Complete scaling of composite structure is practically impossible because one cannot scale diameter of fibres and thickness of individual lamina. Normally geometry scaling in composites is done mainly by two configurations [3]

1. Ply level Scaling,
2. Sub-laminate scaling

The two configurations ply level and sub-laminate scaling are shown schematically in. fig. 1 In ply level scaling the number of each angle ply is multiplied by scaling factor whereas in Sub-laminate scaling the number of lamina, set of angle-plies, is multiplied by scaling factor. In complete scaling all the dimensions are also multiplied with the scaling factor. Some times all dimensions are not increased or in more general terms all parameters are not scaled, in that case it is called distorted configuration or incomplete similarity. In case of incomplete similarity we need to apply transformation techniques to get extrapolated results. The objective benefits of research in scaling composites design are

- to learn scaling techniques of a composite/engineering design in practical engineering situation or present in nature,
- establishing scaling laws at different scale levels and identify their limits,
- learn how the strength at one scale can affect the strength on other scale,
- development of size ranges based on basic design,
- decrease labour cost by constructing completely reduced scaled complex structure,
- large scale testing only for verification purposes.
- Many researchers have performed scaled testing on fibre, matrix and laminate level. Below is a brief summary of previous work done and results obtained.

1.1 Fibre Effects

There is much literature available suggesting that the constituent fibres of many composite behave like brittle materials [4], [5]. It is well established that the strength of brittle materials decrease with increase in size (size effect). According to Wisnom, fibres such as glass and carbon exhibit size effect mainly due to flaws in the microstructure of the fibres [6]. There is decrease in strength of carbon and glass fibres with increase in length and also increase in no of filaments [7] and with increasing diameter [8]. Richard A. Larder et al. [9] also reported the same effect in single glass fibre. In another study the strength of single aramid filament decreases with increase in length [10]. A study on fibres bundles, proved that the strength of a bundle decreases with increase in number of fibres, approaching a constant value for a large size bundle also the strength variability decreases with increasing number of fibres in a bundle [11]. In contrast, the average modulus of gold nanowires, with diameters ranging from 40 to 250 nm, is independent of diameter. The size effect on modules of a part can also depend upon the nanostructures of fibres as for example, the elastic modulus of polypyrole nanotubes dramatically increases with decreasing nanotube thickness [12].

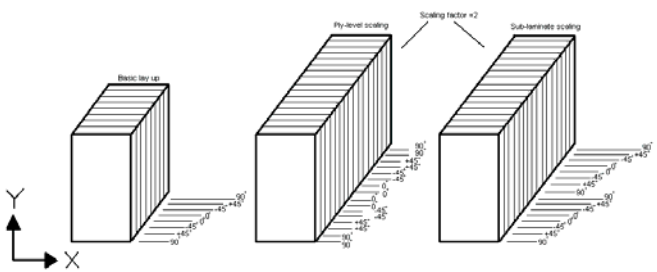


Figure 1: Schematic of Basic lay up, Ply-level, sub-laminate scaling

1.2 Matrix Effects

Towse et al. [13] carried out tensile tests on different sized specimens of an epoxy adhesive. Specimens of different sizes reached the same plateau value of stress, but the strains at failure increased dramatically with decreasing size Laminate Scaling Effects

Size effects are generally more evident in laminates scaled at ply-level rather than sub-laminate level scaled plates [4]. Ungbhakorn et al. [16] derived the similitude invariant

for anti-symmetric cross- and angle-ply laminated plates subjected to biaxial loading. Partial similitude was investigated. For partial similitude cases, the models distorted in stacking sequences, number of plies, and material properties are studied and the approximate scaling laws which yield good agreement are recommended. It is also reported that in flexure testing compressive strength size effects are larger than in tensile strength [17]. Table 1 presents the results obtained in previous research work based upon ply-level and sub-laminate scaling level.

Table 1: Strength scaling based on ply and sub-laminate level

	Scaling method	Sequence	Size effect	Ref.
Tension & flexure	Ply level	(90n/0n/90n/0n)s	Strength decrease	[1]
Tension & flexure	Ply level	(+45n/-45n/0n/90n)s	Strength decrease	do
Tension	Sub-laminate	(90/0/90/0)ns	Approx. same strength	[18]
Impact loading	Ply level	(0)n	Accurate similar response	[1]
do	do	(45n/-45n)s	Variable response with crossover	Do
do	do	(0n/90n)s	Variable response with crossover, strength decreases	Do
do	do	(-45n/0n/45n/90n)s	Variable response with crossover, strength decreases	Do
Flexure fatigue	Ply level	(0n)	Fatigue life decreased with increase in size	[19]
Compression test	Ply level	(0n)	Strength reduced	[20]
Transverse impact loading dynamic testing	Ply level	(±72n,02n)s	Good scaled structural response, size effect in delamination	[21]
Tensile test	Ply level	(0n)	Strength decrease	[15]
Tensile test	Ply level	(45n/90n/-45n/0n)S	Strength decrease	do
Tensile test	Ply level	(Aln,0n/90n) & (Aln, ±45n)	Strength decrease	[22]

2 Simulation Method

It is always feasible and easy to test small scale prototypes or to develop scale up products based upon small product already developed. These motives trigger a thought in the brain of the engineer, In which manner small composite design behaves when scaled up? Will it be much stronger or less than my previous small design and by which method

scaling should be done, Ply-level or sub-laminate? The present paper studies the effects of scaling on strength in above mentioned two cases. More importantly, if both behave in different manner when strength is the question then it needs to be identified, which comes under the true definition of static or dynamic similarity. According to the dynamic similarity the stresses at each point should remain the same at different scale when object are geometrically and statically similar [23]. For this purpose a simulation is done with finite element techniques using ANSYS®. A program is developed in APDL. SOLID186 element is used as matrix material and REINF265 elements are used as fibres. A basic laminate lay up as described in [24] and its scaled (scaling factor = 2) configuration for both method of scaling are shown in fig. 1. The material used are AS4 as fibre material and 3501-6 epoxy as matrix material. In simulation, instead of properties of lamina, material properties of constituent materials are used. The properties used [24] are as in table 2.

Table 2: Mechanical properties of AS4 fibre and 3501- epoxy

AS4		3501-6 epoxy	
Longitudinal modulus, E_{f1} (GPa)	225	Modulus, E_m (GPa)	4.2
Transverse modulus, E_{f2} (GPa)	15		
In- Plane Shear modulus, G_{f12} (GPa)	15	Shear modulus, G_m (GPa)	1.567
Major Poisson's ratio, v_{12}	.2	Possion ratio v_m	0.34
Transverse Shear modulus, G_{f23} (GPa)	7		
Longitudinal Tensile Strength, X_{fT} (MPa)	3350	Tensile Strength, Y_{mT} (MPa)	69
Longitudinal Compressive Strength, X_{fC} (MPa)	2500	Compressive Strength, Y_{mC} (MPa)	250

The fibre and matrix are embedded in a fibre reinforced element (FRE) The schematic diagram in fig. 2 shows the failure sequence of single FRE. Homogenized material property of FRE is calculated on the basis of fibre material properties, fibre direction, fibre volume fraction, matrix material properties and FRE dimensions. Then all the lamina are meshed with these element based on their individual properties. After applying the boundary conditions solution is obtained. After solution phase failure criteria for fibre and matrix materials are applied for each FRE at the location of interest on laminate. In this step four different possible situations can occur

- no failure,
- failed fibre,
- failed matrix. or
- failed matrix and fibre both.

If for example, matrix material failed then the failed matrix element is replaced by another degraded material (reduced material properties). Now the new homogenized material property of FRE is calculated on the basis of degraded matrix material and original fibre material. The incremented load is applied and solution is continued from the previous value of load. Results from previous analysis are imposed on changed material. In this way effect of residual stresses is also included from previous steps. On the basis of new results, now only the failure criterion for the fibre is checked. The matrix material is not checked for failure because it has already failed and in this step all the loads were bared by fibre only. At this step two possible situations can occur

- no failed fibre. or
- failed fibre.

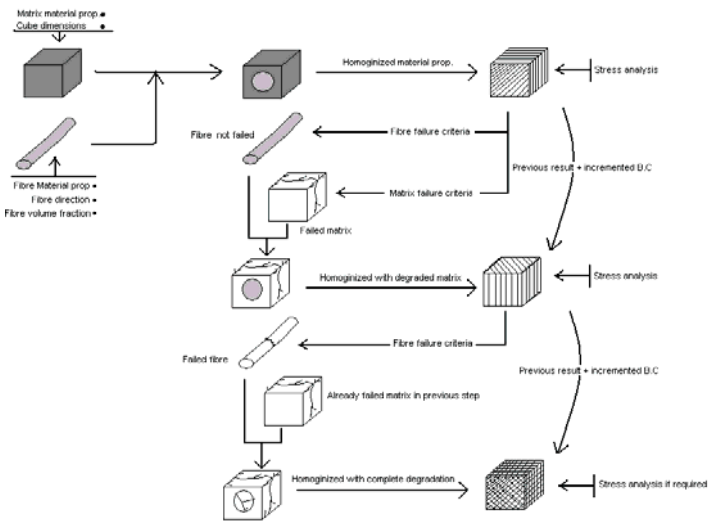


Figure 2 : constituent material degradation technique

If for example, this time fibre has also failed then the material of fibre is also changed with the degraded material and new homogenized material properties are calculated on the basis of both fibre and matrix failed materials. The process is revised till all the FRE fail in the region of interest. At that point the properties of laminate are evaluated. On the laminate scale the process is described by fig. 3. After applying the load on original

material and geometry the failed material are replaced with new degraded material in next solution phase. The displacement and stress results from previous solutions are imposed on material. The residual stresses from previous stresses may spread in material in vicinity of failed material and hence forcing them to also fail when reach their failed condition. This process will be repeated till the complete failure of the laminate in the region of interest. At this point strength properties are evaluated.

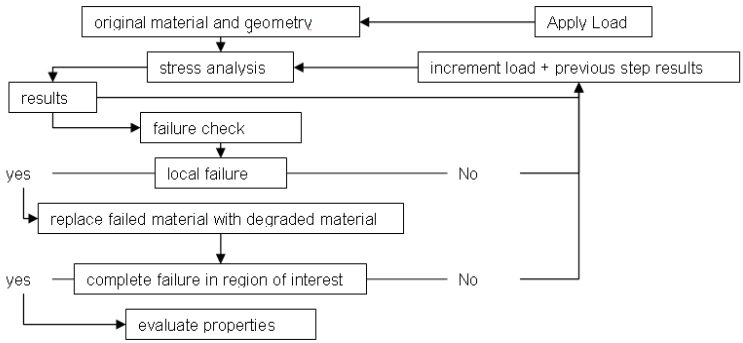


Figure 3: Strength evaluation process for laminate

This procedure will be repeated for other scale models and effect of strength will be observed.

With above approach the partial failure of lamina can be seen at some stress levels. Also, failure initiation of fibre or matrix in a particular lamina can also be observed. During the analysis following assumptions are made, negligible residual stresses during cooling process

- no separation among the fibres and matrix till complete distortion,
- no separation in between plies and
- thermal expansion effects are not considered.

Table 3: Dimensions of basic and scaled laminates

scale factor (k)=	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	No. Of Layers
1	1.1	1.375	13.75	8
2	2.2	2.75	27.5	16

3 Results

To check the scaling effects on ply-level and sub-level scaled laminates simulation is done with ANSYS®. A laminate as shown in fig. 1 and with dimension as shown in table 3 was stressed (tensile) in y direction. In present analysis small width to thickness ratio are used and in future the ratio will be subsequently increased to observe the edge effects. The two type of stress-strain graph was recorded during the simulation for each model, One for the whole laminate and second for the plane stress-strain along the 90^0 ply. The strain values were evaluated at 90^0 ply outward surface in the middle of length and width for both stress cases. The stress-strain curve for three models for whole laminate in basic, sub-laminate and ply-level scaled configurations are shown in fig. 4. The stress values are divided by the square of the scaling factor (k^2) in scaled cases according to similarity technique [23]. The slope of the stress-strain curve obtained matches with previous analyses and experiment results by various scientist and engineers for example by zinoviev at al [25]. In future large width to thickness ratio will produce better estimation of stress strain curve till complete failure of laminate. The plane stress-strain curve for the 90^0 ply is shown in fig. 5. Since in actual practice failure mechanism in these configurations has catastrophic behavior therefore it is assumed that complete failure has occurred after the fibre failure of 90^0 ply. In fig. 5 curve peaks show initiation of failure of 90^0 ply in all cases and also measuring point of the strength of the laminate at this strain from the stress-strain curve in fig. 4 after extrapolation. The failure % strains are 1.45, 1.37 and 1.4 in case of basic, ply-level and sub-laminate scaled cases respectively. Plane stresses at failure in 90^0 Ply are little less in case of scaled cases than basic configuration. As mentioned before, Fig. 4 represents the stress-strain behavior of laminate and the peaks in the curves shows the spread of matrix destruction in ±45 layers along the width that has reached the edges where stresses were being applied and measured. Since the width of the laminate is not large as compared to thickness therefore the edge effects are pretty dominant. This does not show that the laminate has completely failed. The fibres in ±45 layers have not failed yet. It is clear from the stress strain curve of the whole laminate that initiation of failure starts at low stress levels in large models than in small model but the data does not differentiate much in two method of scaling. A much more deep look does show the little difference and that is the initiation of final failure in ply-level case is little earlier than in sub-laminate case

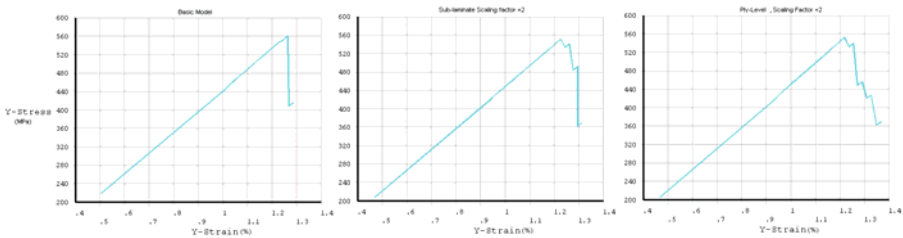


Figure 4 : Stress-Strain curve of basic, sub-laminate, ply-level scaled lamintes

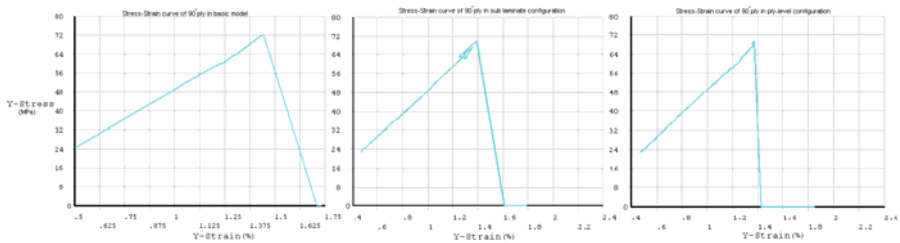


Figure 5: Stress-Strain curve for 90^0 ply in three cases

4 Conclusion and Future Work

Strength scaling effects for ply- level and sub-laminate case were simulated. The results show the reduction of strength in scaled cases but does not differentiate much between the scaling method. The strains at the initiation of failure at 90^0 ply does show different values for different cases. The results obtained are satisfactory as for as stress-strain behavior of the laminates and match with previous results obtained through experiments and analysis. But simulation does not show the increase in strength behavior in case of sub-laminate scaling that contradicts the experimental evidences shown in table 1. One of the reasons may be small width to thickness ratio. But overall the constituent materials degradation model worked well and showed the different paths of destructions/modes in sub-laminate and ply-level cases. In future large width to thickness will be used along with the large scaling factors. Also different types of loading conditions and lay-ups will also be simulated and results will be compared with experiments.

Literatur

[1] Karen E. Jackson, Scaling effects in the static and dynamic response of graphite-epoxy beam columns, NASA Technical Memorandum 102697 AVSCOM TR-90-B-006

[2] P.D.Soden, A.S.Kaddour, M.J. Hinton, Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise, Composites Science and Technology 64 (2004) 589–604

[3] J. Andre Lavoie, Costas Soutis, John Morton, Apparent strength scaling in continuous fiber composite laminates, Composites Science and Technology 60 (2000) 283 -299

[4] J. Lee, C. Soutis, Measuring the notched compressive strength of composite laminates: Specimen size effects, Composites Science and Technology (2007)

[5] W. J. Padgett, S. D. Durham and A. M. Mason, Weibull Analysis of the Strength of Carbon Fibers Using Linear and Power Law Models for the Length Effect, Journal of Composite Materials 1995; 29; 1873

[6] M.R. Wisnom, Size effects in the testing of fibre-composite materials, Composites Science and Technology 59 (1999) 1937-1957

[7] Peter W. Manders and Tsu-Wei Chou, Variability of carbon and glass fibers, and the strength of aligned composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites 1983; 2; 43

[8] Grifth AA, The phenomena of rupture and flow in solids. Phil Tran R Soc 1920;221a:163-98

[9] Richard A. Larder and Charles W. Beadle, Strength distributions of single filaments, Journal of Composite Materials 1975, 9, 241

[10] H. Daniel Wagner, S. Leigh Phoenix and Peter Schwartz, A study of statistical variability in the strength of single aramid filaments, Journal of Composite Materials 1984; 18; 312

[11] Coleman BD. On the strength of classical fibres and fibre bundles. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1958;7:60-70

[12] Sung-Kyoung Kim,Haiwon Lee, Measurement of the mechanical properties of one-dimensional polymer nanostructures by AFM, chapter 24, Applied Scanning Probe Methods IX, Springer Berlin Heidelberg,2008

[13] Towse A, Potter K, Wisnom MR, Adams RD. Specimen size effects in the tensile failure strain of an epoxy adhesive. Journal of Materials Science 1998,33,4307-14

[14] Rezaifard AH, Bader MG, Smith PA. Investigation of transverse properties of a unidirectional carbon/epoxy laminate part one: matrix properties. Composites Science and Technology 1994, 52, 275-85

[15] M.R. Wisnom , B. Khan, S.R. Hallett, Size effects in unnotched tensile strength of unidirectional and quasi-isotropic carbon/epoxy composites, Composite Structures 84 (2008) 21–28

[16] Variddhi Ungbhakorn, Pairod Singhatanadgid, Similitude invariants and scaling laws for buckling experiments on anti-symmetrically laminated plates subjected to biaxial loading, Composite Structures 59 (2003) 455–465

[17] Wisnom MR. The effect of specimen size on flexural strength of unidirectional carbon fibre-epoxy. Composite Structures 1991,18,47-63

[18] Johnson DP, Morton J, Kellas S, Jackson K. Scaling effects in sublaminate-level scaled composite laminates. AIAA Journal 1998,36,441-7

[19] Crowther MF, Starkey MS. Use of Weibull statistics to quantify specimen size effects in fatigue of GRP. Composites Science and Technology 1988,31,87-95

[20] Wisnom MR, Atkinson JA, Jones MI. Reduction in compressive strain to failure with increasing specimen size in pin-ended buckling tests. Composites Science and Technology 1997,57,1303-8.

Untersuchung des Stabilitätsverlustes einer elastischen Kupplung mit ringförmigem elastischem Gummielement

Vilhelm Milkov Hadzhiyski

University of Food Technology, UFT Plovdiv
Maritza 26 blv., 4002 Plovdiv, Bulgaria
Email: vil_hadzhiyski@yahoo.de

Inhalt: *Im Beitrag wird der Verlust der Funktionsfähigkeit einer elastischen Kupplung mit ringförmigem elastischem Gummielement verursacht durch den Stabilitätsverlust betrachtet. Der Stabilitätsverlust resultiert aus der Einwirkung der verteilten Querkraft, aufgetreten als Resultat der Radialverschiebung der durch die elastische Kupplung verbundenen Wellen. Die Abhängigkeit zwischen der äußeren Beanspruchung, der Durchbiegung und der Dicke des elastischen Elements der Kupllung wurde ermittelt. Der Wert der äußeren Beanspruchung, bei der der Stabilitätsverlust des elastischen Elements erfolgt, wurde ermittelt. Das Verfahren von Ritz wurde zur Lösung der Variation der Aufgabenstellung eingesetzt.*

Abstract: *In the paper is examined the loss of a working capacity of elastic clutch with rubber elastic element in the result of the loss of a stability. The loss of stability is in the result of action of a distributed crosswise force, which is in the result of radial displacement of connected with elastic clutch shafts. The dependence between external load, deflection and thickness of the elastic element of the clutch has been found out. The value of the external load, which realizes the loss of stability of elastic element has been defined. The Ritz method for solving of variational formulation of the problem has been used.*

Stichwörter: *elastische Kupplung, elastisches Element, Stabilität, Funktionsfähigkeit, Variationsverfahren*

Keywords*: elastic clutch, elastic element, stability, working capacity, variational method*

1 Einleitung

Bei der Projektierung der elastischen Kupplungselemente aus hochelastischen Werkstoffen (Gummi) sind zwei mit der Lebensdauer der Kupplung verbundenen Mechanismen zu berücksichtigen: die Festigkeit und der Stabilitätsverlust des elastischen Elements. Die elastischen Kupplungen mit elastischer Gummischiene haben wegen ihrer guten elastischen Eigenschaften, der Fähigkeit, die wesentlichen Linear- und Winkelverschiebungen der durch die Kupplung verbundenen Wellen zu kompensieren und des vereinfachten Einbaus, eine breite Anwendung in dem Maschinenbau gefunden. Bei bestimmtem Wert der angelegten aus der Radialverschiebung der verbundenen Wellen resultierenden Querlast besteht die Möglichkeit, dass die ringförmige Schiene ihre

Stabilität verliert, wobei lokale Überspannungen in einzelnen Teilen entstehen können. Diese Überspannungen können zum schnellen Bruch der Schiene führen. Die Bestimmung der Größe der anzulegenden Querlast ist daher eine wesentliche und notwendige Bedingung bei der Bestimmung der zulässigen Betriebsbeanspruchungen der elastischen Kupplung. Die analytische Bestimmung der kritischen Lasten aus der Sicht des Stabilitätsverlustes lassen die Projektierung von elastischen Kupplungen mit vorgegebener Stabilität zu.

2 Aufgabenstellung

Die Zielstellung dieses Beitrags ist die Untersuchung des Einflusses der Beanspruchung, die aus der Radialverschiebung der durch die elastische Kupplung verbundenen Wellen resultiert. Die Beanspruchung ist als verteilte Querlast dargestellt. Betrachtet wird eine elastische Kupplung mit ringförmigem elastischem Gummielement.

3 Theoretische Voraussetzungen

Mit der Steigerung der Leistung und der Betriebsgeschwindigkeit der gegenwärtigen Maschinen erhöhen sich die auf der elastischen Schiene einwirkenden Beanspruchungen. Die Lebensdauer der elastischen Kupplung wird im wesentlichen von der Konstruktion, der Form und der Abmessungen der elastischen Schiene bestimmt, bei Berücksichtigung des Spannungs- und Deformationszustandes der elastischen Schiene, der zum Festigkeits- oder Stabilitätsverlust führen kann. Bei der Projektierung der elastischen Kupplung muß der Konstrukteur die in der elastischen Schiene einwirkenden, als Resultat der Beanspruchung und der Kompensationseigenschaften der Kupplung entstehenden Kräfte bestimmen. Bei Einhaltung der Bauform der elastischen Gummischiene und bei Änderung der Abmessungen lassen sich die Tragfähigkeit, die elastischen und Dämpfungseigenschaften ändern. Die Frage zur Bestimmung der kritischen Beanspruchung, bei der der Stabilitätsverlust erfolgt, ist für die Projektierung von besonderer Bedeutung. Ausgehend von der Anforderung zur maximalen Lebensdauer müssen die zulässigen radialen Verschiebungen in Abhängigkeit von der Beanspruchung und der Drehzahl der elastischen Kupplung eingeschränkt werden. Die erzielten analytischen Ergebnisse können bei verschiedenen Baumaßen der elastischen Schiene und mechanischen Eigenschaften des verwendeten hochelastischen Werkstoffes (Gummi) Anwendung finden.

Die Prognostizierung der Lebensdauer der elastischen Kupplung ist mit der Kenntnis des Spannungs- und Deformationszustandes des elastischen Elements der Kupplung verbunden. Zur rationalen Projektierung müssen bekannt sein:

die zulässige maximale Abweichung, in diesem Fall die Radialabweichung der verbundenen Wellen

die durch die Abweichung hervorgerufene elastische Reaktionskraft

die durch die Einwirkung der Reaktionskraft verursachten Spannung und Deformationen.

Das Schema zur Untersuchung der Stabilität der ringförmigen Schiene der Kupplung ist im Bild 1 dargestellt.

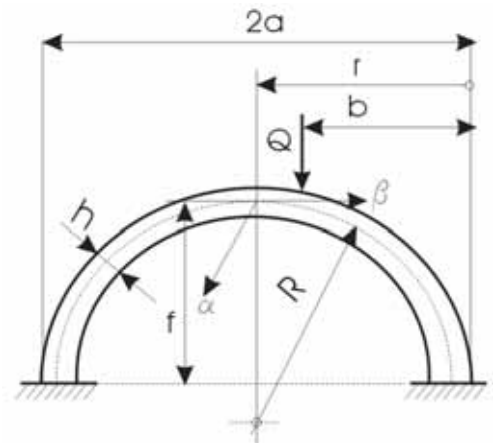


Bild 1: Form und Abmessungen der ringförmigen elastischen Schiene der Kupplung, wobei: f - Höhe der ringförmigen elastischen Schiene , $2a$ - Lichtspalt der ringförmigen elastischen Schiene, R - Hauptradius der Krümmung der mitteren Fläche, α, β - Koordinatenlinien der mittleren Fläche, h - Dicke der elastischen Schiene, b - linearer Abstand, an dem die verteilte äußere Last Q der Schiene angelegt wird r - laufende Koordinate.

Die Durchbiegung wird mit der folgenden Koordinatenfunktion dargestellt:

$$\omega = c_1(1-\rho^2)(1-\frac{1+\nu}{5+\nu}\rho^2) \tag{1}$$

wobei: $\rho = \frac{r}{a}$, ν - Poissonzahl ist, für Gummi $\nu = 0{,}47$, und daher ergibt sich:

$$\omega = c_1(1 - 1{,}2687\rho^2 + 0{,}2687\rho^4) \tag{2}$$

Ausgehend vom System zweier nichtlinearer Gleichungen für den Zusammenhang zwischen der Durchbiegung ω und der Funktion der Kraft Φ gilt [2, 4, 5, 6]:

$$\begin{aligned} &D_M \Delta\Delta\omega - \Delta_k \Phi - L(\omega, \Phi) = q \\ &\frac{1}{Eh}\Delta\Delta\Phi - \Delta_k \omega - \frac{1}{2}L(\omega, \omega) = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

Die Grenzbedingungen werden mittels Funktionen ω und Φ [2, 5, 6] formuliert.

Der vorgeschlagene Ausdruck (1) erfüllt die Grenzbedingingen bei $r = 0$, d.h.:

$$\omega = 0, \; M = D_M\left(\frac{d^2\omega}{dr^2} + \frac{\nu}{r}\frac{d\omega}{dr}\right) = 0$$

wobei: M - Biegemoment, D_M - Biegesteifigkeit.

Nach Einsetzen von dem angenommenen Ausdruck für ω (2) in Gleichungen (3) ergibt sich:

$$\frac{r}{Eh}\frac{d}{dr}\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(r^2 N_1) + \frac{2fr}{a^2}\frac{d\omega}{dr} + \frac{1}{2}\left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2 = 0 \tag{4}$$

wobei: E - Elastizitätsmodul der Gummi, N_1 - normale Tangentialkraft in der Ebene $\alpha = const$.

Bei Einhaltung der Bedingung $N_1 = 0$ (bei $r = a$) ergibt sich für die Gleichung (4):

$$\begin{aligned} N_1 = &\frac{Efhc_1}{a^2}(-0{,}5448 + 0{,}6344\rho^2 - 0{,}0896\rho^4) - \\ &- \frac{Ehc_1^2}{a^2}(-0{,}3 + 0{,}4024\rho^2 - 0{,}1136\rho^4 + 0{,}0112\rho^6) \end{aligned} \tag{5}$$

Zur Bestimmung der Kraft N_2 (normale Tangentialkraft in der Ebene $\beta = const$) wird die Gleichgewichtsgleichung [6] eingesetzt:

$$N_2 = \frac{d}{dr}(rN_1) \tag{6}$$

Nach Einsetzen von (6) in (5) ergibt sich:

$$N_2 = -\frac{Efhc_1}{a^2}(-0{,}5448 - 1{,}9031\rho^2 + 0{,}4479\rho^4) + \\ + \frac{Ehc_1^2}{a^2}(-0{,}3 - 1{,}2073\rho^2 + 0{,}5683\rho^4 - 0{,}0784\rho^6) \tag{7}$$

Für die Gesamtenergie gemäß der Gleichung gilt:

$$\Pi = U - A \tag{8}$$

wobei: Π - Gesamtenergie der Deformation der ringförmigen elastischen Schiene, U - potentielle Energie der Deformation, A - Summe der von den äußeren Kräfte verrichteten Arbeit.

Die potentielle Enegrie der Deformation wird nach dem Ausdruck

$$U = \int_0^a (N_1\varepsilon_1 + N_2\varepsilon_2) r dr \tag{9}$$

bestimmt und nach Einsetzen von ε_1, ε_2 (Deformationen entsprechend in den Ebenen $\alpha = const$ und $\beta = const$) gilt:

$$U = \int_0^a \left(N_1\left[\frac{\omega}{r} + \frac{1}{2}\left(\frac{d\omega}{dr}\right)^2\right] + N_2\frac{\omega}{r}\right) r dr \tag{10}$$

Für die Gesamtenergie der Deformation (8) nach Einsetzen von (5) und (7) in (10) nach dem Integrieren ergibt sich:

$$\Pi = 0{,}0451\frac{k^*}{4a^2}\pi Efh^2c_1^3 - 0{,}0837\frac{k^*}{4a^2}\pi Efh^2c_1^2 + 0{,}0385\frac{\pi Eh^2c_1^4}{a^2} - \\ - 0{,}0853\frac{\pi Efh^2c_1^3}{a^2} + 0{,}4122\frac{\pi Eh^3c_1^2}{a^2} - \frac{\pi Eh^4}{a^2}Qc_1 \tag{11}$$

wobei: $Q = \frac{Fa^2}{\pi Eh^4}(1-\alpha_1^2)(1-0{,}2687\alpha_1^2)$, $\alpha_1 = \frac{b}{a}$, $F = 2\pi bq$, q - Intensität der verteilten Last.

Nach Einsetzen von $\zeta_0 = \frac{c_1}{h}$, $k = \frac{2f}{h}$, $k^* = \frac{4a^2}{Rh}$, ergibt sich für (11):

$$\Pi = 0{,}0385\frac{\pi E h^5}{a^2}\zeta_0^4 - \left(0{,}0113k^2\frac{h}{R} - 0{,}0024k\right)\frac{\pi E h^5}{a^2}\zeta_0^3 + \\ + \left(0{,}0105k^3\frac{h}{R} - 0{,}0419k^2 + 0{,}4122\right)\frac{\pi E h^5}{a^2}\zeta_0^2 - \frac{\pi E h^5}{a^2}Q\zeta_0 \tag{12}$$

Der Ausdruck der äußeren Beanspruchung wird aus der Gleichgewichtsbedingung

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \zeta_0} = 0 \tag{13}$$

nach durchgeführter Differenzierung der Gleichung (12) ermittelt:

$$Q = 0{,}154\zeta_0^3 + \left(0{,}0073k - 0{,}0338k^2\frac{h}{R}\right)\zeta_0^2 + \\ + \left(0{,}8244 - 0{,}0837k^2 + 0{,}0209k^3\frac{h}{R}\right)\zeta_0 \tag{14}$$

Im Bild 2 ist die Anhängigkeit der äußeren Beanspruchung von ζ_0 graphisch dargestellt.

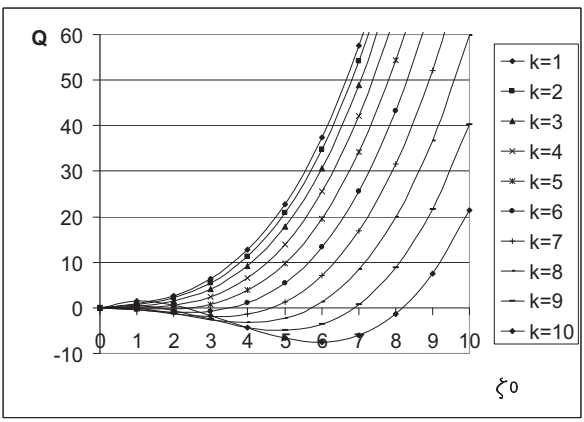


Bild 2: Abhängigkeit der äußeren Last Q von ζ_0

Die Bestimmung des Minimums und des Maximus der Funktion (14) läßt die Ermittlung der Werte der äußeren Last Q, bei der der Stabilitätsverlust der elastischen Schiene erfolgt [1, 3]:

$$Q_{\min} = 0{,}154\zeta_{0,1}^{3} + \left(0{,}0073k - 0{,}0338k^{2}\frac{h}{R}\right)\zeta_{0,1}^{2} + \\ + \left(0{,}8244 - 0{,}0837k^{2} + 0{,}0209k^{3}\frac{h}{R}\right)\zeta_{0,1} \tag{15}$$

$$Q_{\max} = 0{,}154\zeta_{0,2}^{3} + \left(0{,}0073k - 0{,}0338k^{2}\frac{h}{R}\right)\zeta_{0,2}^{2} + \\ + \left(0{,}8244 - 0{,}0837k^{2} + 0{,}0209k^{3}\frac{h}{R}\right)\zeta_{0,2} \tag{16}$$

Abschließend gilt als Ausdruck für (15) und (16):

$$Q_{\min} = -0{,}013k + 0{,}0302k^{2} + 0{,}0013k^{3} - 0{,}0031k^{4} + 0{,}0004k^{5} - 0{,}00002k^{6} + \\ + 0{,}150910^{-1}B^{1/2} - 0{,}153510^{-2}k^{2}B^{1/2} + 0{,}152610^{-3}k^{3}B^{1/2} - 0{,}113310^{-4}k^{4}B^{1/2} + 0{,}943710^{-6}B^{3/2}$$

$$Q_{\max} = -0{,}013k + 0{,}0302k^{2} + 0{,}0013k^{3} - 0{,}0031k^{4} + 0{,}0004k^{5} - 0{,}00002k^{6} - \\ - 0{,}150910^{-1}B^{1/2} + 0{,}153510^{-2}k^{2}B^{1/2} - 0{,}152610^{-3}k^{3}v^{1/2} + 0{,}113310^{-4}k^{4}B^{1/2} - 0{,}943710^{-6}B^{3/2}$$

wobei: $B = (k^{4} - 17{,}771k^{3} + 137{,}771k^{2} - 1331{,}8182k)$.

Im Bild 3 ist die Abhängigkeit der $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ von k dargestellt.

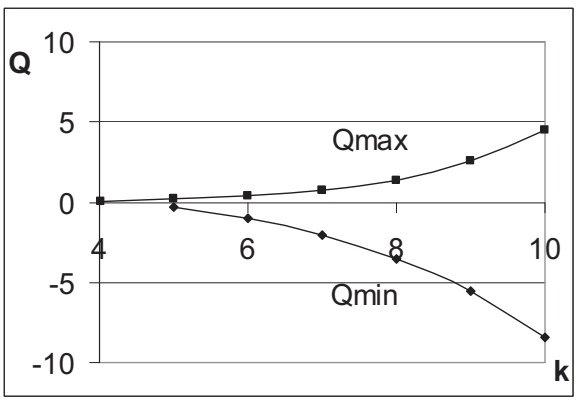


Bild 3: Abhängigkeit der Werte $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ der äußeren Last Q von der relativen Höhe der ringförmigen elastischen Schiene k, bei denen der Stabilitätsverlust der Kupplung erfolgt

4 Schlußfolgerungen:

Auf der Grundlage der Darstellung im Bild 3, lässt sich feststellen, dass mit Erhöhung von k sich auch der kritische Wert der Kraft erhöht, bei dem der Stabilitätsverlust erfolgt.

Ab dem Wert κ>4 nimmt Qmax nur positive Werte und Qmin nur negative Werte an.

Bei κ<4 hat die Funktion Q kein lokales Maximum oder Minimum im untersuchten im Bild 2 dargestellten Änderungsbereich des ζ_0.

5 Zusammenfassung:

Das Verfahren von Ritz kann zur Bestimmung der Stabilität der ringförmigen elastischen Schiene bei Anwendung der Beziehungen der Schalentheorie, d.h. die Gleichungen (3) für den Zusammenhang zwischen der Durchbiegung ω und der Funktion der Kraft Φ, Einsatz finden. Für die ringförmige elastische Schiene der Kupplung sind die analytischen Abhängigkeiten für den Wert der äußeren Last Q (14), mittels Minimisierung des Ausdrucks für die potentielle Gesamtenergie (12), abgeleitet. Abgeleitet sind die Beziehungen (15) und (16) zur Bestimmung des Werts der äußeren Last, bei denen der Stabilitätsverlust erfolgt.

Beim Einsatz des Ritz-Verfahrens ist Ausdruck für ω (2) vorgeschlagen. Er läßt die Ermittlung von Ausdrücken für die im Bild 2 bei Änderung des ζ_0 im Intervall $\zeta_0 = 0 \div 10$ dargestellte Beziehung $Q(\zeta_0)$ für die ringförmige elastische Gummischiene zu. Bei bestehender Notwendigkeit kann die Präzisierung der Ausdrücke (15) und (16) durch Einführung zusätzlicher Koordinatenfunktionen in (1) erzielt werden. Die Abhängigkeit der $Q_{\min}, Q_{\max}$ von der relativen Höhe der ringförmigen elastischen Schiene für das Änderungsintervall $4 \le k \le 10$ ist im Bild 3 dargestellt.

Literatur

[1] Alfutov N. A: Osnovi rascheta na ustojchivost uprugih system. 1978.

[2] Donnell L. H: *Beams, plates and shells.* McGRAW-HILL, 1976.

[3] Grigoliuk. E. I.; Kabanov V. V.: *Ustojchivost obolochek.* Moskva: Nauka, 1978.

[4] Korobejnikov S. N: *Nelinejnoe deformirovanie tverdih tel*. Novosibirsk: Springer, 2000.

[5] Libai A.; Simmonds J. G.: *Nonlinear theory of elastic shells.* CUP, 1998.

[6] Timoshenko S.; Woinowsky-Krieger S.: *Theory of Plates and Shells*. McGRAW-HILL, 1959.

Neue methodische Ansätze zum Beherrschen von Störeffekten

Markus Deimel

Polysius AG – A Company of ThyssenKrupp Technologies
Graf-Galen-Str. 17, D-59269 Beckum
Email: markus.deimel@thyssenkrupp.com; Internet: http://www.polysius.de

Inhalt: *In diesem Beitrag wird eine vom Verfasser neu entwickelte, mit Ähnlichkeitskennzahlen unterstützte Methode zur Identifizierung und quantitativen Beurteilung von Zielkonflikten und Störeffekten vorgestellt, die zusätzlich die geeignete Festlegung von Anforderungswerten und die Lösungssuche systematisch unterstützt. Außerdem beschreibt der Verfasser ein von ihm entwickeltes Vorgehen zum Erkennen und quantitativen Kennzahlen basierten Auswerten von Unverträglichkeiten bei der Lösungskombination.*

Abstract: *The paper presents a new similarity ratio based method for the identification and quantitative evaluation of goal conflicts and negative effects. The approach enables the suitable definition of conflicting requirement values and supports the search of alternative solutions systematically. Furthermore, the author describes a new developed procedure for the quantitative and reatio based detection of incompatibilities within the combination of partial solutions.*

Stichwörter: *Ähnlichkeitskennzahlen, Zielkonflikte, Unverträglichkeitsanalyse, Störeffekte*

Keywords: *similarity ratios, goal conflicts, analysis of incompatibilities, negative effects*

1 Einleitung

Für eine kostenoptimale Konstruktion ist es besonders wichtig, Störgrößen [1, 2, 3] möglichst früh zu erkennen, um diese durch Wahl alternativer Teillösungen zu vermeiden oder zu vermindern oder zumindest die Konstruktion unter Berücksichtung eines zulässigen Wertes der Störgröße, z.B. einer auftretenden Wärmedehnung, geeignet auszulegen. Bislang gibt es kaum quantitative Methoden, um bei Kenntnis erster parametrischer Funktionszusammenhänge das Auftreten von Störeffekten zu erkennen und deren Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit rechnerisch abzuschätzen. Diese Methoden sind insbesondere für die Analyse von Zielkonflikten und die verträgliche Verknüpfung von Teillösungen zu komplexeren Strukturen sehr hilfreich.

2 Erkennen und quantitatives Beurteilen von Zielkonflikten

Ein Zielkonflikt liegt genau dann vor, wenn das Ändern von Eigenschaften, wie z.B. eines Wirkprinzips oder einer Prinzipiellen Lösung, die Erfüllung einer Anforderung verbessert und gleichzeitig die Erfüllung einer zweiten Anforderung verschlechtert. Ein Beispiel ist z.B. ein Hebel als Übertrager, von dem gleichzeitig eine hohe Kraftverstärkung und ein hohes Wegverhältnis gefordert würde. Wegen des Energieerhaltungssatzes ist dies natürlich nicht gleichzeitig erfüllbar. Änderungen von Systemgrößen, z.B. von Kräften oder Wegen, die Zielkonflikte erzeugen, wirken sich negativ auf die Erfüllung der Konstruktionsaufgabe aus und können damit einen Störeffekt erzeugen.

Insbesondere Kennzahlen, z.B. in [4, 5, 6], eignen sich sehr gut für das Darstellen von Zielkonflikten, weil sich mit ihnen sowohl die Menge der Lösungsparameter als auch die Anforderungsgrößen sehr kompakt in Form von algebraischen Ausdrücken so bündeln lassen, dass ein Zielkonflikt durch zwei Kennzahlen π_{Ai} und π_{Bi} darstellbar ist. Durch die quantitative Auswertung lässt sich der Konflikt besonders einfach erkennen, weil der Wert der Kennzahl π_{Ai} zunimmt und der Wert von π_{Bi} abnimmt oder umgekehrt. Das systematische Erkennen von Zielkonflikten wird anhand des Beispiels der Entwicklung einer reibschlüssigen Wellenkupplung aufgezeigt (Bild 1).

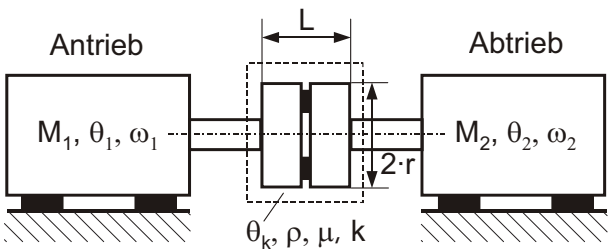


Bild 1: Schematischer Aufbau einer als Beispiel behandelten reibschlüssigen Wellenkupplung mit An- und Abtrieb und charakteristischen Lösungsparametern

Die Kupplung soll in diesem konkreten Beispiel innerhalb möglichst kurzer Zeit schaltbar ein Drehmoment von einer Antriebsmaschine auf eine Abtriebsmaschine übertragen. Tabelle 1 enthält einen Auszug aus der Anforderungsliste mit den funktional relevanten Anforderungen. Um das Aufstellen der Kennzahlen zu unterstützen, wurden -

ergänzend zum üblichen Aufbau einer Anforderungsliste - den Anforderungen die anforderungsrelevanten Parameter mit den Optimierungsrichtungen zugeordnet.

Tabelle 1: Funktional relevante Anforderungen an eine als Beispiel behandelte schaltbare Kupplung (Auszug)

Gliederung	Nr.	Benennung	Werte, Daten	F /M /W	Relevante Parameter mit Optimierungsrichtung
1. Funktion	1.1	Drehmoment von Antrieb auf Abtrieb schaltbar übertragen	$M_k > 60$ Nm	M	$M_k\uparrow = \mu\uparrow \cdot F_N\uparrow \cdot r\uparrow$ $M_1 = 50$ Nm $\rightarrow$, $M_2 = 25$ Nm $\rightarrow$, $\theta_1 = 0{,}04$ kgm^2 $\rightarrow$, $\theta_2 = 0{,}02$ kgm^2 $\rightarrow$
	1.2	Geringe Synchronisierungszeit	$\Delta t < 0{,}2$ s	M	$\Delta t\downarrow$
	1.3	Drehzahlen zu Beginn des Synchronisierungsvorgangs	$70\ s^{-1} < \omega_1 < 470\ s^{-1}$, $\omega_2 = 0$	F	$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = 400\ s^{-1}\rightarrow$
2. Kräfte	2.1	Massenträgheitsmoment gering halten		M	$\theta_k\downarrow = \rho\downarrow \cdot r^4\downarrow \cdot L\downarrow$
3. Geometrie	3.1	Radius	$r_{max} = 60$ mm	F	$r_{max}\rightarrow$
	3.2	Länge	$L_{max} = 90$ mm	F	$L_{max}\rightarrow$
4. Gebrauch	4.1	Verschleißvolumen gering halten		M	Bei Festkörperkontakt: $V_W\downarrow = F_N\downarrow \cdot v\downarrow \cdot \Delta t\downarrow \cdot k\downarrow$, mit $v \sim \Delta\omega \cdot r$

M_k: Kupplungsmoment, M_1: Antriebsmoment, M_2: Beharrungsmoment, $\theta_{1,2}$: Massenträgheitsmomente von An- und Abtrieb, $\Delta\omega$: Winkelgeschwindigkeitsdifferenz zwischen An- und Abtrieb, F_N: Normalkraft, μ: Haftreibungskoeffizient, r: mittlerer Radius, Δt: Synchronisierungszeit, L: Länge der Kupplung, k: Verschleißkoeffizient, ρ: Dichte, ρ_0: Bezugswert für Dichte, z.B. Dichte von Stahl.

Aus den relevanten, voneinander unabhängigen und potenzierten Parametern (siehe rechte Spalte in Tabelle 1) werden Teilaufgaben-Kennungen zur Zielkonfliktanalyse aufgestellt. Einen vollständigen Satz von Teilaufgaben-Kennungen erhält man, wenn man jeden optimierbaren Parameter so in einer Kennzahl anordnet, dass eine potenzierte Größe mit positiver Optimierungsrichtung, z.B. F_N in Zeile 1.1 (Tabelle 1), im Zähler und eine mit negativer Optimierungsrichtung, z.B. r^4 in Zeile 2.1, im Nenner angeordnet ist. Um die Kennwerte dimensionsfrei zu machen, werden die Größen mit aufgabeninvarianten Parametern kombiniert. Die Kennzahlen werden so aufgebaut, dass ihre Werte mit

zunehmender Lösungsgüte zunehmen. Aus dem berechneten Kennzahlen-Satz zur Analyse von Zielkonflikten (Tabelle 2) ist ableitbar, dass die Normalkraft F_N einen einfachen und der Radius r einen zweifachen Zielkonflikt erzeugen.

Tabelle 2: Vollständiger Salz von Teilaufgaben-Kennungen zur Zielkonfliktanalyse am Beispiel einer schaltbaren Reibungskupplung

Anforderungen			
Drehmoment übertragen	Verschleiß gering halten	Massenträg-heitsmoment gering halten	Geringe Synchroni-sierungszeit
$\pi_1 = \mu$	$\pi_4 = \frac{\theta * \Delta\omega^2}{F_N \, r_{max}}$	$\pi_8 = \frac{\rho_0}{\rho}$	$\pi_{11} = \frac{1}{\Delta\omega \cdot \Delta t}$
$\pi_2 = \frac{F_N \, r_{max}}{\theta * \Delta\omega^2}$	$\pi_5 = \frac{r_{max}}{r}$	$\pi_9 = \frac{r_{max}}{L}$	--
$\pi_3 = \frac{r}{r_{max}}$	$\pi_6 = \frac{1}{\Delta\omega \cdot \Delta t}$	$\pi_{10} = \frac{r_{max}^4}{r^4}$	--
--	$\pi_7 = \frac{1}{k \rho_0 r_{max}^2 \Delta\omega^2}$	--	--

Zielkonflikte

Während der Radius r für eine Kupplung invariant ist und eine geeignete Auslegung nur durch einen Kompromiss möglich ist, lässt sich der Konflikt bezüglich F_N durch Wahl eines anderen Wirkprinzips, das nicht durch Festkörperkontakt die Umfangskraft erzeugt, auflösen. Die prinzipiell besser geeigneten Wirkprinzipe zur Umfangskrafterzeugung lassen sich systematisch ermitteln, indem gezielt Teillösungen mit Kennungen verwendet werden, die kein μ enthalten. Zum Beispiel kann durch Verwendung des Induktionsprinzips ein Drehmoment nahezu ohne mechanischen Verschleiß übertragen werden.

Ist ein Zielkonflikt nicht aufzulösen, z.B. weil der konfliktäre Parameter – wie der Radius r – aufgabeninvariant ist, lässt sich in Abhängigkeit der Anforderungsgewichtung die entsprechende konstruktive Größe zur Minimierung des Zielkonflikts geeignet auslegen. Hat ein hohes Drehmoment eine höhere Gewichtung als ein geringes Massenträgheitsmoment, muss ein relativ großer Radius gewählt werden. Wählt man als Radienverhältnis $\pi_3 = r_{max}/r$ z.B. den maximalen Wert 1 (Punkt 1 in Bild 2), kann man anhand der Funktion oder des Diagramms sofort den Wert von π_5 (in diesem Fall gleich

dem minimalen Wert 1) ablesen. Ist ein geringes Massenträgheitsmoment funktional wichtiger als ein hohes Drehmoment, z.B. um schnelle Schaltzeiten zu erzielen, muss ein relativ kleiner Radius gewählt werden.

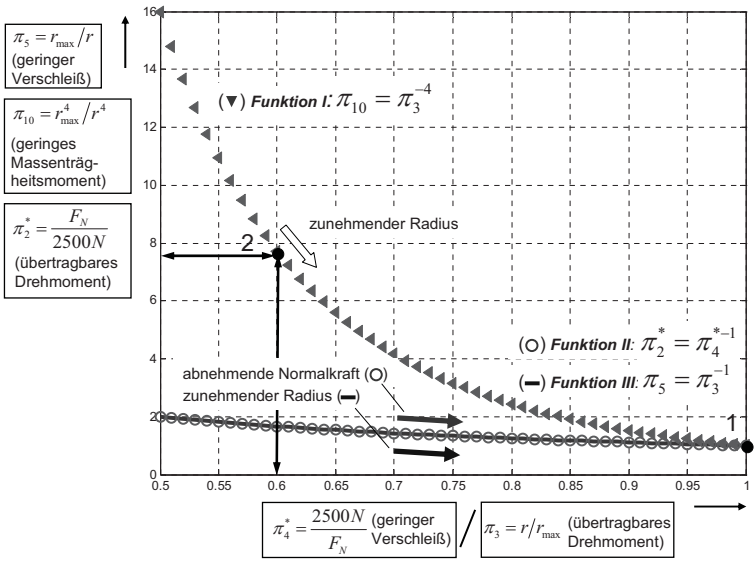


Bild 2: Auswertung von Zielkonflikten mit Hilfe von dimensionslosen Kennwert-Funktionen

Multipliziert man die einzelnen Kennwerte π_i, erhält man eine Gesamt-Aufgabenkennung π_{AK}, die alle Teilziele berücksichtigt, nahezu lösungsneutral die Konstruktionsaufgabe beschreibt, die Sensitivitäten der optimierbaren aufgabeninvarianten Parameter, wie des Radius r, der Länge L und Werkstoffdichte ρ, erkennen lässt und systematisch Optimierungsrichtungen für die Größen aufzeigt. Bildet man das totale Differenzial $d\pi_{AK}$ der stetig differenzierbaren Gesamt-Aufgabenkennung $\pi_{AK,}$ lassen sich die Höhe des Einflusses der aufgabeninvarianten Parameter und deren Optimierungsrichtungen rechnerisch ermitteln:

$$\frac{d\pi_{AK}}{\pi_{AK}} = \boxed{1} \cdot \frac{d\mu}{\mu} + \boxed{(-1)} \cdot \frac{d\rho}{\rho} + \boxed{(-4)} \cdot \frac{dr}{r} + \boxed{(-1)} \cdot \frac{dL}{L} + \boxed{(-1)} \cdot \frac{dk}{k} \qquad (1)$$

Der Radius r hat betragsmäßig einen viermal höheren Einfluss auf die Aufgabenkennung als die anderen variablen Parameter und sollte im Hinblick auf die Erfüllung der Gesamtaufgabe besonders gering sein.

3 Identifizieren und rechnerisches Auswerten von Unverträglichkeiten bei der Lösungskombination

Zur Erzeugung komplexerer Strukturen werden Teillösungen gemäß dem geforderten funktionellen Wirkzusammenhang miteinander verknüpft. Es lassen sich nur dann zwei Lösungen miteinander verknüpfen, falls sie verträglich sind. Zwei Lösungen sind dann unverträglich, falls die extensiven Eigenschaften [7], d.h. die von der Teilsystemumgebung wahrnehmbaren Eigenschaften, wie umgesetzte Funktionsgrößen, sog. Störeffekte, z.B. Verlustwärme, oder Bauräume, sich derart beeinflussen, dass Anforderungen nicht erfüllt werden. Kennzahlen [4, 5, 6] eignen sich in besonderem Maße zur Beurteilung von Unverträglichkeiten, da sie in gleicher Weise konstruktive Eigenschaften und Anforderungen komprimiert abbilden können. Außerdem kann eine Kombination von Lösungen durch eine algebraische Verknüpfung von Kennzahlen dargestellt werden. Sind z.B. Teillösungen funktional in Reihe geschaltet, lässt sich das Verhalten der Lösungskombination durch eine multiplikative Verknüpfung von Kennzahlen beschreiben [4]. Voraussetzung für die Beschreibung von Unverträglichkeiten mit Ähnlichkeitskennzahlen ist, dass man die wesentlichen extensiven Eigenschaften von konstruktiven Lösungselementen, z.B. umgesetzte Funktionsgrößen oder das Bauvolumen, deren Einflüsse auf die Verknüpfungsparameter von zu verknüpfenden Lösungen, Anforderungen und Restriktionen in quantitativer Form angeben kann. Zur Unverträglichkeitsanalyse wird ein konstruktives Beziehungssystems [8] in ähnlichkeitstheoretischer Darstellung aufgebaut, dass die gegenseitigen Abhängigkeiten der Teillösungen mit Hilfe von Ähnlichkeitskennzahlen beschreibt. Die entwickelte Methode unterstützt eine qualitative und quantitative Beurteilung von Lösungskombinationen. In einer ersten qualitativen Analyse lassen sich die „kritischen Pfade“ im Beziehungssystem ermitteln, indem die Richtungen von Eigenschaftsänderungen von zwei oder mehreren gekoppelten Lösungen mit den Optimierungsrichtungen der relevanten Anforderungen verglichen werden.

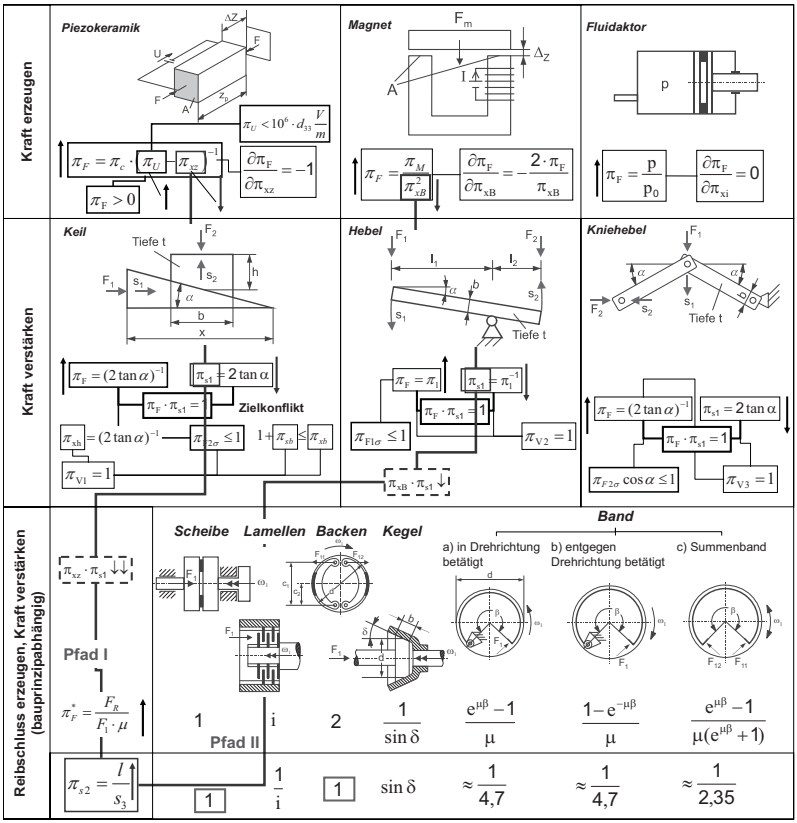


Bild 3: Morphologischer Kasten mit integriertem Kennzahlen basierten Beziehungssystem zur Analyse von Unverträglichkeiten

Um effizient zu beurteilen, ob Anforderungen nicht eingehalten werden können, lassen sich die entsprechenden Kennzahlen gemäß der funktionellen Kopplung verknüpfen und die konkreten Parameterkombinationen ermitteln, bei denen die Lösungen unverträglich sind (Tabelle 2). Bild 3 zeigt die Anwendung der durch Kennzahlen unterstützten Methode am Beispiel der Synthese einer Wirkstruktur zur schaltbaren Reibkrafterzeugung, die sich z.B. in einer Reibkupplung einsetzen lässt. Die Anpresskraft F und der Schaltweg s sind die wesentlichen Verknüpfungsparameter der schaltbaren Wirkstruktur. Wir wollen uns bei der Verträglichkeitsanalyse auf die Betrachtung des Schaltweges beschränken (Bild 4).

I) $(\Delta z = s_1) \wedge (s_2 = s_3)$, II) $(\Delta x = s_1) \wedge (s_2 = s_3)$ (2)

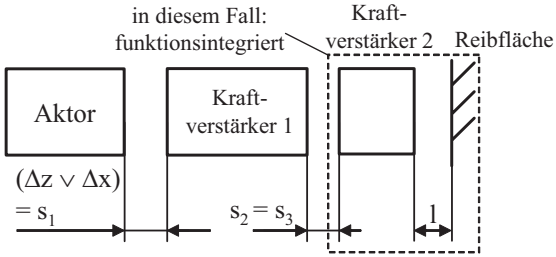


Bild 4: Schematische räumliche Anordnung der Teilfunktionsträger einer beispielhaft betrachteten Wirkstruktur zur Reibkrafterzeugung

Es entsteht durch die Kopplung eine charakteristische Kennzahl, die das Verhältnis der Einfluss nehmenden Konstruktionsgrößen beschreibt. In diesem konkreten Fall ist die entsprechende Kennzahl das Verhältnis der Luftspaltweite zu einer charakteristischen Aktorabmessung: (l/B) bzw. (l/z_p). Zwei zu kombinierende Lösungen, in diesem Fall z.B. ein Elektromagnet und eine Struktur zur Kraftverstärkung, können nur dann unverträglich sein, wenn die Kopplungsparameter aufgrund der Anforderungen entgegengesetzte Optimierungsrichtungen haben, wie Δx und s_1 (Bild 5).

Bedingung für Unverträglichkeit:
entgegengesetzte Optimierungsrichtung

$$\pi_{xz}(\downarrow)\cdot\pi_{s1}(\downarrow)\cdot\pi_{s2}(\uparrow)=\left(\frac{\boxed{\Delta x}\downarrow}{B\uparrow}\right)\cdot\left(\frac{s_2\downarrow}{\boxed{s_1}\uparrow}\right)\cdot\left(\frac{l\uparrow}{s_3\downarrow}\right)=\frac{l}{B}$$

Bild 5: Qualitative Analyse einer Unverträglichkeit mit Hilfe von Kennzahlen am Beispiel der Wirkstruktur mit Elektromagnet

Durch Multiplikation der relevanten Kennzahlen lässt sich unter Berücksichtigung von Restriktionen, wie z.B. einem maximal zulässigen Verhältnis von Spannung zu Piezokeramikdicke, eine algebraische Beziehung zur Berechnung der Werte für (l/B) in Abhängigkeit der dimensionslosen Aktorkraft pro Fläche π_F herleiten.

Tabelle 3: Quantitative Kennzahlen basierte Auswertung von Unverträglichkeiten

Kombinationspfad I	Kombinationspfad II
$\pi_{Fp} = \pi_c \cdot \left(\pi_U - \pi_{xz} \cdot \pi_{s1} \cdot \pi_{s2}\right)^{-1} > 0;$ $\pi_U < 10^6 \cdot d_{33} \frac{V}{m}$ $\boxed{\pi_{xz} \cdot \pi_{s1} \cdot \pi_{s2} = \left(\frac{l}{z_p}\right) < 0{,}5 \cdot 10^{-3}}$	$\pi_{xB} \cdot \pi_{s1} \cdot \pi_{s2} = \left(\frac{l}{B}\right) < \sqrt{\frac{\pi_M}{\pi_{Fm}}}$ $(b = 60\ \text{mm},\ \Delta\vartheta = 90\,K, \pi_F = 3)$ $\boxed{\left(\frac{l}{B}\right) < 6{,}8 \cdot 10^{-3}}$

Sind die erforderlichen (l/B)- bzw. (l/z_p)-Verhältnisse bei gegebenen Anforderungen ermittelt worden, lassen sich in Abhängigkeit der Werte von ($\Delta x/B$) bzw. ($\Delta x/z_p$), (s_2/s_1) und (l/s_3) Teillösungen auswählen.

Soll z.B. eine Piezokeramik mit sehr geringem ($\Delta z/z_p$) und ein Kniehebel mit geringem Hebelwinkel und damit geringem (s_2/s_1)-Verhältnis eingesetzt werden, ist vorzugsweise eine Kupplungs-Bauart zu wählen, deren (l/s_3)-Wert sehr groß ist. In diesem Fall sind die Teillösungen vorzugsweise in eine Scheiben- oder Backenkupplung zu integrieren. Diese Bauarten haben prinzipbedingt die größten Luftspalt-Schaltweg-Verhältnisse (l/s_3) (siehe umrandete Werte in der letzten Zeile des Morphologischen Kastens).

Literatur

[1] Rodenacker, W. G.: Methodisches Konstruieren, 4. Aufl. Berlin: Springer 1991.

[2] VDI-Richtlinie 2242: Konstruieren ergonomiegerechter Erzeugnisse (Blatt1). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.

[3] Franke, H.-J., Firchau, N. L.: Störeffekte konstruktiv beherrschen. In: Tagungsband 12. Symposium „Design for X“, Neukirchen, 11. und 12. Oktober 2001.

[4] Deimel, M.: Ähnlichkeitskennzahlen zur systematischen Synthese, Beurteilung und Optimierung von Konstruktionslösungen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 398, zgl. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2007.

[5] Buckingham, E.: On Physically Similar Systems: Illustration of the Use of Dimensional Equations. In: Phys. Review, Vol. IV, No. 4, 1914, S. 346 – 376.

[6] Baker, W. E.; Westine, P. S.; Dodge, F. T.: Similarity Methods in Engineering Dynamics. Theory and Practice of Scale Modeling. New York: Elsevier, 1991.

[7] Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 70, zgl. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1980.

[8] Franke, H.-J.: Automatisches Konstruieren mit Beziehungssystemen? In: Tagungsband 15. Kolloquium Konstruktionstechnik, Königslutter, 1991.

Berücksichtigung der Reinigung im konstruktionssystematischen Prozess

Bernd Künne, Tim Richard

Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund
Leonhard-Euler-Str. 5, D-44227 Dortmund
Email: tim.richard@tu-dortmund.de; Internet: http://www.maschinenelemente.info;
http://www.bauteilreinigung.de

Inhalt: *Die Reinigungstechnik hat in den vergangenen Jahren signifikant an Bedeutung gewonnen. Zu erklären ist dies hauptsächlich durch den immer größer werdenden Einfluss funktioneller Beschichtungen sowie durch immer filigranere Kanäle in Bauteilen der Automobilzulieferindustrie, die sich bei Schmutzeinwirkung sehr schnell zusetzen und dadurch ausfallen. Die Konstruktion der Bauteile besitzt einen großen Einfluss auf die Anforderungen an die Reinheit und die Reinigbarkeit. Der Konstrukteur legt die Anordnung und Größe von Kanälen und Düsen für Betriebsstoffe fest oder definiert indirekt Montage-, Beschichtungs- und Funktionsflächen. Damit manifestiert er auch die unbedenklichen Restschmutzmengen, die toleriert werden können, ohne die Funktionserfüllung zu gefährden. Gleichzeitig wirkt sich die Konstruktion auf die Reinigbarkeit von Produkten aus. Nur zugängliche Kanäle und Bohrungen können gut gesäubert und von Spänen befreit werden. Soll die Reinigbarkeit des Bauteils effizient optimiert werden, ist die gesamte Funktionsstruktur des Produktes zu betrachten. Im Rahmen des Vortrages wird daher eine Vorgehensweise erörtert, wie bereits während der Konstruktion eines Produktes die Reinigung berücksichtigt und bei der Bewertung von Lösungsentwürfen einbezogen werden kann.*

Abstract: *The importance of cleaning technology has significantly increased in recent years. The reasons are the growing influence of functional coatings and the increasing thinner channels in the automotive industry, in which dirt causes fails. The design of the components has a large influence on the requirements for the purity and cleaning. The designing engineer determines the arrangement and size of channels and nozzles for fluids. Additional he defines functional areas and determines indirectly the quantities of dirt, which can be tolerated. At the same time, the design influences the cleanability of the products. Only accessible channels and holes may be well cleaned of chips and operating fluids. In addition, the necessary production processes are often the source of contamination. If the cleaning should be optimized, the entire process chain of production has to be considered. This process chain is substantially influenced by the design.*

Stichwörter: *Reinigungsgerechtheit; Reinigbarkeit, Bauteilreinigung, Simulation, Konstruktionssystematik*

Keywords: *parts cleaning, simulation, design systematics*

1 Einleitung

Die Reinigung und die Reinigbarkeit von Produkten stehen gerade in der Automobilzulieferindustrie immer mehr im Mittelpunkt. Ein Grund dafür ist, dass z. B. Pannenserien im Umfeld von ABS- oder Einspritzsystemen durch Restschmutz in den entsprechenden Kanälen zu erklären sind. Partikel, welche nach der spanenden Fertigung im Bauteil verblieben waren, haben sich im Betrieb gelöst und sind durch die Betriebsmittel zu Bereichen des Systems transportiert worden, in denen die Kanäle und Düsen besonders filigran waren. Die Kanäle haben sich zugesetzt und damit ihre Funktion eingestellt.

Um derartige negative Auswirkungen zu verhindern, sind zahlreiche Richtlinien entstanden. Derzeit ist diesbezüglich eine deutliche Zweiteilung zu erkennen. Öffentlich zugängliche Richtlinien beschreiben, wie die Bestimmung von Restschmutzmengen möglich ist, um zwischen Vertragspartnern überhaupt erst eine Abstimmung der Anforderungen zu ermöglichen und quantifizierbar zu gestalten. Beispiele hierfür sind die VDA-19 [1] oder die ISO DIS 16232 [2]. In diesen Richtlinien wird jedoch nicht behandelt, wie viel Restschmutz bei unterschiedlichen Bauteilen erlaubt ist. Dies ist in der Regel in Werksnormen oder aber einzelnen Verträgen definiert.

Gerade mittelständische Unternehmen haben oft Schwierigkeiten, diese neuen Anforderungen umzusetzen. Dabei sind zwei Kernproblemfelder zu erkennen. Zum einen fehlt die Erfahrung, welche genauen Einflussfaktoren sich in welcher Weise auf den Verschmutzungszustand auswirken und wie dieser im Rahmen der Qualitätskontrolle überprüft werden kann. Hier leisten die genannten Richtlinien eine erste Abhilfe, wobei die Durchführung zum Teil eine so umfangreiche Ausstattung voraussetzt, dass die mittelständischen Unternehmen derartige Tests extern durchführen lassen. Zum anderen sind die festgelegten Anforderungen oft überzogen. Da die Konstrukteure bisher noch nicht über Hilfsmittel verfügen, um die Reinheitsanforderungen festzulegen und ihre eigene Konstruktion hinsichtlich der Reinigbarkeit zu optimieren, werden die Anforderungen noch oft „nach Gefühl“ oder unqualifizierten Daumenwerten vergeben. Teilweise stehen dadurch in den Unterlagen jedoch Anforderungen, die nur unter besonders hohem Aufwand zu erbringen oder die in der genannten Kombination gar nicht erfüllbar sind. Beispiele dafür sind hohe Ansprüche an die Sauberkeit in kaum zugänglichen Sacklochbohrungen oder aber so geringe Restschmutzungsmengen, die

generell nicht realisiert werden können. So hat beispielsweise ein Hersteller eine zulässige Partikelverteilung und gleichzeitig die Art der Transportverpackung festgelegt. In der Realisierung führte jedoch der Abrieb zwischen den Bauteilen aufgrund von Erschütterungen während des Transportes zur Generierung von Partikeln, die die Anforderungen verletzten. Folglich waren die Bauteile, die ursprünglich den Anforderungen entsprechend sauber ausgeliefert worden waren, bei der Ankunft beim Kunden erneut unzulässig verschmutzt.

Darüber hinaus bedingen zu hohe Anforderungen an die Reinheit auch unnötig hohe Kosten, ähnlich wie eine zu genau geforderte Toleranz.

Der Konstrukteur besitzt im Vergleich den größten Einfluss auf die Produktentstehungskosten. Dies gilt auch für die Reinigung. Er ist meist für die Definition der diesbezüglichen Anforderungen verantwortlich und beeinflusst durch die Konstruktion selbst maßgeblich die Reinigbarkeit während der Produktentstehung und im Betrieb.

Daher soll im Folgenden ein Vorschlag für eine Systematik vorgestellt werden, wie der Konstrukteur die Anforderungen an die Bauteilsauberkeit in Abhängigkeit der Funktion des Bauteils festlegen kann. Des Weiteren wird beschrieben, wie es möglich ist, die Reinigungsgerechtheit zu berücksichtigen. Im einfachsten Fall ist dies durch die Beachtung von Gestaltungsregeln umzusetzen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, zumindest qualitativ eine Simulation des Reinigungsvorgangs durchzuführen. Somit bekommen die Konstrukteure ein Werkzeug an die Hand, mit Hilfe dessen sie die Reinheitsanforderungen und die Reinigbarkeit im Vorfeld besser abschätzen bzw. optimieren können.

2 Stand der Technik

2.1 Richtlinien zur Bauteilsauberkeit

In der Fachwelt werden zwei inhaltlich kompatible Standards zur Bestimmung der technischen Sauberkeit hinsichtlich der Partikelverunreinigungen von Automobilkomponenten zu Grunde gelegt. Auf nationaler Ebene ist der Band 19 des Verbandes der Automobilindustrie e. V. das Standardwerk, auf welches sich die meisten Unternehmen berufen. Auf internationaler Ebene wird die ISO-DIS 16232 verwendet, wobei sich viele deutsche Anbieter aufgrund der internationalen Beziehungen ebenfalls auf diese Norm beziehen.

In den beiden Richtlinien werden zunächst die verschiedenen Prüfmethoden vorgestellt, um eine Auswahl aus der Vielzahl der Möglichkeiten zu vereinfachen. Im Mittelpunkt dabei stehen Partikelverunreinigungen. Einen weiteren Schwerpunkt bilden Richtlinien zur sauberkeitsgerechten Handhabung der Prüfobjekte, damit es zu keinen Verfälschungen aufgrund der Lagerung und des Transportes kommt. Es werden Hinweise gegeben, wie herauszufinden ist, welche Extraktionsmethode die am Besten geeignete ist, da u. a. aufgrund der Geometrie ein direktes Untersuchen der Bauteile in der Regel nicht möglich ist und die Partikel z. B. durch Spülen extrahiert werden müssen. Einen Schwerpunkt bilden daher die Beschreibungen der verschiedenen möglichen Extraktionsverfahren, die, bis auf die Ausnahme der direkten Bauteilinspektion, bei jeder Prüfung zum Einsatz kommen müssen. Im nächsten Schritt erfolgt dann die eigentliche Analyse, in welcher zum Beispiel die Partikel, die sich in einem Testfilter absetzen, durch den das Testmedium geleitet wird, einer genauen Untersuchung unterzogen werden.

Damit wird jedoch nur die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen sichergestellt. Welche Reinheitsanforderungen sinnvoll sind, ist nicht definiert. Des Weiteren existieren auch keine Angaben für den Konstrukteur, wie er die Reinigbarkeit durch seine Gestaltung beeinflussen kann.

2.2 Analogien zur lebensmittelverarbeitenden Industrie

Im Bereich der lebensmittelverarbeitenden Industrie existieren schon seit sehr langer Zeit Überlegungen, wie sich die Reinigbarkeit von Anlagen optimieren lässt. Vorreiter für diese Entwicklung ist die EHEDG (European Hygienic Engineering & Design Group). Sie beschäftigt sich vor Allem mit der sogenannten CIP-Reinigung (Cleaning-In-Place), d. h. der Reinigung von Anlagen im Betrieb ohne Demontage. Durch diese Randbedingung hat sich die Notwendigkeit ergeben, die Konstruktionen besonders reinigungsgerecht auszuführen. Im Vergleich zum allgemeinen Maschinenbau ist sicherlich die Situation, die Elemente im montierten Zustand reinigen zu müssen, eine Besonderheit, die keine direkte Anwendung der Ergebnisse zulässt. Nichts desto trotz sind die abgebildeten Erkenntnisse als Anregung sehr wertvoll. Es wurden beispielsweise Testverfahren entwickelt, wie der experimentelle Nachweis der hygienegerechten Gestaltung möglich ist und wie nach einer Testreinigung kontrolliert werden kann, ob alle potentiellen Bakterien entfernt wurden.

2.3 Existierende Gestaltungsregeln

Eine gute Übersicht der Gestaltungsregeln im Bereich der lebensmittelverarbeitenden Industrie liefern die Normen DIN EN 1672 [3] und EN ISO 14159 [4]. Sie stellen Gut-Schlechtbeispiele für die hygienegerechte Gestaltung dar. Das folgende Bild zeigt Beispiele auf:

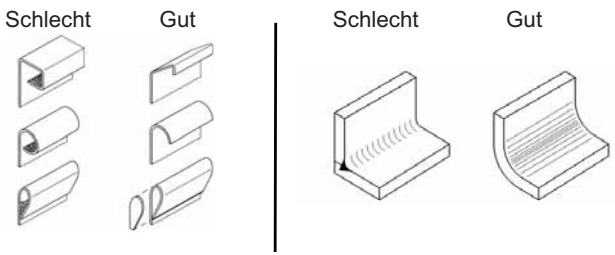


Bild 1: Gut-Schlecht-Beispiele nach EN 1672-2

Im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus hat Kloke erste Gestaltungsregeln aufgestellt [5]. Darüber hinaus wurden von Kloke auch Leitregeln zur Werkstoffauswahl definiert. Diese stellen dar, welche Werkstoffe prinzipiell gut reinigbar sind und bei welchen Schwierigkeiten auftreten können. Grundlage dafür ist die Verträglichkeit mit möglichst vielen Reinigern und kleinstmögliche Einschränkungen bezüglich der einsetzbaren Reinigungsverfahren. Die Kräfte, die beim Reinigen zwischen Grundwerkstoff und Verschmutzung überwunden werden müssen, um den Schmutz abzulösen, werden aufgrund der Komplexität nicht beleuchtet. Es gibt jedoch Forschungsarbeiten, die beschreiben, wie sich zum Beispiel der Zusammenhang zwischen den Oberflächenrauheiten und der Reinigbarkeit darstellt.

2.4 Reinigungsverfahren

Die hauptsächlich in der Industrie eingesetzten Reinigungsverfahren lassen sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Es überwiegen die Verfahren mit flüssigen Reinigunsmedien, wie die folgende Übersicht zeigt:

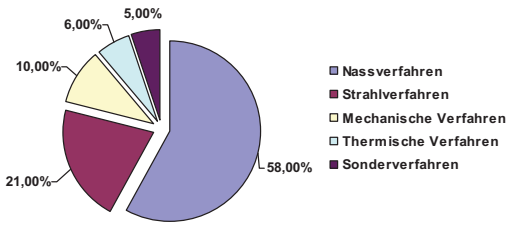


Bild 2: Verteilung der Reinigungsverfahren [6]

Die Nass- und Strahlverfahren nehmen gemeinsam einen Marktanteil von etwa 79 % ein. Bei den entsprechenden Verfahren ist das physikalische Wirkprinzip zumeist eine Kombination aus dem Lösen direkt lösbarer Verschmutzungen und dem strömungstechnischen Entfernen von Partikeln sowie filmischen Belägen. In einigen wenigen Fällen wird das strömungstechnische Entfernen von festhaftenden Verunreinigungen zusätzlich durch eine mechanische Reinigungskomponente unterstützt. Die einzelnen Nassreinigungsverfahren unterscheiden sich in der Art der aufgebrachten strömungstechnischen bzw. mechanischen Reinigungskomponenten. Es hat sich jedoch in Untersuchungen gezeigt, dass die chemische Wirkung des Reinigungsmediums relativ unabhängig von der mechanischen betrachtet werden kann. Soll die Reinigbarkeit einer Konstruktion daher begutachtet werden, schränken die verwendeten Materialien mitunter die einzusetzenden Reinigungsmedien ein. Darüber hinaus ist die Gestaltung der Bauteile dafür verantwortlich, wie gut die mechanische Reinigungsenergie appliziert werden kann. Aufgrund der im Bild 2 dargestellten Verteilung wird die Betrachtung zunächst auf die Durchströmung von Bauteilen mittels eines Reinigungsmediums fokussiert.

3 Reinigungsgerechte Gestaltung

3.1 Analyse der Reinheitsanforderungen

Bei der systematischen Analyse der Reinheitsanforderungen sollte zwischen der Realisierungs- und der Nutzungsphase unterschieden werden. Während der Fertigung und Montage bestehen aufgrund des jeweils nachfolgenden Arbeitsschrittes Anforderungen an die Reinheit des Bauteils. Dies gilt insbesondere für aufwändige Beschichtungen oder Fertigungsprozesse. Während der Nutzung können kritische

Bereiche, wie Düsen, sehr feine Filter oder Gleitlagerstellen die allgemein definierten Reinheitsanforderungen weiter einschränken. Dazu muss systematisch betrachtet werden, wie die Schmutzpartikel zum Beispiel via Betriebsmedien durch ein System geleitet werden, an welchen Stellen dadurch eine weitere Verschmutzung auftreten kann, wo die Belastung aufgrund von Filtern verringert wird und an welcher Stelle bestimmte Partikel Schwierigkeiten verursachen. Das Wissen über diese Stellen ist in der Regel vorhanden. Die Zusammenhänge zwischen den Teilbereichen werden aber meist nicht detailliert abgebildet und untersucht.

Realisierungsphase – Durchführung von FMEAs

In der Realisierungsphase, d. h. bei den Fertigungs- und Montageprozessen, aber auch bei der Lagerung und dem Transport können die Einflüsse und Anforderungen strukturiert durch eine FMEA aufgenommen werden. Dafür wird eine Vorgehensweise in Anlehnung an den VDA Band 4.2 [7] empfohlen. Im ersten Schritt werden die beteiligten Prozesse erfasst und strukturiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Zuordnung und Verknüpfung der Hauptfunktionen. Im Anschluss werden die möglichen Fehlfunktionen bzw. Quellen von Verschmutzungen den Funktionen zugeordnet. Bei der Maßnahmenanalyse können dann entweder Vermeidungsstrategien ausgearbeitet oder aber Reinigungsprozesse ergänzt werden. Bei der Bewertung fließen, wie bei einer FMEA üblich, sowohl die Bedeutung des Einflusses, als auch die Auftretens- als auch Entdeckungswahrscheinlichkeit mit ein, um eine Priorisierung möglicher Verbesserungsmaßnahmen zu erlauben. Somit gelingt es, den kompletten Fertigungsablauf hinsichtlich seiner Einflüsse auf die Reinigung abzubilden und systematisch zu optimieren.

Nutzungsphase – Betrachtung der Funktionsstruktur

Bei der Konstruktionssystematik nach Pahl / Beitz [8] kann die Funktionsstruktur sehr gut durch eine Leitungsfunktion für Verschmutzungen ergänzt werden. Gerade bei den in Bezug auf die Reinheit kritischen Teilen im Bereich der Automobilzulieferindustrie handelt es sich oft um Schmier-, Einspritz- oder hydraulisch bzw. pneumatisch arbeitende Bremssysteme, bei welchen die Funktion „Leiten von Betriebsstoffen“ einen ganz wesentlichen Stellenwert einnimmt. Die Betriebsstoffe sind auch für die Weiterleitungen der Verschmutzungen verantwortlich und transportieren sie damit zum Beispiel zu

Bereiche, in denen die Auswirkungen weitaus kritischer sind, als an den ursprünglichen Quellen der Verschmutzung.

Bild 3 zeigt eine Funktionsstruktur, die durch Informationen zum Restschmutz erweitert wurde. Hierbei findet eine Unterscheidung zwischen der erlaubten Partikelkonzentration und der Restschmutzmenge nach dem Einbau statt. Die erlaubte Partikelkonzentration ergibt sich aus der Funktionserfüllung der Bauteile. Es kann sich zum Beispiel um die kleinste Kanal- bzw. Düsenöffnung dividiert durch einen Sicherheitsfaktor handeln. Darüber hinaus wird sie oft durch geforderte tribologische Eigenschaften begrenzt, da entsprechende Partikel zu erhöhtem Abrieb führen. Hier sind die Erfahrungswerte der Hersteller unersetzbar.

In der Branche hat sich eine Einteilung der Partikel in gewisse Größenklassen und eine Unterscheidung metallisch gegenüber nichtmetallisch herausgebildet, da diese Klassifizierung mit den vorhandenen Mitteln meist gut möglich ist. Zahlreiche Hersteller haben Werksnormen herausgegeben, in denen sich diese Einteilung wiederfindet. Sowohl die erlaubte Partikelkonzentration als auch die Restschmutzmenge nach dem Einbau sind in der Regel zeitlich unveränderlich. Die Senken- und Quellenfunktionen können von der Zeit oder von der Partikelbeladung des Betriebsmittels abhängen. Beispiele sind Lagerstellen mit Abrieb, der am Anfang während der Einlaufphase besonders groß ist oder Filter, die aufgrund ihrer Beladung nur noch schlecht weitere Partikel aufnehmen können. In den beiden Filtern ist daher auch eine kumulierte erlaubte Partikelkonzentration K_{P6}^{Σ} bzw. K_{P7}^{Σ} angegeben. Das Diagramm in Bild 3 zeigt exemplarisch die Funktion des Abscheidegrades eines Hauptstrom- und Nebenstromölfilters. Durch die Addition der Quellenfunktionen und der Restverschmutzungen sowie die Subtraktion der Senkenfunktionen können die Abhängigkeiten insgesamt dargestellt werden, um unterschiedliche Funktionsstrukturen hinsichtlich der Sauberkeitsaspekte zu beurteilen. Je nach System müssen zunächst rekursive Formeln gebildet werden, da sich einige Partikel mehrfach durch das System bewegen, bevor sie herausgefiltert werden können bzw. sich bis zum Wechsel des Betriebsmittels sammeln. So kann die zeitabhängige Partikelbelastung für jedes Element dargestellt und mit der erlaubten Partikelkonzentration verglichen werden.

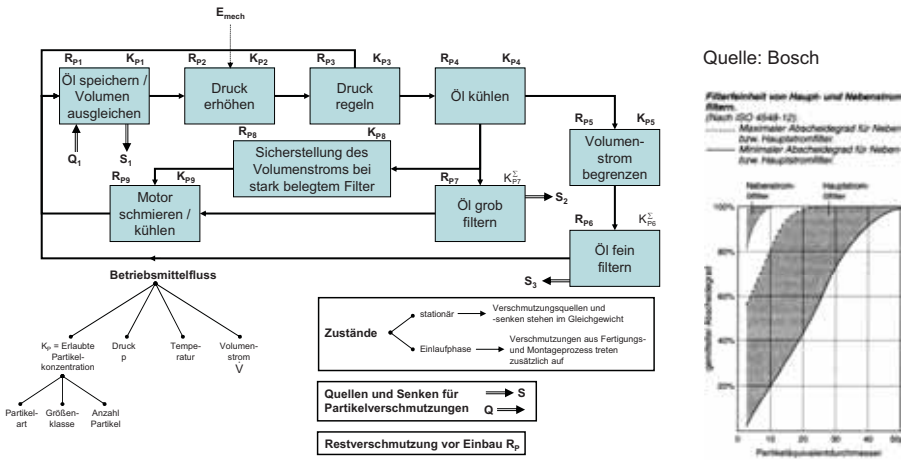


Bild 3: Funktionsstruktur mit Erweiterungen zum Verschmutzungszustand

4 Verifikation durch Simulation

Trotz der Gestaltungsregeln erweist es sich häufig als schwierig, die Reinigungsfreundlichkeit eines Bauteils abzuschätzen. Tests mit Prototypen sind jedoch sehr aufwändig. Aufgrund des sehr großen Marktanteils der Nass- und Strahlverfahren (Bild 2) ist eine fluiddynamische Simulation sinnvoll. Zahlreiche experimentelle Arbeiten im Umfeld der Reinigungstechnik haben gezeigt, dass für das Reinigungsergebnis die chemische Wirkung des Reinigungsmediums unabhängig von der mechanischen betrachtet werden kann und das bezüglich der mechanischen Komponente bei partikulären Verschmutzungen lediglich die Wandschubspannung und bei filmischen Verschmutzungen die Geschwindigkeit des Reinigungsmediums in wandnahen Schichten relevant ist [9]. Beide Werte können zumindest qualitativ sehr gut mittels einer Simulation dargestellt werden, wie das Bild 4 zeigt. Auf der linken Seite ist ein Kühlkanal dargestellt, durch den ein Reinigungsmedium fließt. Alle Flächen, bei denen die Wandschubspannung einen gewissen Schwellenwert unterschreitet, sind gekennzeichnet. Zudem visualisieren mehrere ergänzte Ebenen die Geschwindigkeiten des Fluids. Auf der rechten Seite befindet sich dieselbe Darstellung bei einer verrippten Grundplatte, wobei die schwer zu reinigenden Flächen ebenfalls deutlich werden.

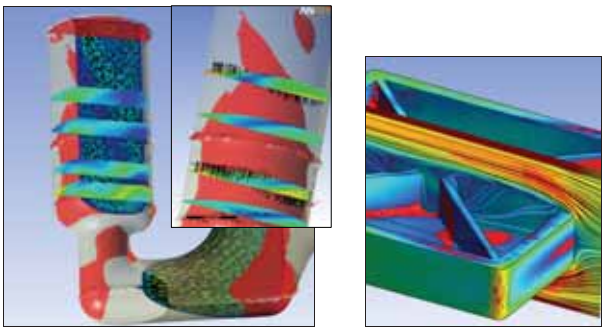


Bild 4: Simulation der Reinigung eines Kühlkanals und einer verrippten Grundplatte

Literatur

[1] N. N.: *VDA Band 19. Prüfung der technischen Sauberkeit – Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile.* VDA – Qualitätsmanagementcenter. 2005.

[2] ISO DIS 16232 Teil 1 bis 10. 06.07. *Straßenfahrzeuge - Sauberkeit von Komponenten für Fluidsysteme.*

[3] DIN EN 1672 Teil 2 07.05. *Nahrungsmittelmaschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 2: Hygieneanforderungen.*

[4] DIN EN ISO 14159 07.08. *Sicherheit von Maschinen - Hygieneanforderungen an die Gestaltung von Maschinen.*

[5] Kloke, Udo: *Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen mit Hilfe eines Fachinformationssystems.* Dissertation. Dortmund: Maschinenelemente-Verlag, 2003. – ISBN 3-937651-02-0

[6] N. N.: *Markt- und Trendanalyse in der industriellen Teilereinigung.* Berlin: Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik, 2007.

[7] N. N.: *VDA Band 4.2. FMEA.* VDA – Verband der Automobilindustrie. 1996.

[8] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[9] Hofmann, Jürgen: *Stoffübergang bei der Reinigung als Qualifizierungsmethode der Reinigbarkeit.* Dissertation. TU München. 2007.

Aktuelle Probleme der numerischen Simulation des hydrodynamischen und hydrostatischen Verhaltens von Spaltströmungen

Roland Wegmann, Klaus Brökel

Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD, Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 2, D-18059 Rostock
Email: roland.wegmann@ui-rostock.de, klaus.broekel@uni-rostock.de;
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de/ktc

Inhalt: *Das überarbeitete Programm SIRIUS zur Simulation hydrodynamischer Gleitlager wird vorgestellt. Die Zuverlässigkeit bei der Berechnung von Verlagerungsbahnen wurde verbessert. Verschiedene Programmversionen wurden zu einem einheitlichen Programmbaukasten zusammengefasst und neu gegliedert in Preprozessor, Solver und Postprozessor. Im Preprozessor wurde eine Unterstützung der Eingabe durch ein System von Steuerparametern, durch eine Plausibilitätsprüfung der Eingabedaten und freie Navigation zwischen den Eingabemasken organisiert. Die grafische Ausgabe wurde verbessert. Die Leistungsfähigkeit des Programms wird an ausgewählten Demonstrationsbeispielen gezeigt.*

Abstract: *The revised program SIRIUS for the simulation of hydrodynamic journal bearings is presented. The stability of the shaft orbit calculation has been improved. Different versions of the program are connected and the program gets a new structur. It is divided into Preprozessor, Solver and Postprozessor. The Preprozessor supports the input of dates with a system of control parameters, with plausibility tests and with a free navigation between the input menus. The graphical output has also been improved. Some examples show the performance of the program.*

Stichwörter: *Radialgleitlager, hydrodynamisch, hydrostatisch, Kavitation, Verlagerungsbahnberechnung, Schmiernutanordnung, verkantete Welle im Lager, Formabweichungen.*

Keywords: *journal bearing, hydrodynamic, hydrostatic, cavitation, lubrication, grooves, misaligned shaft, differences in the ideal shape of the bearing.*

1 Motivation

Neben der Beschäftigung mit den eigentlichen wissenschaftlichen Fragen nimmt die Herstellung der dazu erforderlichen "Werkzeuge" einen großen Raum ein. Heute sind das neben den experimentellen Einrichtungen in großem Umfang auch Programme zur Berechnung und Simulation des Forschungsobjekts.

Die Konstruktionstechnik der Universität Rostock befasst sich seit den 1970-er Jahren in unterschiedlicher Intensität mit der Gleitlagerforschung. Parallel dazu wurde das Berechnungsprogramm "SIRIUS" entwickelt und Schritt für Schritt ergänzt. Da das Programm nicht für die kommerzielle Nutzung eines breiten Anwenderkreise entwickelt wurde, wurden je nach Bedarf immer wieder kleine Programmteile angestrickt oder eine andere Variante abgeleitet, so dass es in mehreren Versionen existiert. Dabei wurde es bisher ausschließlich für die Berechnung hydrodynamischer Radialgleitlager benutzt.

Aktueller Anlass, wieder auf dieses Programmpaket zurückzugreifen, ist das Projekt HYDROS. Hier sollen hydrostatische Schiffswellenlager für Pod-Antriebe entwickelt werden. Um für dieses Projekt ein effektives Werkzeug zur Verfügung zuhaben, wurde im Vorfeld das Programm SIRIUS grundlegend überarbeitet. Ziel der Überarbeitung war es, aller bisher existierenden relevanten Varianten zusammen zuführen und das Programm fit für die neuen Aufgaben zu machen. Dazu musste die Datenstruktur und das Baukastensystem überarbeitet werden. Für die immer größer werdende Menge möglicher Eingabedaten, von denen aber immer nur eine begrenzte Anzahl erforderlich ist, mussten neue Eingabemasken erzeugt werden einschließlich einer umfangreichen Plausibilitätsprüfung. Außerdem gab es bei der Berechnung von Verlagerungsbahnen noch Probleme beim stabilen Ablauf der Iterationen.

2 Fähigkeiten des überarbeiteten Programms

Das Programm "SIRIUS" berechnet den Druckverlauf und weitere daraus resultierenden Größen für das endlich breite stationär und instationär belastete Radialgleitlager.

Aus einer vorgegebenen Lagerbelastung kann die resultierende Wellenverlagerung berechnet werden und umgekehrt. Das ist sowohl für den stationären als auch für den instationären Fall möglich. Im Rahmen der Überarbeitung wurde die Berechnung der Verlagerungsbahn aus einer instationären Lagerbelastung verbessert. Wesentlich verbessert werden konnte dabei die Stabilität der Iteration, wenn die Welle bei einem Lastrichtungswechsel bei unvollständig gefülltem Schmierspalt von einer Lagerseite auf die entgegenliegende Seite „fällt“.

Es kann wahlweise mit der Reynoldsschen Differentialgleichung gerechnet werden, wobei die Gümbelschen Randbedingungen angenommen werden, als auch mit der

erweiterten Schmiertheorie nach Wegmann [1], die Kavitation im Gebiet des sich erweiternden Schmierspalts berücksichtigt.

Es können Formabweichungen der Welle und der Lagerschale von der kreisrunden Form berücksichtigt werden. Diese Formabweichungen können über den Umfang und/oder in axialer Richtung auftreten. Das können z.B. elliptische oder "dreieckige" Wellen oder Lagerschalen sein. Ballige oder konische Lagerteile sind möglich. Auch punktweise gegebene Geometrien der Oberflächen können leicht implementiert werden.

Die Lage der Welle in der Lagerschale kann verkantet sein. Außerdem kann die Biegung der Welle infolge eines Wellenbiegemoments berücksichtigt werden. Verkantung und Biegung können über die Zeit variieren.

Es können vollständig oder nur teilweise umschließende Lagerschalen angenommen werden.

Es können beliebige Schmiernutanordnungen im Lager berücksichtigt werden. Das ist besonders für die Modellierung hydrostatischer Gleitlager eine wichtige Voraussetzung.

Am Lagerrand und in den Schmiernuten bzw. Schmiertaschen können beliebige Drücke vorgegeben werden. Im Rahmen der zukünftigen Berechnung hydrostatischer Lager sind weitere Möglichkeiten der gesteuerten und geregelten Ölzuführung in die Schmiernuten bzw. Schmiertaschen in Arbeit. Mit dieser Erweiterung des Programm wird es möglich nicht nur entweder hydrodynamische oder hydrostatische Lager zu berechnen, sondern in einem Radiallager beide Effekte gleichzeitig zu simulieren.

3 Struktur des überarbeiteten Programms

Ähnlich den komplexen FEM-Programmen ist das Programm in 3 Teilprogramme gegliedert, den Preprozessor, den Solver und den Postprozessor.

3.1 Preprozessor

Der Preprozessor organisiert die Eingabe aller erforderlichen Daten für die Berechnung, führt eine Plausibilitätsprüfung durch und komplettiert die notwendigen internen Parameter für die folgende Berechnung im Solver. Zur Sicherung der Widerspruchsfreiheit der Eingabedaten kann eine Berechnung erst nach komplettem Durchlauf der Eingabe ausgeführt werden.

Bild 1 zeigt die erste Eingabemaske des Preprozessors. Hier werden die Steuerparameter definiert, die die Art und Weise der Berechnung steuern.

```
=========================================
PRE-PROZESSOR: Bearbeitung der Eingabedaten
=========================================

-1- Datensatz auf Standardwerte zurueckcsetzen
-2- Datensatz aus Datei einlesen
    (Direkt zur Berechnung gehen z.Z. nicht m÷glich,
     da kein vollstaendiger Eingabedatensatz vorliegt)
-4- Gehe ohne vorhergehende Berechnung direkt zum PostProzessor
<w> W e i t e r  zur Bearbeitung der Eingabedaten
Eingabe:


-----------------------------------------------------------------
Festlegungen zur Theorie, zum Berechnungsverlauf und zum Lagertyp:
-----------------------------------------------------------------
-1- Erweiterte Reynoldssche Differentialgleichung    (theo = 2)
-2- Lagerbelastung vorgegeben                        (last = 2)
-3- Vollstaendig umschlossenes Lager               (vollum = 1)
-4- Asymmetrisches Lager                             (sym = 2)
-5- Welle mit Formabweichungen                      (welle = 2)
-6- Lagerschale mit Formabweichungen               (schale = 2)
-7- Verkantetes Lager                               (kante = 2)
-8- Druch Biegemoment gekruemmte Welle              (biege = 2)
-9- Hydrostat. Kapillarsteuerung, konst. Oelstrom   (oelzu = 4)

-10- Evtl. einige Eingabeparameter zeitabhaengig  (dynamic = 2)
-11- Zeitschritte DT konstant                   (schrittVar = 1)
-12- Omega konstant                              (omegaVar = 1)
-14- Belastung variabel, Eingabe So(IT),XSo(IT)   (lastVar = 3)
-15- Wellenverkantung konstant                    (kantVar = 1)
-16- Wellenbiegung konstant                       (biegVar = 1)

-a-  Zurueck zum Anfang der Dateneingabe
-z-  Zurueck (zum Anfang der Dateneingabe)
<w>  W e i t e r  zur Bearbeitung der konstanten Parameter
Waehle Nummer fuer gewuenschte Aenderung:
```

Bild 1: Eingabemaske zur Definition der Steuerparameter des Programms

Der Anwender kann den Ablauf der Berechnung ohne Kenntnis des Belegungsschlüssels der Steuerparameter im Klartext auswählen. Neben der Steuerung der Berechnung steuern diese Parameter im Preprozessor auch die nachfolgende Abfrage der erforderlichen Eingabedaten. Das verkürzt die Eingabe und erhöht die Übersicht. Das ist besonders bei den Parametern von Vorteil, die über die Zeit variieren und deshalb evtl. für jeden Zeitpunkt eingegeben werden müssen. Von den vielen möglichen Parametern werden nur die abgefragt, die vorher als zeitabhängig festgelegt wurden. Im Rahmen der Erweiterung der Berechnungsmöglichkeiten ist das System der Steuerparameter erweiterungsfähig.

Das Programm kontrolliert den Durchlauf aller erforderlichen Eingabemasken. Es kann jederzeit in bereits durchlaufene Menüs zurückgesprungen werden.

Eingabedatensätze können nach Abschluss der Eingabe für spätere Berechnungen gesichert werden oder zur Ableitung weiterer Berechnungsvarianten abgespeichert und wieder eingelesen werden.

3.2 Solver

Der Solver führt die eigentlichen zeitintensiven Berechnungen aus. Während der Simulation werden im Solver nur die primären Ergebnisdaten berechnet und in Feldern gespeichert. Das sind im wesentlichen die Druckverteilungen P(X,Z,T) im Schmierspalt über die Zeitpunkte IT=1 bis NT und bei gegebener Lagerbelastung F1(T), F2(T) die Wellenverlagerungsbahn E1(T) und E2(T) bzw. bei gegebener Verlagerungsbahn die resultierenden Lagerbelastungen über die Zeit. Alle anderen sekundären Ergebnisdaten werden auf Anforderung erst im Postprozessor berechnet.

Da bei anspruchsvollen Simulationen die Berechnung einige Zeit in Anspruch nimmt, können die Berechnungen beginnend bei IT=1 über ausgewählte Teilintervalle ausgeführt werde und zwischendurch die bisherigen Ergebnisse kontrolliert werden. So können bei auftretenden Instabilitäten der Berechnungen Maßnahmen eingeleitet werden und danach die weitere Berechnung an einem ausgewählten Zeitpunkt fortgesetzt werden. Eine Maßnahme kann z.B. sein, in kritischen Bereichen der Verlagerungsbahn die Zeitschrittweite vorübergehend zu verkürzen.

3.3 Postprozessor

Nach Beendigung der Berechnung werden im Postprozessor die primären Ergebnisdaten gemeinsam mit den Eingabedaten in einer Datei gesichert. Auch Teilergebnisse einer vorzeitig abgebrochenen Simulation können hier gesichert werden, um zu einem späteren Zeitpunkt die Eingabedaten und die bisherigen Ergebnisse wieder aufzurufen und die Berechnung fortzusetzen.

Die Ergebnisse werden in Textdateien speichert mit einem Druckbild, so dass die Ergebnisse mit einem üblichen Texteditor manuell gelesen werden können, aber auch als Datenschnittstelle zu anderen Programmen verwendet werden können.

Die Hauptaufgabe des Postprozessors ist die Berechnung und Aufbereitung der sekundären Ergebnisdaten zur Auswertung der Ergebnisse. Zur Auswertung getrennt von

der Berechnung wurde auch ein Postprozessor-Pur entwickelt, der als Standalone-Version die gleichen Funktionalitäten besitzt, wie der integrierte Postprozessor.

Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wird die freie Software Gnuplot [5] genutzt. Die Kommunikation zwischen dem Postprozessor und der Grafik-Software erfolgt über mehrere Textdateien als Datenschnittstellen.

Vermittelt über die Software Gnuplot können Viedodateien zur Animationen des zeitlichen Ablaufs der Simulationsergebnisse erzeugt werden. Die hier im Artikel leider nicht gezeigt werden können. Die im Vortrag gezeigten Animationen zu den nachfolgenden Demonstrationsbeispielen finden Sie im Internet auf der Homepage des Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD der Universität Rostock unter http://www.kt.uni-rostock.de/ktc unter dem entsprechenden Link zur Veröffentlichung.

4 Einige Demonstrationsbeispiele

Anhand einiger Demonstrationsbeispiele soll nun die Leistungsfähigkeit des Programms gezeigt werden. Drei der vier Beispiele wurden mit der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung berechnet. Dadurch kann auch die Verteilung des Öls im Schmierspalt gezeigt werden. Es ist aber eine Anlaufrechnung erforderlich. Auch wenn der zu berechnende Zustand des Lagers in allen Punkten stationär ist.

4.1 Lager mit zwei Schmierlöchern und umlaufender Last konstanter Größe

Für ein Lager mit der relativen Lagerbreite B=0,5 und zwei seitlichen Schmierlöchern wurden bei konstanter umlaufender Belastung So=2 und stillstehender Welle Ω=0 (Bild 2 linkes Diagramm) die Verlagerungsbahn E1(T), E1(T) bzw. E(T), XSo(T) (Bild 2, rechtes Diagramm) mit Hilfe der erweiterten Reynoldsschen Differentialgleichung berechnet. In der Darstellung der Verlagerungsbahn sind auch die Werte der notwendigen Anlaufrechnung dargestellt. In diesem Beispiel ist nach weniger als einem halben Umlauf der Belastung der geschlossene Verlagerungszyklus erreicht. Hier wird der Einfluss des Schmierlochs auf den Druckberg gezeigt, wenn dieser über das Schmierloch hinweggeht. (Bild 3 und Bild 4)

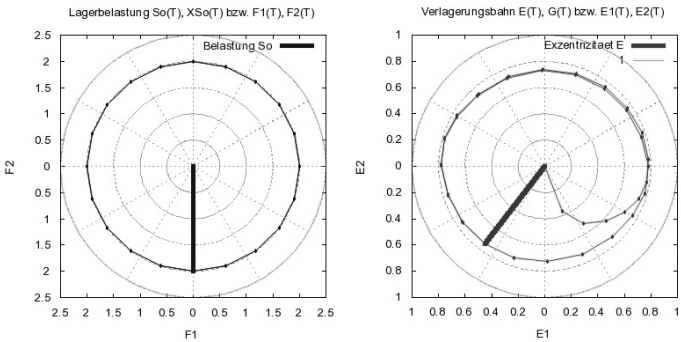


Bild 2: Lagerbelastung (links) und Verlagerungsbahn bei umlaufender Lagerbelastung

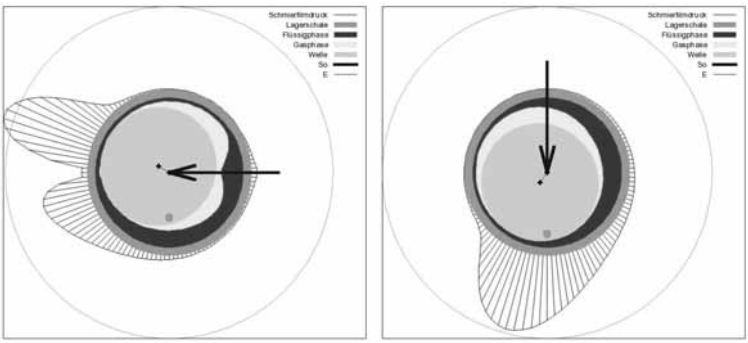


Bild 3: Druckverlauf P(X) und Ölverteilung FH(X) in Lagermitte nach 1,75 Lastumläufen (links) bzw. 2 Lastumläufen (rechts)

Da die erweiterte Theorie auch die Verteilung des Öls im Schmierspalt liefert, kann außerdem beobachtet werden, wie im Unterdruckgebiet der Spalt durch das andere Schmierloch und vom Lagerrand her wieder aufgefüllt wird. Durch das Übereinanderlegen der Funktionen des Druckverlaufs P(X,Z), der Spalthöhe H(X,Z) und der lokalen Ölverteilung FH(X,Z) im Schmierspalt über die abgewickelte Schmierspaltfläche (Bild 4) werden die Verhältnisse im Spalt sehr anschaulich dargestellt. Das Volumen unter der Fläche FH(X,Z) repräsentiert die flüssige Phase des Schmiermittel-Gas-Gemischs im Schmierspalt, während das Volumen zwischen den Flächen H(X,Z) und FH(X,Z) die Gasphase repräsentiert. Im Bild 4 wird nur eine Hälfte des abgewickelten Schmierspalts

dargestellt, wobei der dem Betrachter zugewandte Rand des Diagramms die Lagermitte darstellt.

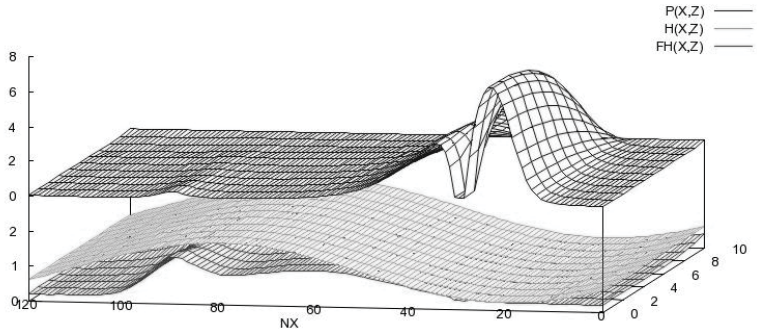


Bild 4: Druckverlauf P, Spaltgeometrie H und Ölverteilung FH im abgewickelten Schmierspalt nach 1,75 Lastumläufen

4.2 Lager mit wechselnder Lagerbelastung

Im zweiten Demonstrationsbeispiel wurde eine wechselnde Belastung So(T) angenommen, die pro Wellenumdrehung einmal einen vollständigen Zyklus durchläuft. Um den Belastungsverlauf besser darstellen zu können, wurde die vertikale Hauptlastrichtung F2(T) mit einer kleinen horizontalen Komponente F1(T) überlagert. (Bild 5, links).

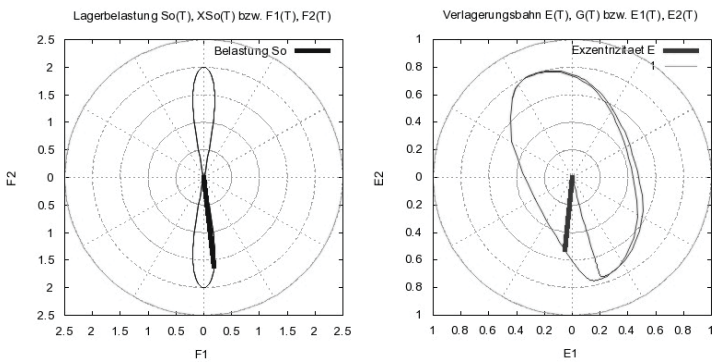


Bild 5: Lagerbelastung F1(T), F2(T) und Verlagerungsbahn E1(T), E2(T)

Das rechte Diagramm zeigt wieder die Verlagerungsbahn einschließlich Anlaufrechnung. Hier ist der stationäre Verlagerungszyklus nach ca. einer Umdrehung erreicht. Bild 6 zeigt die Verhältnisse im abgewickelten Schmierspalt zu einem ausgewählten Zeitpunkt T= 1,15. Das entspricht 1,15 Umdrehungen seit Beginn der Berechnung. Dieser Zeitpunkt entspricht der in Bild 5 hervorgehobenen Belastung So und Verlagerung E.

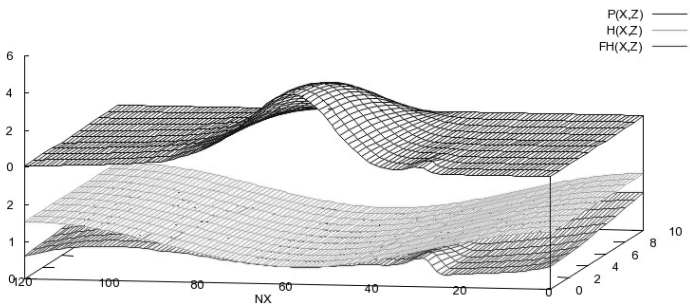


Bild 6: Schmierfilmdruck P, Spaltgeometrie H und Ölverteilung FH im abgewickelten Schmierspalt nach 1,15 Umdrehungen

4.3 Lager mit unrunder Welle bei konstanter Belastung

Bild 7 zeigt den Druckverlauf und die Ölverteilung in der Lagermitte zu zwei ausgewählten Zeitpunkten eines Lagers mit der Breite B=0,5 und unrunder Welle.

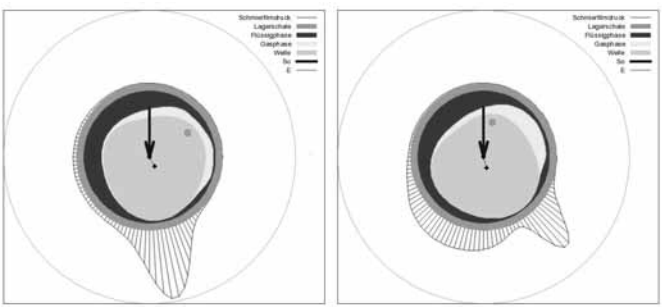


Bild 7: Druckverlauf P(X) und Ölverteilung FH(X) in Lagermitte nach 1,34 Umdrehungen (links) bzw. 1,46 Umdrehungen (rechts)

Die Welle ist "dreieckig" mit einer Abweichung von der ideal runden Form von nur 20% der mittleren Spaltdicke. Diese Art der Unrundheit stellt übrigens den Fall dar, wo allein durch Dickenmessung der Welle die Unrundheit nicht feststellbar ist

Obwohl die Lagerbelastung mit So=2 konstant ist, ist die Druckentwicklung im Schmierspalt instationär und es entwickelt sich eine Verlagerungsbahn gemäß Bild 8, rechts, die pro Umdrehung drei mal durchlaufen wird.

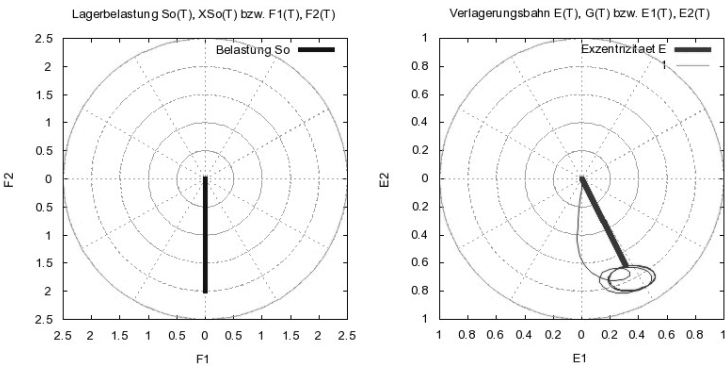


Bild 8: Verlagerungsbahn (rechts) trotz stationärer Belastung (links) beim Lager mit unrunder Welle

Bei diesem Beispiel treten Zustände auf, wo die Berechnung des Druckverlaufs zur Instabilität neigt. Das ist dann der Fall, wenn sich der Druckberg plötzlich teilt und sich dazwischen kurzeitig ein kleines Unterdruckgebiet bildet.

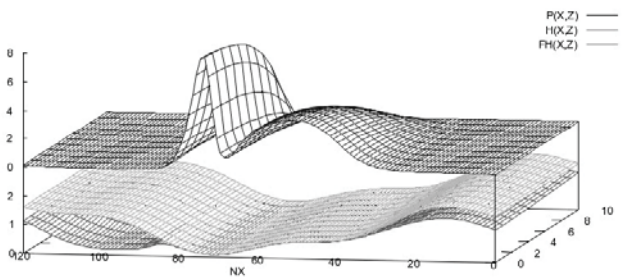


Bild 9: Schmierfilmdruck P, Spaltgeometrie H und Ölverteilung FH im abgewickelten Schmierspalt nach 1,46 Umdrehungen

Dem kann abgeholfen werden, indem der Gitterabstand DX und/oder die Zeitschrittweite DT verringert wird. Prinzipiell kann die Anfälligkeit der Berechnung gegen numerische Instabilitäten bei der Anwendung der erweiterten Schmiertheorie durch Verwendung einer großen Mischungskonstanten C verringert werden, weil dadurch die berechneten Druckverläufe runder werden.

Bild 9 zeigt die Verhältnisse im abgewickelten Schmierspalt zu einem Zeitpunkt, an dem der Druckberg geteilt ist.

4.4 Hydrostatisches Lager mit Verkantung

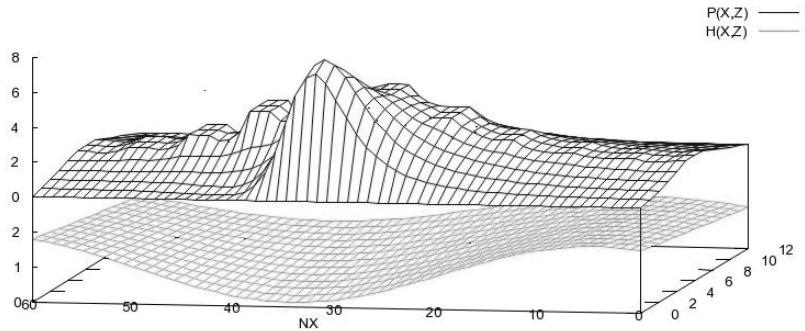


Bild 10: Schmierfilmdruck P und Spaltgeometrie H im abgewickelten Schmierspalt bei umlaufender Verkantung der Welle

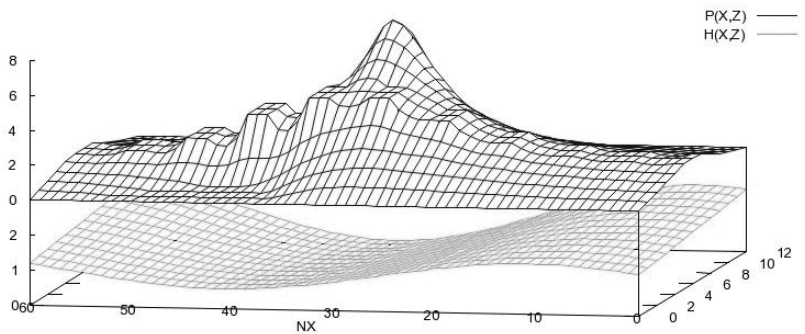


Bild 11: Schmierfilmdruck P und Spaltgeometrie H im abgewickelten Schmierspalt bei umlaufender Verkantung der Welle eine halbe Umdrehung später

Im letztes Beispiel wird ein hydrostatisches Lager (B=0,5) mit einer durch Kapillardrosseln geregelten hydrostatischen Ölversorgung simuliert. Außerdem wird angenommen, dass eine mit der Wellendrehung umlaufende Verkantung von 30% des Lagerspiels über die Lagerbreite auftritt. Die Lagerbelastung liegt bei So=2. Die zehn auf dem Umfang verteilten Schmiertaschen sind klein, so dass noch eine relativ große Spaltfläche für einen hydrodynamischen Druckaufbau zur Verfügung steht.

Die Bilder 10 und 11 zeigen den Druckverlauf P(X,Z) und die Spalthöhe H(X,Z) zu zwei Zeitpunkten, die um eine halbe Drehung versetzt sind. Da die Spaltgeometrie und damit auch die Druckverteilung im Schmierspalt nicht mehr symmetrisch zur Lagermitte sind, musste hier die Berechnung über die gesamten Schmierspaltbreite erfolgen. Andererseits ist es hier ausreichend mit der Reynoldsschen Differentialgleichung zu rechnen, weil durch die reichliche Ölversorgung des hydrostatischen Lagers kaum Unterdruckgebiete auftreten. Deshalb kann hier auch keine Ölverteilung im Schmierspalt angezeigt werden, weil bei Anwendung der Reynoldssche Gleichung stets ein vollständig gefüllter Schmierspalt vorausgesetzt wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Trotz der umfangreichen Überarbeitung des Programms SRIUS ist dieses Werkzeug zur Simulation der Strömung im Schmierspalt nach wie vor ein Programm zur ausschließlichen wissenschaftlichen Nutzung, dessen Anwender sich intensiv in der Theorie der hydrodynamischen Schmierung auskennen müssen und bleibt deshalb weiter hin einem kleinen Expertenkreis zur Nutzung vorbehalten. Anderseits ist es in mehrfacher Hinsicht wie ein für die breite Nutzung strukturiertes Programm gestaltet. Das betrifft insbesondere die umfangreiche Unterstützung und Absicherung der Eingabe und den modulare Aufbau als erweiterbares Baukastensystem.

Während der Überarbeitung hat sich der Autor gelegentlich gefragt, ob dieser Aufwand für ein wissenschaftliches Spezialprogramm überhaupt gerechtfertigt ist. Die bisherige Arbeit mit dem neuen Programm rechtfertigte diesen Aufwand. Durch die Anwenderfreundlichkeit dieses inzwischen komplexen Programms ist ein schnelles, fehlerfreies und reproduzierbares Arbeiten möglich, so dass im Rahmen der eigentlichen wissenschaftlichen Arbeit schnell und systematisch viele Varianten durchgerechnet

werden können. Das ermöglicht einen schnelleren Überblick über die Variantenvielfalt der Prozesse im Schmierspalt und unterstützt die Suche nach optimalen Lösungen.

Damit ist ein vielseitiges Simulationswerkzeug zur Berechnung der Prozesse im Schmierspalt entstanden. Im Rahmen der Anwendung des Programms im Projekt HYDROS ist ein weiterer Ausbau der Simulation hydrostatische Lager zu erwarten.

Die praxisbezogene Anwendung des Programms könnte durch die Verbindung mit FEM-Berechnungen der Lagerbauteile erweitert werden, so dass der Einfluss der Verformung des Lagers auf die Spaltgeometrie auch berücksichtigt wird. Die Voraussetzungen im Programm sind dafür bereits gegeben, da beliebige Spaltgeometrien im Lager berücksichtigt werden können. Um auch für instationäre Lagerbelastungen die zeitlich veränderliche Verformung des Lagers mit vertretbarem Aufwand berücksichtigen zu können, müßte hier mit einer vorgelagerten FEM-Berechnung die Elastizitätsmatrix aller Oberflächenpunkte des Schmierspalts berechnet werden, die dann in die Berechnung der aktuellen Spalthöhe über eine zusätzliche externe Iteration oder direkt im Gleichungssystem berücksichtigt werden könnte.

Literatur

[1] Wegmann, Roland: *Erweiterung der hydrodynamischen Schmiertheorie durch Einbeziehung des Unterdruckgebietes in die Berechnung instationär belasteter Gleitlager.* Dissertation Universität Rostock 1978.

[2] Brökel, Klaus: *Das schwellend belastete Radialgleitlager unter Berücksichtigung der Verformung und eines Schmierstoff-Gas-Gemischs bei beliebiger Spaltgeometrie.* Dissertation Universität Rostock 1980.

[3] Barenthin, Torsten: *Ermittlung der hydrodynamischen Verhältnisse im Stevenrohrlager unter Berücksichtigung einer gekrümmten Welle und beliebiger Nutgeometrie.* Dissertation Universität Rostock 2005.

[4] Radev, Nedyalko: *Individuelle Anpassung von CAD-Systemen und Modellierung eines Pre-Prozessors für spezielle Berechnungs-Software.* Dissertation Universität Rostock 2006.

[5] Gnuplot Version 4.2.3 http://www.gnuplot.info, 2008.

Spezifik von Reverse Engineering in der Kleinserienfertigung des Streichinstrumentenbaus - Produktionstechnische Aspekte[1]

Christine Schöne, Ralph Stelzer, Robert Jung

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion,
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD, TU Dresden
D-01062 Dresden
Email: christine.schoene@tu-dresden.de; ralph.stelzer@tu-dresden.de
Internet: http://www.tu-dresden.de/imm

Inhalt: *Der Beitrag widmet sich der Spezifik der Reverse Engineering Prozesskette im Streichinstrumentenbau. Hierbei sind Produkte mit Freiformflächen beteiligt. Es wird dargelegt, wie die 3D-Scanntechnik, die Datenaufbereitung, die Fertigungsvorbereitung und Fertigung von Decken, Böden und Schnecken von Streichinstrumenten eine Kleinserienfertigung effektiv und reproduzierbar ermöglichen.*

Abstract: *The paper demonstrates the speciality of the Reverse Engineering process chain in the field of bow instrument manufacturing. In this branch, freeeform surfaces are to be found. We show the methods of 3D-Scanning, surface feedback, production planning, manufacturing of parts of cellos and basses in small series.*

Stichwörter: *Reverse Engineering, Freiformflächen, Produktionstechnik*

Keywords: *Reverse Engineering, Freeform surface,*

1 Einleitung

Die NC-Technik ergänzt seit den 50ér Jahren wirkungsvoll die bis dahin angewendete Kopierfrästechnik für die Herstellung von Freiformflächen. Im Unterschied zur NC-Technik benötigt man beim Kopierfräsen immer ein physisches Modell, das in einem handwerklichen Prozess erstellt werden muss (Bild 1). Daher setzt das Kopierfräsen eine größere Stückzahl gleicher herzustellender Teile voraus, wenn man ökonomisch arbeiten möchte.

Die geometrische Gestalt des Korpus von Streichinstrumenten der gleichen Art, z.B. der Celli, variiert bei unterschiedlichen Modellen sehr stark. Verschiedene geometrische Varianten sind dabei vielfach nicht durch Skalieren in den Koordinatenhauptachsen ineinander überführbar. Die Varianz der geometrischen Gestalten ist hierbei deutlich

größer und komplexer zu beschreiben. Das betrifft gleichermaßen die Geometrie der unterschiedlichen Schnecken.

Der generelle Wunsch von Kunden zum Kauf individueller Produkte, ist zunehmend auch beim Erwerb von neuen Instrumenten anzutreffen. Handwerklich arbeitende Meisterfirmen orientieren deshalb darauf, den Streichinstrumentenbau in Deutschland mit kleinen Stückzahlen effektiv und reproduzierbar zu gestalten. Hier sollen nun moderne Methoden der Reverse Engineering Prozesskette Anwendung finden.

Bild 1: Kopierfräsmaschine zur Herstellung von Geigendecken und Geigenböden Urmodelle der Innen- und Außenwölbung (Mitte), Fräsen der Außenwölbung (vordere Reihe), Fräsen der Innenwölbung (hintere Reihe) Quelle: Karl Höfner GmbH & Co. KG, Meisterinstrument

Reverse Engineering setzt ein physisches Modell voraus und beschreibt den Prozess der rechnergestützten 3D-Datenerfassung, die Datenaufbereitung zu CAD-Modellen, die Fertigungsvorbereitung, Fertigung und die Qualitätskontrolle gefertigter Produkte. Eine größere Flexibilität bei der Produktgestaltung und Fertigung soll damit ermöglicht werden.

2 Methode

Zur 3D-Erfassung der Geometrie von Freiformflächen werden Methoden des 3D-Scannens angewendet. Die Erfassung muss mit einer ebenso qualifizierten

Datenaufbereitung und Nutzung in der weiterführenden Prozesskette bis zur Produktherstellung verknüpft werden.

Während im Maschinenbau sowohl in der Großindustrie aber auch im Klein- und Mittelstand sich diese Methoden etabliert haben, gilt es diese im handwerklich geprägten Umfeld des Musikinstrumentenbaus noch fundiert einzuführen. In den vergangenen 10 Jahren bestanden massive subjektive Vorbehalte im Bereich des Handwerks. Diese sind nun aufgrund der wirtschaftlichen Zwänge rasant in den Hintergrund getreten [1].

Im Forschungsprojekt, gemeinsam mit dem Institut für Musikinstrumentenbau in Zwota ging es in einem Teilprojekt um die Freiformflächen- und NC-Fräsbahngenerierung sowie CNC-Fertigung von Musikinstrumenten mit Toleranz- und Fehlerbetrachtung.

Bild 2: Original Geige Meisel und Nachbau anhand rechnergestützt gefertigter Decke und Boden

Die Ergebnisse belegen, dass der Nachbau historischer Streichinstrumente mittels der Methode des Reverse Engineering -3D-Erfassung durch taktiles 3D-Digitalisieren in Verbindung mit einem Ultraschall-Dickenmessgerät, die CAD-Modellierung, CNC-Programmierung, CNC-Fertigung, Bewertung, manuelle Nacharbeit - prinzipiell möglich ist. Bis zur endgültigen Form sind allerdings mehrere Durchläufe bei der Modellierung und CNC-Fertigung erforderlich (Bild 2) [2], [3].

Ziel des neuen Vorhabens ist es nun, die serielle und digitale Fertigung von Streichinstrumenten in kleinen Stückzahlen zu qualifizieren [4]. Kleine Losgrößen sind

dabei ein entscheidender Punkt. Aus diesem Grund ist es von besonderer Bedeutung, die Datenerfassung, die Aufbereitung der Scanndaten und den Fertigungsprozess so flexibel und effektiv wie möglich zu gestalten. Das Forschungsprojekt wird gemeinsam mit zwei Meisterfirmen im Vogtland [2] bearbeitet und es konzentriert sich auf die rechnergestützte Fertigung von Teilen von Celli und Bässen. Bei diesen Streichinstrumenten ist bisher der größte handwerkliche Aufwand zu verzeichnen.

Besonders die Erfassung des natürlichen Werkstoffes Holz mit dessen wuchsbedingt schwankenden mechanischen Eigenschaften und der daraus resultierenden erforderlichen Anpassung der zu fertigenden Geometrie stellt hier eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe dar.

Die Reverse Engineering Prozesskette gilt es daher für den Bereich der Musikinstrumentenindustrie und insbesondere unter produktionstechnischen Gesichtspunkten anzupassen. Im Unterschied zum Maschinenbau geht es hier um die Holzbearbeitung von natürlichen Materialien im oberen Preissegment. Diese sind als organische, nachwachsende Werkstoffe einer beachtlichen Schwankung hinsichtlich der Qualität sowie der mechanischen Eigenschaften unterworfen. Die somit stark streuenden Materialeigenschaften haben deutlich messbare Auswirkung auf die Klangeigenschaften der Musikinstrumente. Dieser Aspekt soll innerhalb der technologischen Kette künftig Beachtung finden und durch eine Geometrieanpassung der Einzelbauteile berücksichtigt werden.

3 Lösungsweg

Modellvorlagen für neue geometrische Varianten von Celli und Bässen werden von Musikinstrumentenmeistern künstlerisch kreativ entworfen, handwerklich aus einem Holzrohling erstellt (Bild 3) und nun einer digitalen Weiterverarbeitung zugeführt. Weiterhin finden traditionell bewährte physische Modellvorlagen von Instrumenten Anwendung.

Decken und Böden der Instrumente gilt bei der weiteren Verarbeitung besondere Beachtung zu schenken, da diese maßgeblich das Klangbild bestimmen und technologisch für die Fertigung eine Herausforderungen darstellen. Bei dem geplanten Vorgehen befinden sich Decken und Böden im nicht zusammengebauten Zustand. Folglich sind Innen- und Außenwölbung optisch direkt erfassbar. Dazu werden die

Modellrohlinge mittels Streifenprojektion digitalisiert. Dieses Verfahren ist im Gegensatz zu tastenden Varianten als robust und zeiteffizient zu bewerten.

Die Scanndaten der Innen- und Außenwölbung liegen im gleichen Koordinatensystem vor. Diese werden trianguliert und anschließend einer Flächenrückführung unterzogen.

Bild 3: Handgefertigtes Modell eines Bassbodens dient als Vorlage für das 3D-Scannen, bereits mit Passmarken beklebt

Die Bereiche der Außen- und Innenwölbung werden hierbei als Freiformflächen repräsentiert. Der Randbereich wird als ebene Fläche mit einer Berandungskurve beschrieben (Bild 4).

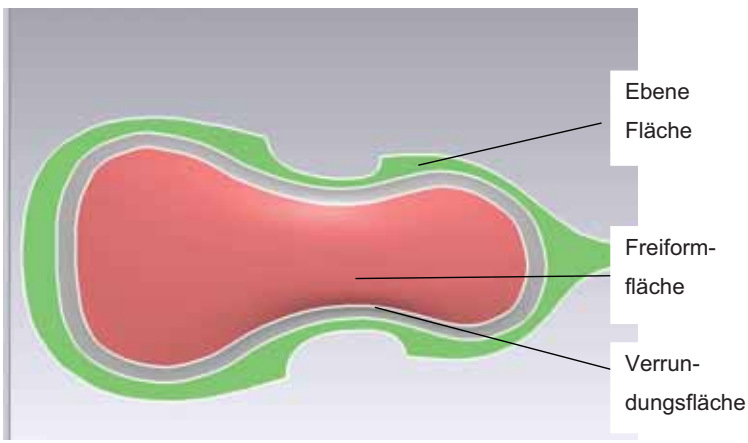


Bild 4: Bassboden für die Flächenrückführung in Teilflächen segmentiert

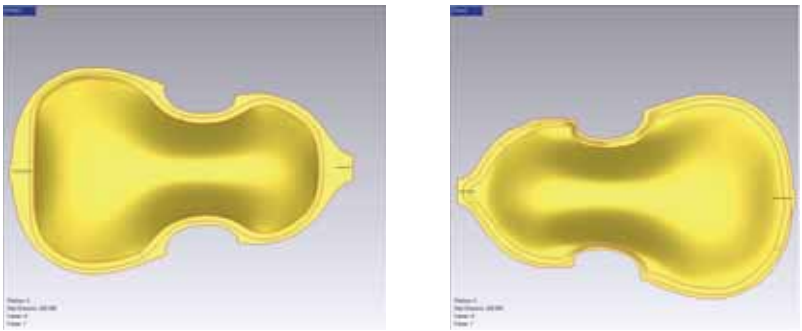


Bild 5: Innen- und Außenwölbung des Bassbodens als Flächenmodell aufbereitet

Von den Decken und Böden werden Innen- und Außenwölbung als Flächenmodelle aufbereitet und als IGES-Datensatz für die NC-Programmierung bereitgestellt (Bild 5).

Die NC-Programmierung erfolgt für die Innen- und Außenwölbung mit Schrupp- und Schlichtzyklen. Zur Erreicheung einer gewünschten Oberflächengüte wurden verschiedene Werkzeuge und Fräsregime erprobt, um schließlich die Strategie endgültig festzulegen.

Bild 6: Bassboden während der Bearbeitung auf CNC-Fräsmaschine FORMAT 4

Die Fertigung erfolgt auf einer 3-Achs-Fräsmaschine vom Typ Format-4. Zunächst wird die Außenwölbung gefertigt (Bild 6). Danch wird der Rohling umgespannt und die Innenwölbung wird hergestellt. Zur sicheren Werkstückspannung und zur eindeutigen

Fixierung ist hierfür die exakte Nachbildung der Außenwölbung als Negativform erforderlich. Diese wird als quasi Matrize vorher anhand der Daten der Außengeometrie hergestellt. Zusätzlich werden in diese Negativform Schlitze eingebracht, die der Vakuumspannung der bereits einseitig bearbeiteten Rohlinge dienen (Bild 7).

Bild 7: Matrizen unterschiedlicher Decken und Böden dienen als Vakuumspannvorrichtung

Hinsichtlich der geometrischen Kompliziertheit stellen die Instrumentenhälse mit integrierten Schnecken, die der Fixierung des Griffbrettes der Saiteninstrumente dienen, eine besondere Herausforderung an die 3D-Erfassung, Modellierung und Fertigung dar. Diese weisen ähnlich wie die grobe Außenform der Instrumente, ebenfalls eine große Formenvielfalt auf.

Mehrere unterschiedliche Formen wurden bisher digitalisiert und zu 3D-Flächenmodellen aufbereitet. Bei der Fertigung auf einer 3-Achs-Fräsmaschine sind dazu 4 unterschiedliche Spannungen, jeweils um 90° versetzt, erforderlich (Bild 8). Diese Formen werden zweckmäßig durch einen Teileapparat auf dem Maschinentisch realisiert.

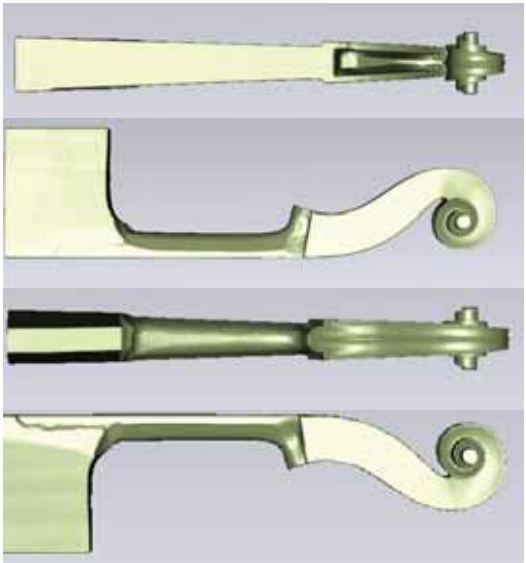


Bild 8: Basshals mit Schnecke als CAD-Volumenmodell, rückgeführt aus Digitalisierdaten in 4 Ansichten

4 Weiterführung und Ausblick

Bisher wurden 10 unterschiedliche Decken und Böden von Celli und Bässen digitalisiert und zu CAD-Modellen aufbereitet. Im Rahmen des Projektes werden es ca. 30 verschiedene Formen sein, die als CAD-Referenzmodelle dienen sollen. Bei der rechnergestützten 3D-Erfassung und Fertigung im Musikinstrumentenbau ist Holz als lebender Werkstoff beteiligt. Dieser ist in hohem Maße Schwankungen in der Werkstoffdichte und Struktur unterworfen. Bisher werden die Formen der Decken und Böden intuitiv an die gegebenen Holzqualitäten angepasst. Das Ziel der weiterführenden Arbeiten besteht nun darin, diesen Prozess durch Messungen der Holzdichte und -feuchtigkeit zu objektivieren. Aus den vorhandenen CAD-Modellen der Decken und Böden sollen dann geringfügig modifizierte Formen abgeleitet werden, um damit die Geometrie an vorhandene tatsächliche Holzeigenschaften anpassen zu können.

Literatur

[1] Fichtner, Schöne, C.: Leitfaden mit prototypischer Erprobung einer Reverse Engineering-CAM-Prozesskette für den Kunst- und Kulturbereich, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 8ZBR, TU Dresden und GFaI Berlin, 2001

[2] Schetelich, F., Schöne, C.: Rechnergestützte Konstruktion, Simulation und Fertigung von Musikinstrumenten, in Musicon Valley, Report 2006, ISBN – 10: 3-00-019671-4

[3] Schöne, C.: Freiformflächen- und NC-Fräsbahngenerierung sowie CNC-Fertigung von Musikinstrumenten mit Toleranz- und Fehlerbetrachtung, Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 03/4738B, Laufzeit 1.1.2005-31.12.2006

[4] Schöne, C.: 3D-Scannen und CAD-Modellierung im Streichinstrumentenbau und Qualifizierung der Modellierung und CNC-Fertigung durch Holzanalysetechnik, Forschungsantrag zum Vorhaben PRO INNO II, Förderkennzeichen KF0179103MB7

[1] Das Vorhaben wird gefördert durch das BMWi im Rahmen von PRO INNO II, Förderkennzeichen KF0179103MB7, Laufzeit 01.01.2008-31.12.2009

[2] Björn Stoll, Meisterwerkstatt für Cello und Kontrabass,' Ernst Gläser Str. 9, 08265 Erlbach/Vogtland

Stefan Kreul, Meisterwerkstatt für Cellobau, Erlbacher Str. 38, 08258 Markneukirchen/ Vogtland

Erweiterte Startmodelle zur Produktbeeinflussung der Karosserie aus Sicht der Produktionsplanung

Henrich Brockmeyer, Andreas Lucko, Frank Mantwill

Professur für Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung,
Helmut-Schmidt-Universität, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg
Email: henrich.brockmeyer@hsu-hh.de; Internet: http://www.hsu-hh.de/mrp

Inhalt: *Automobilhersteller stehen vor der Herausforderung, immer mehr Marktsegmente und Marktnischen mit Modellreihen und Derivaten besetzen zu müssen, wobei der Absatz je Fahrzeugtyp sinkt, sich die Produktlebenszyklen verkürzen und die Marktdynamik wächst. In Folge gestaltet sich eine kostengünstige Produktion problematisch. Um einem Kostenwachstum entgegenzuwirken, sollen nun neue Fahrzeugprojekte in standardisierte und im Idealfall in bestehende Produktionsanlagen integriert werden. Hierfür bedarf es einer Produktbeeinflussung aus Sicht der Produktionsplanung, d.h. einer Anpassung der Produkte an die Produktionsanlagen. Mit den Pro²Kar – Erweiterten Startmodellen ist ein Ansatz zur Berücksichtigung der Anforderungen aus der Produktionsplanung schon in frühen Phasen der Karosserieentwicklung erarbeitet worden.*

Abstract: *Automotive manufacturers are challenged by a growing number of product derivatives, decreasing sales figures of each product, shorter product life cycles and increasing market dynamics. There is a strong need for a competitive cost-optimal production. Today, there are plans to use standardized production equipment and at best to integrate new products in existing production facilities. Early product influence is necessary for this purpose. The Pro²Kar – Advanced Startup Model is an approach to take the requirements of the production planning into account in early phases of the body development.*

Stichwörter: *Produktbeeinflussung, CAD, Digitale Fabrik, Erweitertes Startmodell, Karosserie*

Keywords: *Product Influence, CAD, Digital Factory, Advanced Startup Model, Body in White*

1 Einleitung

Durch die Globalisierung öffnen sich für die deutsche Automobilindustrie neue Absatzmärkte, gleichzeitig verstärkt sich jedoch der internationale Wettbewerbsdruck. Zusätzlich zur Globalisierung ist durch regional unterschiedliche Anforderungen an das Produkt eine immer stärkere Individualisierung zu erkennen [1]. Die Hersteller reagieren, indem sie sich verstärkt an Kundenerwartungen orientieren und so die Fahrzeugpalette durch eine immer größere Variantenvielfalt ausweiten [2]. Bei gleichbleibenden Absatzzahlen auf den Stammmärkten führt dies zu Kannibalisierungseffekten unter den Fahrzeugmodellen und damit zu einer geringeren Stückzahl je Fahrzeugmodell [3]. Durch die stei-

gende Variantenvielfalt resultieren starke Nachfrageschwankungen, die bei einer Solitärfertigung zu freien Kapazitäten oder zu langen Wartezeiten führen können. Im Durchschnitt treten im Karosseriebau durchschnittlich 50 Prozent freie Kapazitäten auf, die aus finanzwirtschaftlicher Sicht eine Überinvestition bedeuten [4].

Um in Zukunft wettbewerbsfähig zu bleiben, genügt es nicht mehr nur über hohe Verkaufsvolumen Skaleneffekte zu erlangen, sondern zusätzlich zu den Volumenmodellen müssen Derivate mit einer hohen Rendite auf den Markt gebracht werden. Bei Derivaten mit entsprechend kleineren Stückzahlen und oftmals kurzen Lebenszyklen ist die Reduzierung der Investitionskosten für den Karosserierohbau daher besonders entscheidend, da der wirtschaftliche Einfluss bei geringen und ggf. stark schwankenden Stückzahlen überproportional hoch ist [3]. Daher strebt die deutsche Automobilindustrie besonders bei Derivaten aber auch bei neuen Volumenmodellen an, Fahrzeugmodelle in standardisierte und im Idealfall in bestehende Produktionsanlagen zu integrieren. Dieses erfordert, dass frühzeitig im Produktentstehungsprozess Produkt- und Produktionskonzepte besser aufeinander abgestimmt werden müssen.

Die Erweiterten Startmodelle (ESM) sollen dabei helfen, die Anforderungen aus der Produktionsplanung zu bündeln und in einer geeigneten Form dem Karosserieentwickler bereitzustellen. Die ESM sind eine technische Maßnahme des Forschungsprojektes frühzeitige Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im Karosseriebau (Pro²Kar). Das übergeordnete Ziel von Pro²Kar ist, einen optimierten und erweiterten Produktentstehungsprozess zu beschreiben, bei dem Karosserieentwicklung und Produktionsplanung von Anfang an enger zusammenarbeiten. Dieser Produktentstehungsprozess wird durch ein Portfolio aus organisatorischen und technischen Maßnahmen unterstützt.

2 Produktentstehungsprozess Karosserie

Der Produktentstehungsprozess Karosserie untergliedert sich allgemein in Initialphase, Konzeptphase, Serienentwicklungsphase und Serie. Maßgeblich beteiligt am Produktentstehungsprozess Karosserie sind die Karosserieentwicklung, die Produktionsplanung und die Produktion. Das Bild 1 stellt den gesamten Produktentstehungsprozess Karosserie dar, es werden nachfolgend jedoch nur die am ESM maßgeblich beteiligten Bereiche Karosserieentwicklung und Produktionsplanung erläutert.

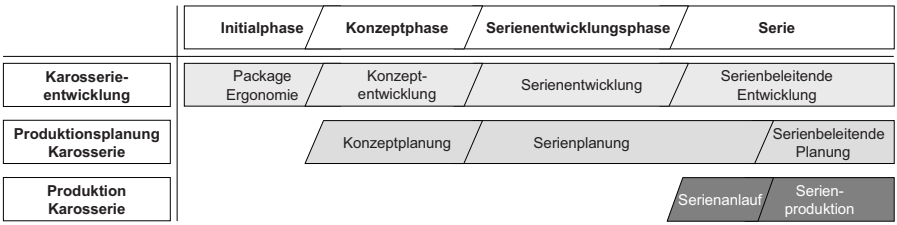


Bild 1: Produktentstehungsprozess Karosserie

2.1 Karosserieentwicklung

In der Initialphase beginnt die projektabhängige Phase mit der Definition der strategischen Ziele des Unternehmens und der Anforderungen an die Karosserie. In dieser Phase ist das Package am aktivsten und harmonisiert Bauräume, Ergonomie und Gesetzesvorgaben. Mit dem Übergang in die Konzeptphase beginnt die CA-Modellerstellung der Karosseriebaugruppen und Karosserieeinzelteile in enger Abstimmung mit dem Design- und Packageprozess. Zu diesem Zeitpunkt werden noch mehrere Konzepte verfolgt. Bis zum Konzeptentscheid zu Beginn der Serienentwicklungsphase verdichtet sich ein Konzept, das dann weiter detailliert wird. In dieser Phase finden umfangreiche Absicherungen der Produktmodelle und erst später auch der dazugehörigen Produktionsanlagen statt.

2.2 Produktionsplanung Karosserie

In der Konzeptplanung beginnt die Planung des Produktionsprozesses der Karosserie. Zunächst werden bezogen auf die kalkulierten Stückzahlen aus dem Marketing die strategischen Ziele wie beispielsweise die Produktionsstandorte, der Einsatz neuer Fertigungsverfahren oder das Übernehmen von Produktionsanlagen definiert. In der Serienplanung werden dann im Rahmen der Makroprozessplanung das Hallenlayout und der Materialfluss bezogen auf erste Produktdaten aus der Karosserieentwicklung ausgelegt. Die Mikroprozessplanung beschäftigt sich parallel mit der Ergonomie des Arbeitsplatzes und der Arbeitssicherheit [5]. Ein weiterer wesentlicher Schwerpunkt ist die Planung und die Konstruktion der Produktionsanlagen, bzw. der Betriebsmittel. Dabei wird zwischen typungebundenen und typgebundenen Betriebsmitteln unterschieden. Die typgebundenen Betriebsmittel wie beispielsweise Spann- und Greifvorrichtungen werden bezogen auf die Fahrzeugkarosserie konstruiert und nach dem Auslauf des Fahrzeugprojektes nicht wie-

derverwendet. Der Anteil typabhängiger Betriebsmittel beträgt in einem konventionell geplanten Fahrzeugprojekt ca. 60% [3].

Um die Investitionskosten im Karosseriebau durch eine Integration neuer Fahrzeugmodelle in vorhandene Produktionsanlagen zu senken, muss der Anteil typabhängiger Betriebsmittel reduziert werden. Hierfür muss ein Umdenken in der Produktionsplanung stattfinden, um in Zukunft das Produkt schon frühzeitig aktiv zu beeinflussen. Derzeit nimmt die Produktionsplanung im Zusammenspiel mit der Karosserieentwicklung noch traditionell eine reaktive Haltung ein [6].

2.3 Zusammenarbeit Karosserieentwicklung und Produktionsplanung Karosserie

Die integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung wird in den Prozessbeschreibungen vieler Unternehmen als implementiert dargestellt, in der Praxis funktioniert die Abstimmung jedoch nur selten. Häufig wird die Integration noch durch Abteilungsdenken behindert, so dass ein erhebliches Kostenpotenzial durch die produktionsgerechte Produktgestaltung nicht genutzt wird [2]. Das Abteilungsdenken erweist sich durch den verschärften Wettbewerbsdruck auf den Absatzmärkten zu einem zunehmenden Innovationshindernis und führt zu einer unzureichenden Abstimmung von Karosserieentwicklung und Produktionsplanung und letztlich zu immer wieder auftretenden zeit- und kostenintensiven Iterationsschleifen. Gründe hierfür sind unterschiedliche Zielsetzungen und Sichtweisen, Interessenkonflikte, räumliche Distanz und die Karosserieentwicklung und die Produktionsplanung sprechen eine unterschiedliche Sprache. Um dieses zu vermeiden, ist im Sinne der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung eine enge Verzahnung beider Bereiche anzustreben [2]. Ähnlich wie bei japanischen Automobilherstellern muss daher neben der Produktentwicklung die Produktionsplanung als wesentlicher Bestandteil der integrierten Produkt- und Produktionsprozessgestaltung schon in der Konzeptphase an Bedeutung gewinnen.

3 Rechnerunterstützung im Karosseriebau

Die Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess Karosserie umfasst eine Vielzahl verschiedener Systeme. Hier sollen kurz die beiden wichtigsten Systeme der Karosserieentwicklung (CAD) und der Produktionsplanung (Digitale Fabrik) und deren Möglichkeiten und Handlungsfelder vorgestellt werden.

3.1 CAD

3D-CAD hat sich als Standardwerkzeug zur Konstruktion und Evaluierung von Flächenmodellen der Fahrzeugkarosserie in der Automobilindustrie durchgesetzt. Neue Techniken wie parametrisch-assoziatives, featurebasiertes oder wissensbasiertes CAD finden vermehrt Einzug. Mit der parametrisch-assoziativen Arbeitsweise wird chronologiebasiert, also mit einer editierbaren Modellierungshistorie, konstruiert. Änderungen an der Produktgestalt können so effizienter durchgeführt werden. Darauf aufbauend bietet das featurebasierte CAD die Möglichkeit, die Geometrie mit Semantik z.B. mit Funktion und Fertigungsinformationen zu verknüpfen. Unter wissensbasiertem CAD wird die Integration von personenunabhängigem Wissen über Regeln und Prozessabläufe in den Konstruktionsprozess verstanden.

3.2 Digitale Fabrik

Die Digitale Fabrik hat sich von der traditionellen Arbeitsweise in der Produktionsplanung mit verschiedenen Simulationsprogrammen und Excel oder MS-Access-Systemen, die nicht miteinander gekoppelt waren, zu einer integrierten und 3D-orientierten grafischen Planungsumgebung entwickelt [7]. Im Gegensatz zum CAD steht die praktische Umsetzung der Digitalen Fabrik noch am Anfang. Problemfelder sind ein hoher und kostenintensiver Modellierung- und Berechnungsaufwand für umfassende und detaillierte Modelle und die Anbindung zum Produktdatenmanagement [8].

Außerdem gibt es unterschiedliche Sichtweisen der Digitalen Fabrik. Weit verbreitet ist die technikorientierte Sichtweise, bei der die Digitale Fabrik nur als Software zur virtuellen Absicherung der Produktdaten in der Produktionsplanung verstanden wird. Zukünftig sollte aber eine geschäftsprozessorientierte Sichtweise, die die Karosserieentwicklung durch die frühzeitige Produktbeeinflussung und die Produktion über die virtuelle Inbetriebnahme integriert, propagiert werden [9]. Derzeit wird die Digitale Fabrik im Produktentstehungsprozess aber meistens erst in der Serienentwicklungsphase in der Produktionsplanung zur Produktabsicherung eingesetzt. Zu diesem Zeitpunkt kann das Produkt kaum noch bezogen auf die Anforderungen der Produktionsplanung beeinflusst werden, die Ergebnisse führen lediglich zu späten und damit teuren Änderungsschleifen.

4 Anforderungen der Produktionsplanung an das Produkt Karosserie

Die Automobilhersteller streben als strategisches Ziel an, verschiedene Fahrzeugmodelle auf einer Linie zu produzieren und bewährte und prozesssichere Produktionsanlagen von Vorgängerfahrzeugen zu übernehmen, um die Investitionskosten im Karosseriebau zu reduzieren und um Absatzschwankungen besser ausgleichen zu können. Durch eine variantenflexible Produktion sollen zukünftig z.B. Limousine, Kombi, SUV und Cabriolet auf einer Linie im Karosseriebau produziert werden [3]. Um dieses Vorhaben zu realisieren, müssen bereits in der Konzeptphase die Anforderungen aus der Produktionsplanung an die Karosserie berücksichtigt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes Pro²Kar wurde daher als Vorbereitung zur Konzeption des ESM eine Anforderungsanalyse bei einem deutschen OEM und bei einem Contract Manufacturer durchgeführt, bei der die Sammlung von Anforderungen aus der Produktionsplanung zur Übernahme von Produktionsanlagen im Mittelpunkt stand. Das Bild 2 zeigt die identifizierten Anforderungen.

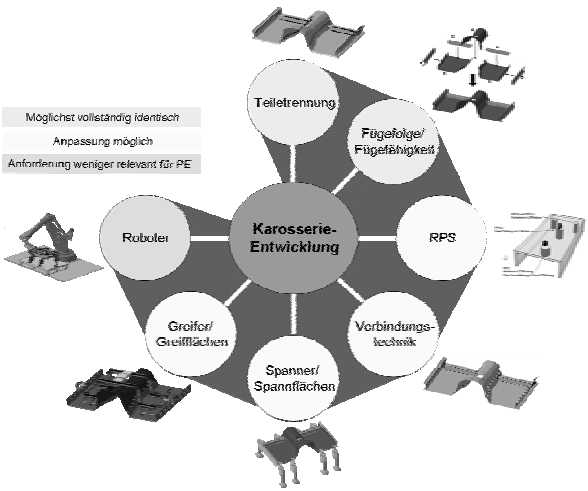


Bild 2: Anforderungen an die Karosserieentwicklung zur Übernahme von Produktionsanlagen

In der Konzeptphase sind die Anforderungen Teiletrennung und Fügefolge/ Fügefähigkeit entscheidend. Aus der Teiletrennung resultiert die Anzahl an Bauteilen einer Baugruppe. Außerdem wird über die Teiletrennung die Position der Flansche und damit der Verbindungstechnik festgelegt. Mit der Fügefolge wird die Reihenfolge angegeben, mit der

die Karosserieeinzelteile zu einer Baugruppe und letztlich zur Gesamtkarosserie zusammengesetzt werden. Dabei ist auf die Fügefähigkeit zu achten, die durch ein hinterschnittfreies und möglichst einfaches Zustellen und Einlegen der Bauteile in die Produktionsanlage gegeben ist. Sollen Derivate in eine Produktionslinie integriert oder Produktionsanlagen für ein Nachfolgermodell übernommen werden, müssen diese Anforderungen möglichst vollständig eingehalten werden, da sich aus der Teiletrennung und Fügefolge direkt das Layout der Produktionsanlagen ableitet.

Mit der Detaillierung der Karosserieeinzelteile sind weitere Anforderungen zu berücksichtigen. Die Referenzpunktsystematik (RPS) dient dazu, Karosserieeinzelteile in der Vorrichtung eindeutig zu einander mittels Zentrierdornen und Auflageflächen zu positionieren, um eine hohe Wiederholgenauigkeit zu erzielen und bezogen auf Toleranzen und Passungen qualitativ hochwertige Karosserien zu produzieren. Nach der 3-2-1 Regel sind drei ebene Auflageflächen, eine Bohrung und ein Langloch im Karosserieeinzelteil vorzusehen, die bei einer Übernahme von Produktionsanlagen zunächst berücksichtigt werden sollten. Durch flexible Produktionsanlagen, bei denen die Zentrierdorne und Aufnahmeflächen beispielsweise in zwei Netzrichtungen verfahrbar sind, können jedoch Umpositionierungen an der RPS-Geometrie vorgenommen werden.

Durch die Verbindungstechnik werden Karosserieeinzelteile an Flanschen zu einer Baugruppe gefügt. Es gibt im Karosseriebau verschiedene Verbindungstechniken wie z.B. das Widerstandspunktschweißen, Laserschweißen oder das Plasmalöten. Eine Trendumkehr wieder zu konventionellen, beherrschten Prozessen, um die Anzahl verschiedener Verbindungstechniken in einer Fahrzeugkarosserie zu reduzieren, ist zu erkennen. Daher wird hauptsächlich das Widerstandspunktschweißen, teilweise in Kombination mit Kleben, eingesetzt [3]. Sollen Produktionsanlagen übernommen werden, muss die Art der Verbindungstechnik identisch sein. Die Position und Anzahl kann durch die Flexibilität der Schweißroboter angepasst werden.

Mit Spannern werden die durch RPS positionierten Karosserieeinzelteile in der Vorrichtung vor dem Fügeprozess gespannt, um ein Aufspringen während des Fügeprozesses zu vermeiden. An Roboter angeflanschte Greifer dienen dazu, Karosserieeinzelteile bzw. Baugruppen aufzunehmen und in Vorrichtungen einzulegen. Hierfür sind ebene Spann- und Greifflächen an den Karosserieeinzelteilen vorzusehen. Auch diese sollten in Anzahl und Position möglichst eingehalten werden, Anpassungen durch flexible Vorrichtungen sind jedoch ähnlich wie bei RPS möglich. Die Anforderungen des Roboters sind

auf Grund der hohen Flexibilität weniger relevant und müssen daher zur Produktbeeinflussung nicht berücksichtigt werden.

Sollen Produktionsanlagen übernommen werden, findet heute meist eine textbasierte Übergabe dieser Anforderungen aus der Produktionsplanung an die Karosserieentwicklung in Form von Richtlinien zur produktionsgerechten Konstruktion, Werksnormen, Präsentationen oder Protokollen über Datenbanken statt. Die Fülle an textbasierten Anforderungen, die zudem oft nicht für die Karosserieentwicklung aufbereitet sind, hemmt die Beeinflussung des Produktes aus Sicht der Produktionsplanung. Der Karosserieentwickler ist durch die Vielzahl der Dokumente somit nicht in der Lage, alle zu berücksichtigen. Selbst wenn Dokumente gelesen werden, bleibt immer ein Ermessensspielraum, der Interpretationen zulässt und zu unterschiedlichen Umsetzungen führen kann. Außerdem kommt es häufig vor, dass sich Dokumente widersprechen. Nur selten ist das Wissen des Karosserieentwicklers deshalb von einer solchen Breite, dass der Einfluss der Produktgestalt auf die Produktion abgeschätzt werden kann [2]. Um diesem entgegenzuwirken, muss der Karosserieentwickler in möglichst kurzer Zeit die für ihn relevanten Informationen ableiten können und diese in einer geeigneten Form, in seiner Sprache zur Verfügung gestellt bekommen.

5 Das Pro²Kar – Erweiterte Startmodell

Die Pro²Kar – Erweiterten Startmodelle (ESM) sollen helfen, die Anforderungen aus der Produktionsplanung zu bündeln und in der Sprache des Karosserieentwicklers, in Geometrie, ergänzt um Metainformationen, bereitzustellen. Die ESM werden in CAD, in dem Werkzeug der Karosserieentwicklung, von der Produktionsplanung aufgebaut und an die Karosserieentwicklung übergeben. Anschließend wird das ESM in das Arbeitsmodell des Karosserieentwicklers integriert, um die Anforderungen aus der Produktionsplanung schon frühzeitig zu berücksichtigen. Im Rahmen des Forschungsprojektes Pro²Kar wird das ESM mit dem CAD-System CATIA V5 umgesetzt. Das ESM weist eine standardisierte CAD-Ordnerstruktur auf, die von der Produktionsplanung individuell gefüllt werden kann. Für jede der in Kapitel 4 beschriebenen Anforderungen wird im ESM ein Ordner mit einer entsprechenden Unterstruktur vorgehalten. Je nach Fahrzeugprojekt und Phase im Produktentstehungsprozess unterscheidet sich der Befüllungsgrad der Ordnerstruktur. Sollen gesamte Produktionsanlagen übernommen werden, so sind die Ordner aller Anforderungen

im Sinne des featurebasierten CAD mit Geometrie und/ oder Metainformationen gefüllt. Steht eine gesamte Übernahme nicht im Fokus, es sollen aber dennoch Standards oder Best Practices wie beispielsweise Standardschweißzangen verwendet oder Konstruktionsrichtlinien wie Schweißpunktabstände oder Mindestflanschlängen berücksichtigt werden, so ist der Ordner der Anforderung Verbindungstechnik entsprechend gefüllt.

Je nach Phase im Produktentstehungsprozess wird zwischen dem generischen ESM und den detaillierten ESM unterschieden. Schon zu Beginn der Konzeptphase dient ein generisches ESM zur Berücksichtigung der allgemeingültigen Anforderungen. Zu den allgemeingültigen Anforderungen gehören projektunabhängige Anforderungen, die bisher beispielsweise nur textbasiert in Form von Konstruktionsrichtlinien vorhanden waren, und die in der frühen Phase wichtigen projektabhängigen Anforderungen Teiletrennung und Fügefolge/ Fügefähigkeit.

In der Serienentwicklungsphase werden dann detaillierte ESM, nach Zonen aufgeteilt, dem Karosserieentwickler übergeben. So werden von der Produktionsplanung ca. 15-20 ESM für eine Karosserie für die Zonen Fahrzeugboden, Seitenwandrahmen, Dach, Heckklappe, etc. aufgebaut. Die Anforderungen werden aus dem Modell der Digitalen Fabrik der zu übernehmenden Produktionsanlage abgeleitet. Vorraussetzung hierfür ist, dass das Modell der Digitalen Fabrik die realen Produktionsanlagen abbildet. Ist das digitale Modell der realen Fabrik vorhanden, werden die einzuhaltenden Geometrien und Metainformationen aus der Produktionsanlage, die die Karosserie direkt beeinflussen, extrahiert. Bei den Anforderungen RPS, Spann- und Greiftechnik werden beispielsweise die Berührflächen zwischen Karosserie und Betriebsmittel, die Störgeometrie des Betriebsmittels als Schnittansicht und die Metainformation der Flexibilität, die den Raum für Umpositionierungen aufspannt, übergeben (siehe Bild 3). Da das ESM nur die extrahierten Geometrien und Metainformationen aus der Digitalen Fabrik beinhaltet, können nach kurzer Einarbeitungszeit die Anforderungen aus der Produktionsplanung in der Karosserieentwicklung richtig interpretiert und in produktionsgerechte Produkte umgesetzt werden.

Der Aufbau der ESM soll zukünftig in der Produktionsplanung stattfinden. Da diese Arbeit einen neuen Aufgabenumfang für die Produktionsplanung darstellt, ist im Forschungsprojekt eine Applikation zur effizienten Befüllung des ESM aus der Digitalen Fabrik erarbeitet worden. Diese Applikation, die mit der Makrosprache Visual Basic for Application (VBA) umgesetzt wurde, ermöglicht die systematische und assistierte Befüllung der CAD-Struktur des ESM durch die Selektion der relevanten Geometrien und Metainformati-

onen durch den Produktionsplaner in seinem Werkzeug, in der Digitalen Fabrik. Das Bild 3 zeigt die Befüllung eines detaillierten ESM für die Zone Boden vorne aus DELMIA V5 und das abgeleitete ESM, das an die Karosserieentwicklung übergeben wird.

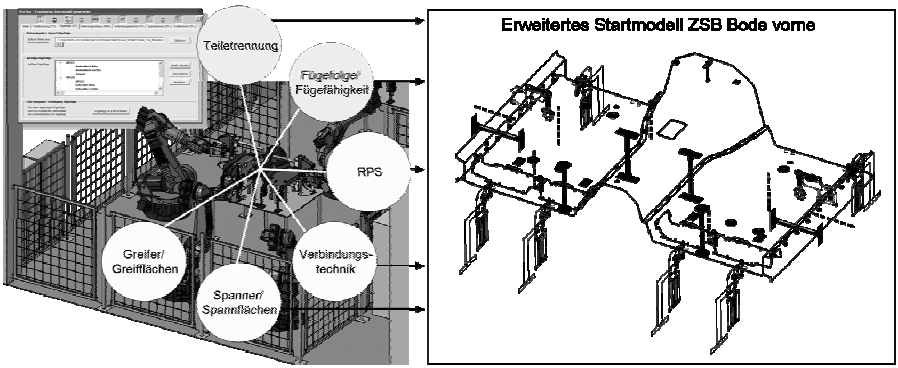


Bild 3: Ableitung des Erweiterten Startmodells ZSB Boden vorne aus der Digitalen Fabrik

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um zukünftig immer mehr Fahrzeugmodellreihen und Derivate kostengünstig mit bestehenden Produktionsanlagen produzieren zu können, bedarf es einer Produktbeeinflussung durch die Produktionsplanung schon in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses Karosserie. Im Forschungsprojekt Pro²Kar ist die technische Maßnahme ESM, die als Mediator zwischen den beiden Sichten Produktionsplanung und Karosserieentwicklung fungiert, zur Berücksichtigung der Anforderungen aus der Produktionsplanung erarbeitet worden. Das ESM ist eine standardisierte CAD-Struktur, die individuell durch die Produktionsplanung aus der Digitalen Fabrik befüllt wird und die die Anforderungen der Produktionsplanung bündelt und in die Sprache des Karosserieentwicklers, in Geometrie und/ oder Metainformationen, übersetzt.

Voraussetzung für eine effiziente Erstellung des ESM in der Produktionsplanung ist ein aktuelles Abbild der realen Produktionsanlagen in der Digitalen Fabrik. Oft werden heute aber vor dem Serienstart oder während der laufenden Serienproduktion Veränderungen an Produktionsanlagen vorgenommen, die nicht zurück in das Modell der Digitalen Fabrik eingepflegt werden. Es findet also kaum ein Rückfluss aus der Produktion in die Produktionsplanung statt. Ein weiteres zukünftiges Handlungsfeld ist, dass die techni-

schen Maßnahmen des Pro²Kar-Ansatzes nicht losgelöst vom Faktor Mensch betrachtet werden können. So werden sich Arbeitsinhalte in der Produktionsplanung durch die frühere Einflussnahme auf das Produkt und in der Karosserieentwicklung durch die Berücksichtigung der Anforderungen ändern. Hierfür sind beispielsweise neue Mitarbeiterqualifikationen erforderlich, die ein bereichsübergreifendes Denken fördern. Im Rahmen des Konzeptes Pro²Kar sollen daher sinnvolle Kombinationen von Maßnahmen für einen optimierten und erweiterten Produktentstehungsprozess ermittelt werden, die eine engere Zusammenarbeit zwischen der Karosserieentwicklung und der Produktionsplanung ermöglichen.

Literatur

[1] Heftrich, Frank: *Moderne F&E-Zusammenarbeiten in der Automobilindustrie – Organisation und Instrumente*. Siegen, 2001. (Zugl. Dissertation Universität Siegen)

[2] Eversheim, Walter; Schuh, Günther: *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – ISBN 3-540-21175-6

[3] Meichsner, Thomas: *Migrationskonzept für einen modell- und variantenflexiblen Automobilkarosseriebau*. Hannover, 2007. (Zugl. Dissertation Universität Hannover) – ISBN 978-3-939026-63-1

[4] Wemhöner, Niels: *Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau*. Aachen, 2005. (Zugl. Dissertation RWTH Aachen) – ISBN 3-8322-5111-1

[5] Stiegler, Gerhard: *Produktionsplanung und Produktionssysteme im Fahrzeugbau.* 1. Aufl. Wien: Manz-Verlag, 1999. – ISBN 3-7068-0597-9

[6] Freibichler, Wolfgang: *Competitive Manufacturing Intelligence*. Hohenheim, 2006. (Zugl. Dissertation Universität Hohenheim) – ISBN 978-3-8350-0522-5

[7] Brandt, Olaf: *Intelligente Produktion mit Methoden der Digitalen Fabrik*. In: CAD-CAM Report, Dressler Verlag, Heidelberg, Januar 2007

[8] Rudolf, Henning: *Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie*. München, 2006. (Zugl. Dissertation TU München) – ISBN 978-3-8316-0697-9

[9] Mantwill, Frank: *Wie kann die Produktentwicklung von der Digitalen Fabrik lernen?*. In: Tagungsband 4. Fachkongress Digitale Fabrik, Oktober 23-24, München, Germany, 2007

Anforderungen und Beispiele für durchgängiges Komplexitätsmanagement

Rupert Deger

PTC
Vice President Business Development Europe
Edisonstraße 8, D-85716 Unterschleißheim
Email: rdeger@ptc.com; Internet: http://www.ptc.com

Inhalt: *Im Gegensatz zur Komplexitätsreduzierung zielt das Komplexitätsmanagement auf die Beherrschung der Vielfalt in Angebotsspektrum und Produktbestandteilen. Durchgängiges Komplexitäts-management erfordert die bewußte Gestaltung von Produkten bzw. Produktarchitekturen für Produktlinien unter Einbeziehung externer Partner bereits ab den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses und unter nachhaltiger Aufmerksamkeit der Führungsspitze in Unternehmen, um die entsprechende Ausrichtung der Einzelentscheidungen in der Umsetzung zu gewährleisten.*

Abstract: *As opposed to complexity reduction, complexity management aims at the capability to cope with variety in product range and product elements. Integrated complexity management requires a conscious approach to the definition of products, product architectures, and product lines, involving external partners. To secure proper implementation, consistent top management attention is needed.*

Stichwörter: *Komplexität, Komplexitätskosten, Baukasten, Module, Prozesse, Releasemanagement, Konfigurationsmanagement.*

Keywords: *Complexity, costs of complextiy, modules, processes, release management, configuration management.*

1 Einleitung

Komplexitätsmanagement zählt aktuell zu den Top-Themen für Sicherung und Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit in Unternehmen mit diskreter Fertigung in Hochlohnländern. Dabei wäre eine sozusagen kostenfreie oder kostengünstige Bereitstellung von individualisierten Angeboten für die Kunden ein Idealziel [1], soweit mögliche Preisaufschläge für Differenzierung und Individualisierung nicht vollständig durchzusetzen sind.

„Durchgängiges“ Komplexitätsmanagement soll einen umfassenden Anspruch signalisieren: Worin besteht ein vollständiges Maßnahmenbündel entlang der

Prozeßketten, die im Unternehmen von den verschiedenen Funktionsbereichen betrieben werden und in der Versorgungskette insgesamt?

Ziel dieses Beitrags ist es, ein Schlaglicht auf Anforderungen und Beispiele für durchgängiges Komplexitätsmanagement zu werfen. Um dies auf Basis konkreter Unternehmenserfahrungen und –anforderungen zu erreichen, greift der Beitrag auf eine kürzlich durchgeführte Feldstudie mit dem Titel „Managing Complexity in Automotive Engineering“ zurück [2], weil hier Hersteller und Zulieferer in Kombination berücksichtigt wurden und ein breites Verständnis für Komplexitätsmanagement erarbeitet wurde; inwieweit Erkenntnisse aus diesem spezifischen Untersuchungsumfang verallgemeinerbar sind, bleibt abzuwarten, wie der Vergleich mit einem Beispiel aus dem Anlagenbau zeigt.

2 Zunahme der Komplexität in der Automobilindustrie

Bei der Entwicklung von Automobilen steigt die Gesamtkomplexität als Ergebnis rasch steigender Einzel-Komplexitäten. Zu den zahlreichen Treibern dieser Entwicklung zählen die steigende Zahl von Modellvarianten und –derivaten, deren ansteigende inhaltliche Funktionskomplexität, sowie die Vielfalt länderspezifischer Standards, denen die Automobilhersteller und ihre Lieferanten als Global Player Rechnung tragen müssen. Die resultierende, exponentiell ansteigende Gesamtkomplexität stellt eine große Herausforderung für die unternehmensinternen und unternehmens-übergreifenden Prozesse dar. Zusätzlich verursachen immer globalere Märkte und Wertschöpfungsketten hohe Anforderungen an die Beherrschung des verzahnten Arbeitens über verteilte Standorte mit den damit häufig verbundenen kulturellen Problemen.

Dadurch wird die aufwandsoptimale Komplexitätsbeherrschung zum wesentlichen Faktor für den Markt- und Unternehmenserfolg im Verbund zwischen OEMs und Zulieferunternehmen. Die Maximierung des jeweiligen Netto-Nutzens durch kostenoptimale Komplexitätsbeherrschung steht dabei als Grundhypothese im Vordergrund.

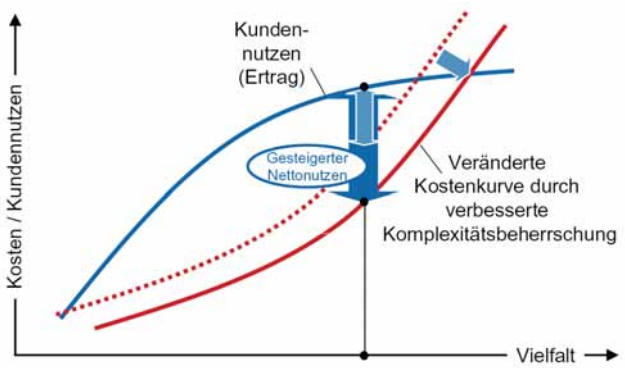


Bild 1: Bei unveränderten Kosten- und Nutzenkurven nimmt der Nettonutzen zunehmender Vielfalt für die Unternehmen ab. Die Kostenkurve kann beeinflusst werden durch verbesserte Komplexitätsbeherrschung

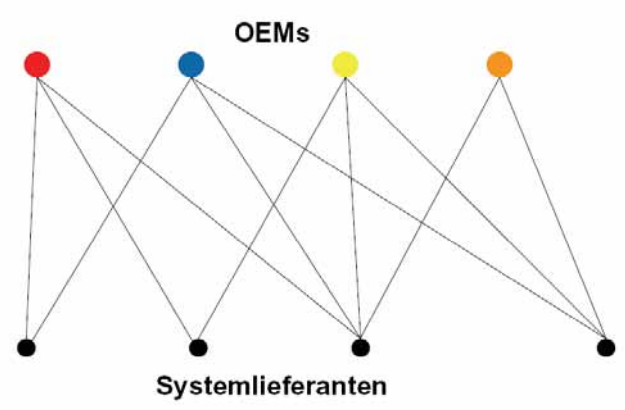


Bild 2: Basis der Unternehmensbefragung: Vier deutsche OEMs mit deren gängigen Mittelklassemodellen als repräsentative Vergleichsbasis und vier marktführende deutsche Zulieferer in den Bereichen Infotainment und Bremskomponenten, die die teilnehmenden OEMs in den betrachteten Fahrzeugfamlien beliefern

Für die Durchführung der zugrundeliegenden Studie wurde ein Ansatz gewählt, der in persönlichen Interviews mit Führungskräften, die im Umfeld des Komplexitätsmanagements wirken, qualitative Aussagen und detaillierte Hintergrundinformationen erfasste. Zu diesem Zweck wurden je Unternehmen mehrere Schlüsselpersonen befragt, um ein möglichst vollständiges Verständnis zu erlangen.

3 Erkenntnisse zum durchgängigen Komplexitätsmanagement

Die Komplexitätsbeherrschung kann in drei Leistungsdimensionen untergliedert werden, die sich in der Befragung als vorrangig erwiesen haben:

- Beherrschung der Produktprogrammkomplexität –„Vielfaltsbeherrschung“.
- Beherrschung der Funktionskomplexität – „Technologiebeherrschung“.
- Beherrschung der Wertschöpfungskette –„Prozeßbeherrschung“.

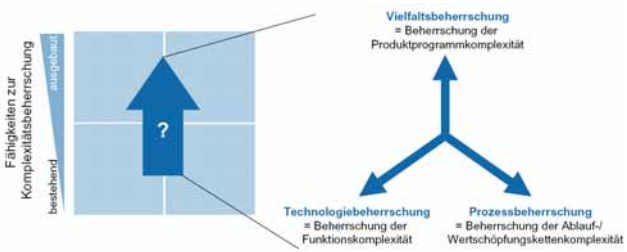


Bild 3: Drei Leistungsdimensionen erklären die Stellhebel zur Verbesserung der Komplexitätsbeherrschung

Obgleich Hersteller und Systemlieferanten in ihren jeweiligen Szenarien unterschiedlichen Herausforderungen gegenüberstehen, sind die Folgerungen und Empfehlungen für beide ähnlich.

3.1 Vielfaltsbeherrschung

Für die Beherrschung der Vielfalt scheint die Ausweitung des Baukasten-Prinzips unerlässlich – für den OEM können Baukästen die flexiblere Alternative zu dem als zu starr empfunden Plattform-Prinzip darstellen; für den Zulieferer ermöglichen Baukästen OEM-übergreifende Entwicklungen. Die aktive Verbesserung der Vielfaltsbeherrschung erfordert Maßnahmen hinsichtlich der Gestaltung von Baukästen und deren Umsetzungsprozess. Die Ausweitung des Baukastenprinzips auch über verschiedene Produktfamilien hinweg ist die wichtigste Maßnahme zur Steigerung der Baukastenqualität. Deren Umsetzung erfordert die Hilfe eines modernen und Konfigurations- und Moduldatenmanagements als Prozess- und IT-Unterstützung.

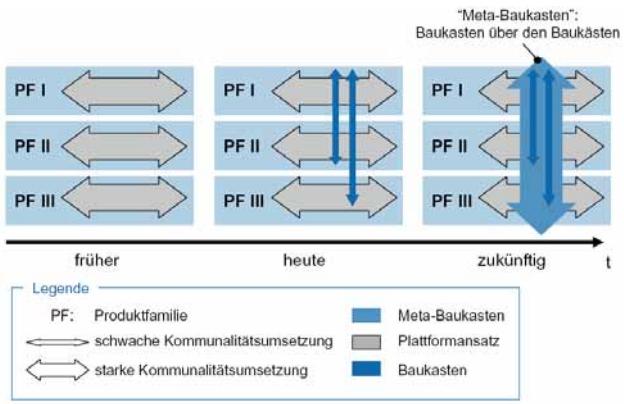


Bild 4: Zukünftig muss Kommunalität auch zwischen den Baukästen erschlossen werden ("Meta-Baukasten"), um modulbezogene Synergien zwischen den Produktfamilien erschließen zu können

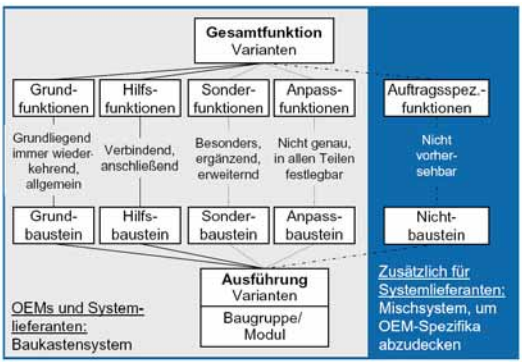


Bild 5: Die Umsetzung eines baureihenübergreifenen Baukastens erfordert die Hilfe eines modernen Konfigurations-und Moduldatenmanagements als Prozess-und IT-Unterstützung

Die Funktionen eines Baukastens werden unterteilt in Grundfunktionen, Hilfsfunktionen, sowie für den Kunden vorgedachte Sonderfunktionen und Anpassfunktionen. Die auftragsspezifischen Funktionen sind nicht im Konfigurationsraum vorgedacht, wobei es aber insbesondere für zahlreiche Zulieferer gilt, das Mischsystem erfolgreich zu beherrschen.

3.2 Technologiebeherrschung

Für die Verbesserung der Technologiebeherrschung wird die Einführung eines funktionsübergreifenden Release Engineering empfohlen, das die verschiedenen Disziplinen von Mechanik-, Elektronik- und Softwareentwicklung integriert. Zur Umsetzung der OEM-Integrationskompetenz muss eine „deduktive“ Entwicklung die „induktive“ Entwicklung ergänzen, die den Hersteller in die Lage versetzt, das Verhalten komplexer Gesamtsysteme in frühen Entwicklungsstadien sicher vorherzusagen.

Die Technologiebeherrschung im Rahmen von Baukästen erfolgt im Wechselspiel zwischen Produkt- und Modulplanung. Die Strukturierung und Koordinierung der verschiedenen Disziplinen im Sinne eines Release-Engineering ist die Grundlage für eine effektive Modulplanung und –umsetzung.

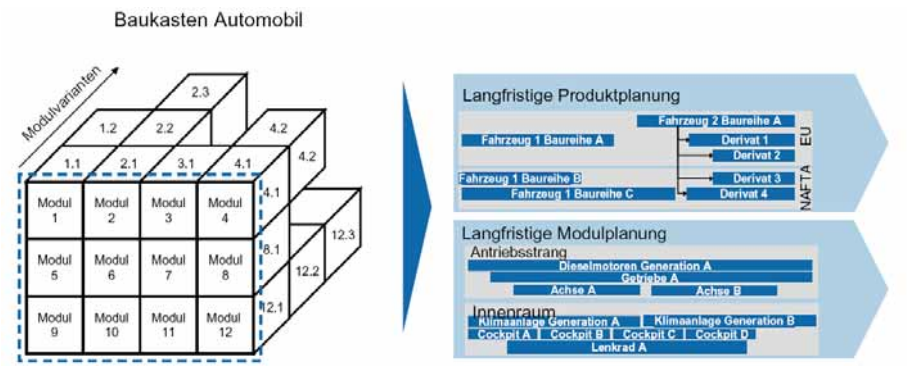


Bild 6: Die Technologiebeherrschung im Rahmen von Baukästen erfolgt im Wechselspiel zwischen Produkt- und Modulplanung

Es existieren verschiedene Wege zur Baukastenfüllung und Baukastengewichtung, die sich in der Ressourcenallokation für das „Frontloading“ unterscheiden. Zur Füllung eines Baukastens sind heterogene Anforderungen umzusetzen und Austauschbeziehungen zu entscheiden, z.B. Innovationspotenzial vs. erwartete Stückzahlen. Zur Umsetzung der OEM-Integrationskompetenz muss eine „deduktive“ Entwicklung die „induktive“ Entwicklung ergänzen.

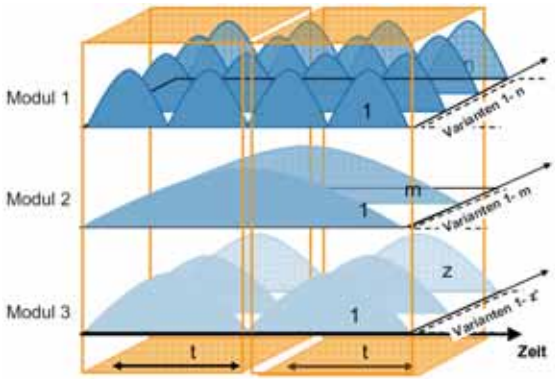


Bild 7: Die Baukastenumsetzung über Zeit erfordert die Vorausplanung und Prognose von Releasezyklen bei baureihenübergreifenden Modulen.

Im Rahmen der Studie konnten drei verschiedene Typen der Baukastenfüllung identifiziert werden: die baureihenorientierte Befüllung, die modulorientierte Befüllung, sowie die Befüllung über Lead-Baureihen.

Bei dem baureihenorientierten Typ formulieren die Baureihen die Anforderung an die Modulentwicklung. Bei der Modulentwicklung selbst liegt nur eine geringe Budgetverantwortung. Aus diesem Grund ist der Planungs- und Einflusshorizont bei diesem Typ der Baukastenfüllung sehr beschränkt.

Bei dem modulorientierten Typ der Baukastenfüllung ist die Modulentwicklung für die Füllung des „Regals“ verantwortlich und antizipiert den Bedarf der Module für die Baureihen. Die Budgetverantwortung liegt bei diesem Typ hauptsächlich bei der Modulentwicklung, da die Baureihe nur einen geringen Entwicklungsaufwand für die applikationsspezifische Entwicklung verantwortet.

Beim dritten Typ, dem Mittelweg über Leadbaureihen, erfolgt die „Erstausstattung“ des Baukastens über die Leadbaureihe. Die Leadbaureihe wird aus den maximalen Anforderungen über alle betroffenen Baureihe bestimmt, wobei die Ausprägungen der Leadbaureihe OEM-spezifisch sind. Die Leadbaureihe kann somit ein nicht reales Gesamtfahrzeug repräsentieren, das bezogen auf den Baukasten einen Mix heterogener Anforderungen darstellen kann.

Die Herausforderung für die Unternehmen besteht in der Integration der verschiedenen, heterogenen Anforderungen in einem Baukasten. Die Lösung eines

solchen Konflikts bieten so genannte Modulverträge, bei denen unter Abstimmung aller beteiligten Partner (Modulentwickler und Baureihenentwickler) eine verbindliche Regelung festgelegt wird, wo und wann die Module eingesetzt werden. Ein gelungenes Beispiel für diese Vorgehensweise ist der sogenannte modulare Längsbaukasten bei Audi [3].

Bild 8: In der Zukunft muss die induktive Vorgehensweise durch einen deduktiven Ansatz ergänzt werden, um den Anforderungen einer verstärkten Baukastenentwicklung zu begegnen.

Der Status quo in der Automobilindustrie zeigt einen starken Anteil einer induktiven Vorgehensweise in der Produktentwicklung. Unter einer induktiven Produktentwicklung ist die Vorgehensweise vom Einzelnen zum Ganzen zu verstehen. Die Entwicklung der einzelnen Produktbestandteile erfolgt nahezu unabhängig voneinander und berücksichtigt die Anforderungen an das Gesamtsystem nur unzureichend. Erst im späteren Verlauf der Entwicklung, bei der Zusammenführung der Einzelkomponenten zum Gesamtsystem, wird ein Abgleich mit den Anforderungen des Gesamtsystems gemacht. Mithilfe der induktiven Vorgehensweise können aber die Eigenschaften des Gesamtsystems nicht vollständig erfasst werden.

Aus diesem Grund muss zukünftig die induktive Vorgehensweise durch einen stärkeren deduktiven Ansatz ergänzt werden, um den Anforderungen einer zunehmenden Baukastenentwicklung zu begegnen. Die deduktive Vorgehensweise in der Entwicklung bildet die Basis für das Baukastenvorgehen. Das Konfigurationsmanagement und das

Schnittstellenmanagement gewinnen aufgrund der deduktiven Vorgehensweise, die für einen Systemintegrator im Sinne eines Baukastens notwendig ist, an Bedeutung.

3.3 Prozessbeherrschung

Um die zugehörigen Prozesse zukunftssicher zu machen, sollten sich die Hersteller die bereits gut ausgebildete Systemkompetenz ihrer Zulieferer zu nutze machen, aber auch kritische Kompetenzen wieder aufbauen, wo sie im Zuge der Auslagerung an die Lieferanten verloren gegangen sind.

Grundvoraussetzung für die Prozessbeherrschung in der Wertschöpfungskette ist für die OEMs ein hinreichendes Know-how im Sinne einer Lastenheftfähigkeit für die betrachteten Systeme. Ansonsten droht der Verlust der eigenen Bewertungskompetenz, bzw. die Lösungen von Sachaufgaben werden vom Wechselspiel zwischen Einkäufer- und Verkäuferdominanz bestimmt.

Ein weiterer, großer, Schritt in Richtung verbesserter Prozessbeherrschung besteht in der Vernetzung der Abläufe zwischen den Entwicklungsdisziplinen Mechanik, Elektrik & Elektronik sowie Software.

Zusätzlich ist die intelligente Definition von Schnittstellen ein effektiver Hebel zur Abfederung der Anforderungsdynamik in der Produktarchitektur.

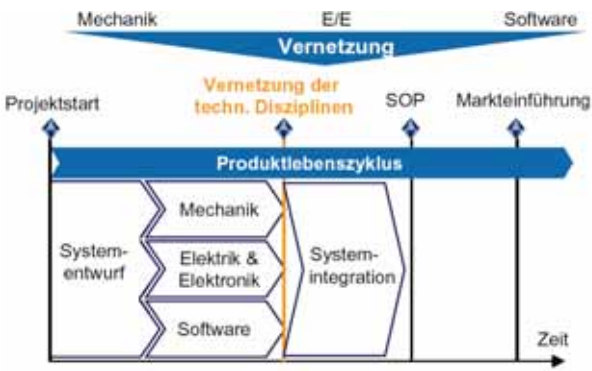


Bild 9: Für OEMs besteht die Notwendigkeit, ein intelligentes Schnittstellenmanagement aufzubauen, das die Basis zur Beherrschung der Systemintegration bietet

Schließlich gelingt die Prozessbeherrschung nur, wenn die in den Abläufen transportierten Inhalte der Produktentwicklung durch ein modernes Modul- und

Konfigurationsdatenmanagement nachvollziehbar und transparent gehalten werden. Dadurch wird es sämtlichen Beteiligten ermöglicht, je nach Kommunalitätsniveau relevante Baugruppen und Teile bzw. Technologien und Eigenschaften zu identifizieren und in ihrem jeweiligen Reifegrad sowie in der gewünschten Konfigurationslogik erkennbar einzustellen. Dies erlaubt zusätzlich eine verbesserte Änderbarkeit, da technische Abhängigkeiten und organisatorische Zusammenhänge zwischen Entwicklungsdisziplinen bzw. OEMs und Zulieferern entlang der Wertschöpfungskette unmittelbar nachvollzogen werden können.

4 Komplexitätsbeherrschung durch Automated Design to Cost im Anlagenbau

Die Optimierung des auftragsbezogenen Konstruktionsprozesses im Liebherr-Werk Nenzing stellt ein Beispiel für eine hochmoderne Methode zur Komplexitätsbeherrschung im Anlagenbau dar, ermöglicht durch konsequente Automatisierung repetitiver Konstruktionsaufgaben [3]. Das Liebherr-Werk Nenzing entwickelt und produziert Schiffs-, Hafenmobil- und Bohrinselkräne sowie Hydro-Seilbagger und Raupenkräne. Besonders bei maritimen Kränen entfällt ein bedeutender Anteil der Entwicklungsleistung auf die zeitintensive Konstruktion komplizierter, kundenindividueller Aufstiege und Begehungen (Podeste, Treppen, Leitern, etc.). Zur Reduzierung des Engineering-Aufwands entwickelte Liebherr in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum V-Research Dornbirn eine innovative Lösung zur automatischen Detailkonstruktion auf Basis von Pro/ENGINEER von PTC gekoppelt mit der Kostenbewertung und -optimierung der so erstellten Konstruktionsalternativen.

Diese Lösung unterstützt benutzerorientiert die kreativen Tätigkeiten bei der Konzeption einer Begehung und automatisiert auf dieser Basis repetitive Konstruktions- und Berechnungstätigkeiten. Durch die Hinterlegung eines dynamischen und allgemeinen formulierten Regelwerks sowie aufwändiger Optimierungsalgorithmen wird sichergestellt, dass auf Basis der kreativen Eingaben der Entwickler ein optimaler Prozess für die konstruktive Ausgestaltung der Begehungen durchlaufen wird. Zur Entwicklung dieser Lösung wurden auf Basis der Abbildung des Expertenwissens der Chefkonstrukteure die notwendigen Tätigkeiten zur Erstellung einer vollständigen Baugruppenkonstruktion erfasst. Ein großer Teil der Tätigkeiten befasste sich mit der Einhaltung landesspezifischer

Normen und Vorgaben der Statik, der Berücksichtigung der Machbarkeit und der resultierenden Kosten einer nachfolgenden Fertigung.

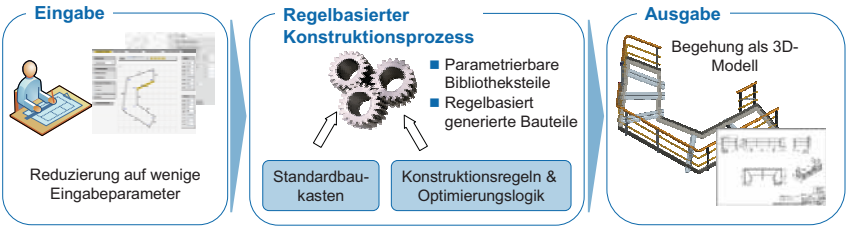


Bild 10: Automated Design-to-Cost Ansatz bei Liebherr

Dieser Teil der Aufgaben wurde bei der Optimierung des Konstruktionsprozesses mit dem Ziel angegangen, den Konstrukteur zukünftig bei seinen wertschöpfenden Tätigkeiten, insbesondere der kundenindividuellen Anpassung, zu entlasten. Der neue Konstruktionsprozess reduziert die Variationsmöglichkeiten des Konstrukteurs auf wenige, aber sinnvolle und erforderliche Eingabe-Parameter. Die übrigen Parameter zur Generierung und Optimierung der Baugruppen finden anschließend über einen regelbasierten Konstruktionsprozess statt.

Das hinterlegte kombinatorische Optimierungsmodell wird mittels einer analytischen Kalkulationsmethode auf Basis der Mengengerüste (Stücklisten und Arbeitspläne) bewertet. Der Algorithmus zur Generierung der Baugruppen greift dabei auf einen Baukasten mit Standardbauteilen wie zum Beispiel Steher, Kragarme oder Profile zurück, die in zwei Klassen unterteilt werden: Bibliotheksteile mit einem oder mehreren veränderbaren Parameter(n) sowie nach Regeln zu generierende Bauteile mit definiertem Rohmaterial. Die funktionalen bzw. konstruktiven Anforderungen einer Baugruppe sind bei einem Podest beispielsweise spezielle Befestigungslogiken unter Berücksichtung der Flächenlasten mittels Kragarmen oder normgerechten Zustiegsmöglichkeiten.

In Fällen aufwändiger Offshore-Krane erforderte die vollständige Auslegung und Ausgestaltung von Aufstieg und Begehungen Konstruktionszeiten von bis zu 150 Konstruktionsstunden. Diese Begehungen lassen sich nun in einem Bruchteil des Zeitaufwandes dokumentieren.

5 Fazit

In der Automobilindustrie wird das Komplexitätsmanagement zu einem zentralen Erfolgsfaktor. Handlungsbedarf ist gegeben: Während mit zunehmender Modellvielfalt der zusätzliche Nutzen der einzelnen Variante abnimmt, steigen die Gesamtkosten stetig an.

Die Effizienz dieser Maßnahmen kann durch die Nutzung einer IT-gestützen Lösung für das Konfigurations- und Moduldatenmanagement, Releasemanagement und Collaboration sinnvoll unterstützt und abgesichert, sowie anhand der Leistungsdimensionen Vielfalts-, Technologie- und Prozessbeherrschung gemessen werden.

Die branchenübergreifende Übertragbarkeit dieser Leistungsdimensionen hängt vom Geschäftstyp ab. Der Anlagenbau mit seinem hohen Anteil an Engineer-to-Order, d.h. auftragsspezifischen Konstruktionstätigkeiten, benötigt insbesondere auch die verstärkte Automatisierung von Konstruktions- und Bewertungsprozessen, um Ingenieurs-ressourcenschonend wachsen zu können.

Literatur

[1] Brecher, C.; Hirt, G.; Klocke, F.; Schapp, L.; Schmitt, R.; Schuh, G.; Schulz, W.: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer; in: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven.* Aachen: Apprimus Verlag, 2008. – ISBN 978-3-940565-04-4, S. 15ff.

[2] Schuh, G.; Deger, R.; Jung, M.; Meier, J.; Lenders, M.: *Managing Complexity in Automotive Engineering.* Studie des Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen und Parametric Technology Corporation (PTC), 2008; Whitepaper, s. www.ptc.com

[3] Adickes, J.; Arnoscht, J.; Bong, A.; Deger, R.; Hieber, S.; Krappinger, R.; Lenders, M; Post, P.; Rauhut, M.; Rother, M; Schelling, J.; Schuh, G.; Schulz, J.: *Lean Innovation – auf dem Weg zur Systematik; in: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven.* Aachen: Apprimus Verlag, 2008. – ISBN 978-3-940565-04-4, S. 473ff.

Konstruktionsmethodik – und was man für den Entwurf von PLM-Lösungen daraus lernen kann

Michael Vielhaber, Michael Bitzer*, Martin Eigner*

Daimler AG - Group Research
Wilhelm-Runge-Str. 11, D-89081 Ulm
Email: michael.vielhaber@daimler.com
Internet: http://www.daimler.com

*Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung, TU Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Str./Geb.44, D-67663 Kaiserslautern
Email: bitzer@mv.uni-kl.de
Internet: http://vpe.mv.uni-kl.de

Inhalt: *Product Lifecycle Management (PLM) wird als ein Schlüssel zu einem effizienten Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie gesehen. Einführungsprozesse von PLM-Lösungen zeigen in Durchführung und Ergebnissen jedoch oft erhebliche Schwächen. Dieser Beitrag untersucht, welche Rückschlüsse für PLM-Projekte aus einem Vergleich mit Produktentwicklungsmethodiken gezogen werden können.*

Abstract: *PLM is regarded as a key to an efficient product creation process in the automotive industry. PLM implementation processes however often fail in both execution and results. This paper draws conclusions from analogies to product design methodology for more successful PLM projects.*

Stichwörter: *PLM-Entwurf, Produktentwicklungs-/Konstruktionsmethodik*

Keywords: *PLM layout, product design methodology*

1 Einleitung

Product Lifecycle Management (PLM) wird als ein Schlüssel zu einem effizienten Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie gesehen. Allerdings wird die Bedeutung der zu unterstützenden Prozesse bei der Einführung von PLM-Lösungen oft vernachlässigt [1]. Eine Einführung erfolgt vielmehr auf der Basis von Software- oder IT-Architektur-Überlegungen. Ergebnis sind vielfach schwache, ineffektive oder gar scheiternde Prozessmodelle für den Entwurf von PLM-Lösungen.

Dieser Beitrag sucht nach Wegen, diese prozessualen Schwachpunkte zu umgehen. Aus der Analyse existierender Prozessmodelle anderer Entwicklungsdomänen –

insbesondere der Produktentwicklung – werden Rückschlüsse gezogen für den Entwurf von PLM-Lösungen. Die Ergebnisse werden abgeglichen mit Erfahrungen aus PLM-Projekten in der Automobilindustrie. Dieser Abgleich lässt Rückschlüsse zu, die vergangene Misserfolge erklären und zum besseren Erfolg zukünftiger Projekte beitragen können.

2 PLM in der Automobilindustrie

Über die vergangenen Jahre haben sich PDM-Systeme zu Kernsystemen der automobilen Produktentstehung entwickelt. Sie sind umgeben von einer heterogenen IT-Landschaft aus Systemen, die jeweils einzelne Prozessabschnitte unterstützen. Weiterentwicklungen werden mehr getrieben durch die IT-Systeme als durch Anforderungen aus einem übergreifenden Prozessverständnis. Organisationsstrukturen sind oft angelehnt an die Systemlandschaft, was die Zerstückelung der Prozesslandschaft weiter zementiert.

Anforderungen – selbst wenn es sich um eigentlich lösungsneutrale Prozessanforderungen handelt – werden direkt an ein als zuständig betrachtetes System gerichtet. Der Grund ist, dass es oft einfacher ist, eine komplexe Systemanforderung umzusetzen als einen lange bestehenden Prozess zu ändern. Insgesamt erreichen dadurch viele PLM-Lösungen ihre Komplexitätsgrenze, was durch die weiter steigenden Anforderungen der zu unterstützenden Anwendungssysteme und ihrer Daten noch beschleunigt wird.

Das Denken in Systemgrenzen beeinflusst auch die Weiterentwicklungsstrategien für PLM. Unternehmen übernehmen Konzepte daher oft direkt von einem PDM-Systemhersteller, ohne das eigentliche Ziel – die optimale Prozessunterstützung – in den Mittelpunkt zu rücken. Kommen mehrere Systemhersteller ins Spiel, verschärfen sich die resultierenden Konflikte entsprechend. PLM-Konzepte haben heute eine Komplexität, die ihr Verständnis nur noch wenigen Experten erlaubt. Eine Reduktion auf eine allgemeinverständliche Ebene fällt schwer. IT-Strategien laufen entsprechend Gefahr, den Marketing-Versprechungen zu folgen. So werden „Service Oriented Architectures“ (SOA) von PLM-Unternehmen oft strapaziert, um die Aktualität ihrer Produkte zu suggerieren und eine neue Einfachheit von PLM-Gesamtlösungen vorzutäuschen. Was genau hinter diesem Buzzword steht, rückt in den Hintergrund.

Eine integrierte PLM-Strategie verbunden mit effektiveren Ansätzen für den Entwurf von PLM-Lösungen ist daher erforderlich. Dieser Beitrag versucht, derartige Ansätze aus Analogien zur Produktentwicklung mit ihrer etablierten Konstruktionsmethodik abzuleiten.

3 Vergleich mit der Produktentwicklung

Im Bereich der Produktentwicklung existieren Prozessmodelle und Methodiken, die ihre Tauglichkeit seit langem zumindest zum Teil auch in der Praxis bewiesen haben, siehe Kap. 3.1. Eine Vielzahl von Konstruktionsmethoden unterstützen diese Gesamtmethodiken. Dabei kann festgestellt werden, dass die Erfolgsquoten von Produktentwicklungsprojekte deutlich höher sind als die von IT- und insbesondere auch PLM-Projekten. Kapitel 3.2 wird untersuchen, inwieweit Analogien zwischen beiden Bereichen bestehen.

3.1 Methodiken der Produktentwicklung und -konstruktion

Stellvertretend für die Vielzahl der existierenden Konstruktionsmethodiken soll im Folgenden kurz auf die Prozessmodelle der VDI-Richtlinie 2221 und des Systems Engineering und ihren jeweiligen Bezug zur PLM-Entwicklung eingegangen werden.

Konstruktionsmethodik nach VDI 2221

Die VDI-Richtlinie 2221 [2] schlägt ein Vorgehensmodell vor für die Konstruktion mechanischer Produkte, siehe Bild 1. Sie bietet eine Zusammenführung einer Vielzahl anderer Methodiken (z.B. [3, 4]). Ausgehend von einer grundlegenden Phase der Anforderungsspezifikation fokussieren Folgeschritte auf die Ableitung und Bewertung eines umfassenden Portfolios an Lösungsalternativen für zuvor lösungsneutral definierte Produktfunktionen. Ziel ist es, so eine im Hinblick auf die Anforderungserfüllung bestmögliche Lösungskombination in ein Gesamtprodukt und seine Einzelteile zu überführen. Erste Ansätze existieren, entsprechende Problemlösungsverfahren auch im PLM-Umfeld nutzbar zu machen [5].

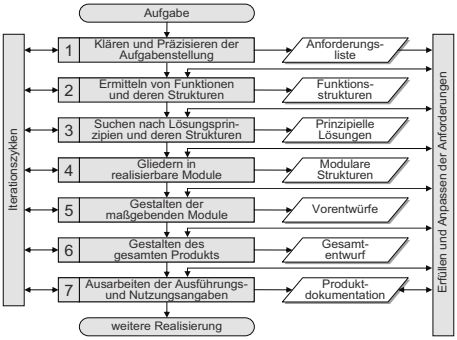


Bild 1: Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 [2]

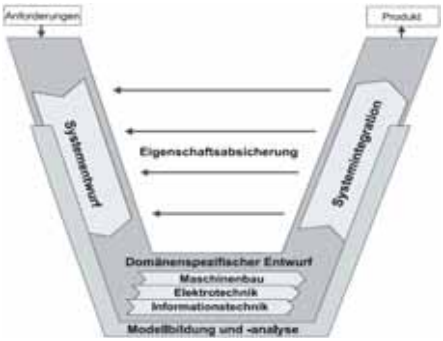


Bild 2: Systementwicklung nach VDI 2206 [6]

Systems Engineering

Systems Engineering als ein weiterer Ansatz zur methodischen Produktentwicklung adressiert insbesondere domänenübergreifende Produkte und Systeme. Die Grundideen dieses Ansatzes haben daher auch Eingang gefunden in die VDI-Richtlinie 2206 zur mechatronischen Produktentwicklung [6]. Anforderungsmanagement ist ein wesentlicher Bestandteil auch dieser Methodik. Aus den Anforderungen werden Komponenten über eine Phase der Systemgestaltung (linker Teil des V-Modells, siehe Bild 2), eine domänenspezifische Phase (Basis des V's) und eine Phase der Systemintegration (rechter Teil des V's).

3.2 Produkt/PLM-Analogien

In den folgenden Abschnitten werden Analogien zwischen der Produktentwicklung und dem Entwurf von PLM-Lösungen gezogen.

Anforderungsmanagement

Beide dargestellten Produktentwicklungsmethoden betonen die Bedeutung des initialen und entwicklungsbegleitenden Anforderungsmanagements. Anforderungen sind der Input des Kunden in den Produktentwicklungsprozess. Produktqualität wird entsprechend definiert als die Erfüllung von Kundenanforderungen [7].

PLM-Projekte hingegen folgen anderen Regeln. Der Definition von Anforderungen wird oft weniger Bedeutung beigemessen. Ein Grund mag das Fehlen eines realen externen Kunden sein: Der abstrakte PLM-Kunde ist der zu unterstützende Prozess,

konkreter der interne Prozesseigner, sofern dieser existiert. In der Konsequenz werden PLM-Anforderungen oft von IT-Verantwortlichen formuliert, basierend auf einem hypothetischen Sollprozess aus Sicht des PLM-Implementierungsteams. Das Qualitätsverständnis im PLM-bereich ist ebenfalls unscharf. In der Regel misst sich „PLM-Qualität“ in Zahlen wie Nutzeranzahl, Antwortzeiten oder Supportstatistiken, von denen keine ein Maß für die eigentliche Prozessunterstützung ist. Kapitel 4.1 wird hierauf aufbauend Rückschlüsse ziehen zur Kundenorientierung und zum Anforderungsmanagement im PLM-Umfeld.

Funktionsentwicklung

Funktionsorientiertes Entwickeln is ein Schwerpunkt der VDI-Richtlinie 2221. Ziel ist die Ableitung lösungsneutraler Funktionsprinzipien, die die Summe der Anforderungen bestmöglich erfüllen. In einem ersten Unterschritt wird dafür die Konstruktionsaufgabe in entsprechende zu erfüllende Teilfunktionen unterteilt. In einem zweiten Schritt werden alternative Lösungskonzepte für diese Teilfunktionen entwickelt und bewertet. Schließlich wird der Funktionsentwurf materialisiert zu Modul- und Geometriestrukturen.

Im PLM-Umfeld fällt insbesondere die mangelnde Berücksichtigung von Lösungsalternativen auf. An die Stelle des lösungsneutralen funktionalen Denkens treten bereits in frühesten Phasen vorausgewählte Systeme und Lösungskonzepte, basierend auf vom Systemhersteller vorgegebenen Prozess- und Datenmodellen. Systemlösungen sind so Startpunkt und nicht Ergebnis des PLM-Entwicklungsprozesses; dieser besteht dann in der nachträglichen Annäherung der Systeme an die Anforderungen über Kundenanpassungen der Software oder Prozessanpassungen an Standardprozesse der Softwarehersteller. Diese mögen an sich gute Einzelprozesse darstellen, abgebildet auf die Randbedingungen der realen PLM-Umgebung jedoch zu erheblichen Anpassungsproblemen führen.

Neuere Trends wie SOA propagieren ein modulares Denken über Systemgrenzen hinweg und können damit als Schritt in Richtung eines funktionsorientierten PLM-Entwurfs angesehen werden. Mit der PLM-Matrix wird in Kapitel 4.2 eine weitere Methode vorgeschlagen, die funktionsorientiertes Denken als Basis für PLM-Entscheidungen einsetzt. Sie beinhaltet Aspekte von verbreiteten und allgemein akzeptierten Produktentwicklungsmethoden wie Quality Function Deployment (QFD) oder dem Morphologischen Kasten.

„Top-down“- versus „bottom-up“-Entwicklung

Produktentwicklungsmethodik basiert - zumindest in den theoretischen Modellen - auf einer „top-down“-Denkweise; sie starten also mit Konzepten auf Gesamtproduktebene, die dann Zug um Zug detailliert werden zu letztlich physikalischen Komponenten. Ziel ist dabei das Erreichen eines Gesamtoptimums auf Produktebene anstelle einer suboptimalen Integration verschiedener lokaler Optima auf Komponentenebene.

Bild 3 zeigt eine entsprechende Adaptierung des V-Modells auf die PLM-Domäne. Real findet sich im PLM-Bereich jedoch oft ein „bottom-up“-Vorgehen, indem einzelne Anwendungssysteme (z.B. CAD, CAE) auf die optimale Unterstützung ihrer spezifischen Aufgaben fokussieren, dabei aber Integrationsaspekte in eine PLM-Gesamtwelt vernachlässigen. In Bezug auf das V-Modell erfolgt dann also ein Sprung aus der Anforderungsphase direkt zu den Lösungskomponenten, ohne Gesamt-Architekturkonzepte zu berücksichtigen. Auch in der Testphase werden letztlich einzelne Funktionen überprüft, nicht jedoch die ursprünglich intendierte Erfüllung der Gesamtlösung. SOA wird oft missverstanden in dem Sinne, dass es ein solches (aus Sicht der Einzelanwender oft einfacheres) Vorgehen unterstützt über den Ansatz der Modularisierung und Austauschbarkeit von unabhängigen Lösungskomponenten.

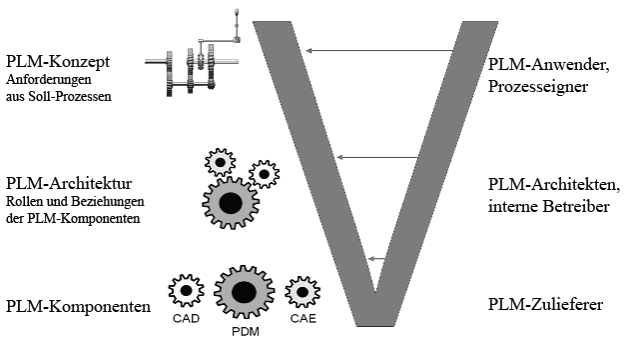


Bild 3: Adaption des V-Modells auf PLM (ähnlich [8])

Kapitel 4.3 und 4.4 ziehen Schlussfolgerungen, wie eine integrierte, ganzheitliche PLM-Entwicklung auf Basis dieser Analogie erfolgen sollte.

Outsourcing-Aspekte

PLM wird seitens des Managements oft als reines IT-Thema und damit als gut "outsource-bar" angesehen. Wie bei physischen Zulieferkomponenten ist hierfür ein hohes Ver- und Zutrauen den Zulieferern gegenüber erforderlich, sowohl Entwicklungs- als auch Umsetzungsarbeit zeit- und qualitätsgerecht darstellen zu können. Erfahrungen aus PLM-Projekten zeigen jedoch, dass es hier oft zu einem Missverhältnis zwischen Anforderungen und Lösungsumsetzung kommt [9]. Ein Grund mag in der unscharfen oder unvollständigen Formulierung der Anforderungen liegen – eine typische PLM-Anforderung wäre etwa „30% kürzere Entwicklungszeiten". Derartige Anforderungen liegen auf den höheren Ebenen des V-Modells nach Bild 3, während sich die zuliefererseitige Umsetzung auf den unteren Ebenen bewegt. In der Produktentwicklung sind dagegen in der Regel sehr detaillierte Anforderungen insbesondere auf der Komponentenebene vorhanden, so dass eine Lösungsüberprüfung sehr viel exakter möglich ist.

Ein weiterer Aspekt, der durch die PLM-Zulieferer beeinflusst wird, findet in der Produktentwicklungsdomäne seine Entsprechung im so genannten „Technology Push". PLM-Entwicklung basiert auf ständig neuen Ideen und ständiger Weiterentwicklung von Konzepten und Technologien. Das Bestreben ist dabei groß, stets auf die neuesten Pferde zu setzen, unabhängig davon, ob diese für eine Anforderungserfüllung exakt erforderlich wären. Die Umsetzungs- und Integrationsreife derartiger Lösungen ist dann oft sehr niedrig, so dass Erst-Anwender schnell in eine Rolle von Erst-Testern verfallen. Ein derartiges „Marketing Setup" wäre in der Produktentwicklungsdomäne nicht vorstellbar; hier basiert die Nutzung neuer Komponenten auf klaren Reifevorgaben auf sowohl Komponenten- als auch Systemebene. Eine Übertragung auf die PLM-Domäne schlägt Kapitel 4.5 vor.

4 Schlussfolgerungen für die Entwicklung von PLM-Lösungen

Aus den beschriebenen Analogien zur Produktentwicklung lassen sich Schlussfolgerungen ziehen für die Entwicklung von PLM-Lösungen. Dieser Beitrag wird auf fünf Aspekte detaillierter eingehen, die auch deutliche Überdeckungen mit entsprechenden Schwachstellenanalysen in PLM-Projekten (z.B. [9]) zeigen: Produktentstehungsprozess als der Kunde von PLM (Kapitel 4.1), funktionsorientierte PLM-Einführung (Kapitel 4.2), klare Verantwortung, Zuständigkeiten und Finanzierung

(Kapitel 4.3), effektives Projektmanagement (Kapitel 4.4) und reifegradbezogene Systemauswahl (Kapitel 4.5).

4.1 Produktentstehungsprozess als der Kunde von PLM

Der durch PLM zu unterstützende Prozess ist im Rahmen der Analogie zu betrachten wie der Endkunde, für den ein spezielles Produkt entwickelt wird – Kundenbedürfnisse sind der Ausgangspunkt für die Ermittlung und Definition von Produktanforderungen. Diese Anforderungen sind wiederum die Eingangsgröße für die eigentliche Produktentwicklung. Daher sollten von dem zu unterstützende Soll-Prozess die Anforderungen an eine zukünftige PLM-Lösung abgeleitet werden. Ansätze, den Prozess als Kunden im Rahmen von PLM anzusehen, gibt es bereits heute in den untersuchten Unternehmen – jedoch bedarf es hier einer stärkeren Berücksichtigung dieses Paradigmas und entsprechender Methoden und Konzepte.

Die Herangehensweise, den Prozess als Kunden zu berücksichtigen, impliziert eine Wahrnehmung der abgeleiteten Anforderungen als entscheidenden Faktor für den Erfolg von PLM. Diese Anforderungen müssen in Unternehmenszielgrößen einfließen, welche zu Workflows und Informationsobjekten herunter gebrochen werden müssen. Diese Informationsobjekte werden im Rahmen von Informationsmodellen innerhalb einer Informationsarchitektur verwaltet und gesteuert. Diese Informationsarchitektur wird genutzt, um die Prozessanforderungen in technische Anforderungen zu überführen. Dieser Vorgang muss auf allen Ebenen der Architektur durchgeführt werden.

4.2 Funktionsorientierte PLM-Einführung

Neben der Prozessorientierung spielt die Funktionsorientierung bei der Einführung von PLM eine entscheidende Rolle. Mit der im Ansatz zur Prozessorientierten Ermittlung von PLM Architekturen (PPA) vorgestellten PLM-Matrix [10] wird ein pragmatischer Ansatz zur Verknüpfung von Prozessaspekten und PLM-Funktionen aufgezeigt, siehe Bild 4.

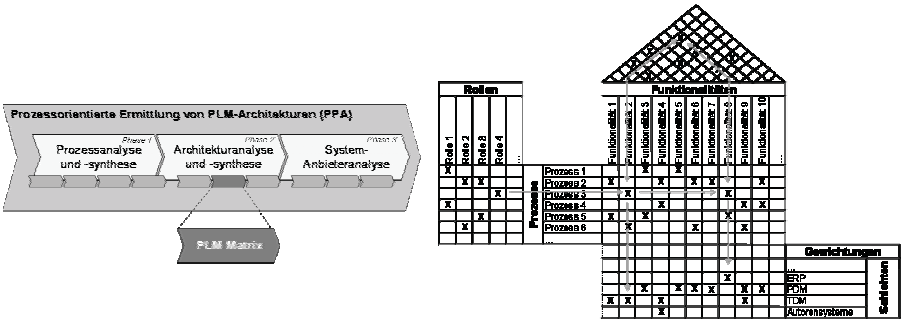


Bild 4: PLM-Matrix als Basis für PLM-Architektur-Entscheidungen [10]

In Anlehnung an die im vorherigen Absatz beschriebene Vorgehensweise werden dabei die Prozesse des Unternehmens als Ausgangspunkt gesehen und daraus Anforderungen bestimmt und relevante Funktionen definiert. Abschließend werden aus den zuvor erarbeiteten Informationen mögliche PLM-Architekturen ermittelt. Die PLM-Matrix unterstützt dieses Vorgehen auf eine praxisorientierte Weise.

4.3 Verantwortung, Zuständigkeiten und Finanzierung

PLM-Entwicklungsprojekte sind in vielen Fällen stark von der Art und Weise beeinflusst, wie die Zuständigkeiten und Finanzierung dieser Projekte innerhalb des Unternehmens organisiert sind. In vielen Fällen werden Entscheidungen für ein externes Softwareprodukt durch das Management getätigt und finanziert, ohne die technische Relevanz der durch den Softwareanbieter getätigten Versprechungen ausreichend zu prüfen. Die IT-Abteilung sieht sich im Anschluss der Herausforderung ausgesetzt, die eingekaufte Software im Unternehmen zu implementieren. Übertragen auf die Analogie zur Produktentwicklung bedeutet dies eine Art Monopolstellung. Der Kunde in Form der IT-Abteilung bzw. des Anwenders kann keine eigene Entscheidung bezüglich der Software treffen, dies wäre in der Praxis nicht handhabbar. Allerdings müssen bei ihm existierende Architekturkomponenten in Lösungskonzepten mit berücksichtigt werden. Übertragen auf die Produktentwicklung findet dies Entsprechung in Ansätzen wie der Plattformstrategie, in der Individualität und Vereinheitlichung kombiniert werden. Das hier angesprochene und geforderte Governance-Modell muss sowohl Prozess- als auch IT-seitig ausreichende

Entscheidungsfreiheit und -gewalt einräumen, abgestimmte Entscheidungen treffen zu können.

4.4 Effektives Projektmanagement

Neben dieser Forderung einer klaren prozessorientierten Zuständigkeit für PLM-Aktivitäten besteht die Notwendigkeit, dass ein unternehmensinterner Zulieferer im Umfeld von PLM auf definierte Methoden und Ansätze zurückgreifen kann, um die ermittelten Anforderungen im geforderten Kosten- und Zeitrahmen erfüllen zu können. Die Literatur bietet eine Vielzahl entsprechender Ansätzen. Im Rahmen der beschriebenen Analogie können Projektmanagementmethoden aus dem Produktentwicklungsumfeld genutzt werden, die bereits in den untersuchten Unternehmen bekannt sind und auf das Anwendungsgebiet für PLM-Lösungen übertragen werden können.

4.5 Reifegradbezogene Systemauswahl

Die Automobilentwicklung verläuft entsprechend definierter Regeln bezüglich des Technologiereifegrades von den eingesetzten Komponenten. In einem neuen Fahrzeugprojekt werden in der Regel nur Bauteile und Komponenten verwendet, die einen serienproduktionsreifen Reifegrad haben. Dieser Ansatz erscheint in vielen PLM-Projekten nicht bekannt oder nicht gelebt. Einige PLM-Projekte scheinen zu wesentlichen Teilen auf Aussagen und Ankündigungen von Systemherstellern zu basieren, die nur wenig mit dem tatsächlichen Reifegrad der Software zu tun haben. Daher erscheint die Übertragung des Technologiereifegrad-Gedankens auf PLM als ein interessanter Ansatz. Der Technologiereifegradansatz kann z.B. auf Basis des „Technology Readiness Level“- (TRL-) Konzeptes [11] erfolgen. Übertragen auf PLM wären entsprechende Reifegradstufen:

- PLM-TRL 1-3: Lösung ist in der Ideenphase und wurde auf dem Papier validiert.
- PLM-TRL 4-6: Technologie hat in Pilotanwendungen Prinztauglichkeit bewiesen
- PLM-TRL 7-9: Referenzszenarien existieren für entsprechende Umgebungen in ausreichender Zahl mit entsprechenden Prozessen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betrachtung der Analogie zur Konstruktionsmethodik liefert interessante und vielversprechende Ansatzpunkte für den Entwurf von PLM-Lösungen. Insbesondere die aus

der Produktentwicklung bekannte Fokussierung auf Anforderungen und Funktionen kann auch in der PLM-Domäne Mehrwert liefern, und organisatorische Aspekte können ebenso sinnvoll übertragen werden. Auch wenn diese Erkenntnisse hier zunächst aus theoretischen Analogien abgeleitet wurden, finden sie Unterstützung in Ergebnissen entsprechender empirischer Untersuchungen in der Automobilindustrie.

Neben den in diesem Beitrag beschriebenen Analogien können noch weitere Vergleiche gezogen werden. Als ein Beispiel sei die Dokumentation von Projektergebnissen genannt; während dies in Produktentwicklungsprojekten ein ganz wesentlicher Bestandteil des Projektergebnisses ist, gehen PLM-Dokumentationen oft über Konzeptpräsentationen und den finalen Software-Code nicht hinaus. Zukünftige Arbeiten sollten einerseits die weitere Untersuchung entsprechender Analogien adressieren, andererseits aber die konkreten Nutzbarmachung der Ergebnisse in Form von PLM-Einführungswerkzeugen, wie dies schon am Beispiel der PLM-Matrix dargestellt wurde.

Literatur

[1] Bitzer, M.; Eigner, M.; Vielhaber, M.: *Impacts of Design Process Characteristics on the Selection of PLM Architectures*. In: Konferenzeinzelbericht DESIGN 2008, Dubrovnik, S. 901-910

[2] VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI, 1993

[3] Pahl, G.,; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre.* 7. Aufl., Berlin: Springer, 2007

[4] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. 3. Aufl., München: Hanser, 2006

[5] Stockinger, S.: *Konzept zur Optimierung des PDM-Einsatzes in der Automobilindustrie*. Dissertation, RWTH Aachen, 2008

[6] VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf: VDI, 2004

[7] DIN EN ISO 9000: *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth, 2005

[8] Ćatić, A.: *ohne Titel*. Interne Darstellung, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2008

[9] Zimmerman, T., Malmqvist, J., Ćatić, A.*: Implementing PLM in Practice*. Eingereicht zu Journal of Research in Engineering Design, 2008

[10] Bitzer, M., Eigner, M., Müller, E., Vielhaber, M.: *Determination of PLM Architectures in Automotive Industry*. Eingereicht zur NordPLM'09, Göteborg, 2009

[11] US Department of Defence: *Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook*, 2005

Einbindung von Lieferanten in die Produktentwicklung durch Konzeptwettbewerbe am Beispiel Flugzeugbau

Stefan List, Jan Göpfert*

Airbus Deutschland GmbH
Cabin Product Strategy & Concepts
Kreetslag 10, 21129 Hamburg
Tel.: +49 (40) 74363898
stefan.list@airbus.com

*ID-Consult GmbH
Irmgardstrasse 1, 81479 München
Tel.: +49 (89) 8906364 0
jan.goepfert@id-consult.com

Inhalt: *Der Artikel berichtet von einem Projekt der Airbus Deutschland GmbH in Hamburg. Der Flugzeugbau setzt zunehmend auf den Ausbau seiner Lieferanten zu Systemlieferanten. Die Qualifizierung der Systemlieferanten muss in einer sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses beginnen. Zur Erreichung der technischen und kommerziellen Ziele bei der Entwicklung neuer Systeme im Flugzeugbau und als ein Element zur Qualifizierung von Systemlieferanten hat sich das Instrument der Konzeptwettbewerbe bewährt. Außerdem wird eine solide Entscheidungsgrundlage für eine qualifizierte Konzeptauswahl geschaffen und ein wesentlicher Input für die Lieferantenauswahl erzeugt. Die Vorgehensweise zur Durchführung von Konzeptwettbewerben beruht auf der von der Münchner Unternehmensberatung ID-Consult entwickelten Methodik METUS® zur Entwicklung innovativer Produktkonzepte.*

Abstract: *This article covers a R&D project of Airbus Germany GmbH in Hamburg. The aviation industry moves more and more towards developing its supplier to system-supplier. This qualification has to be initiated in a very early phase of product development. Aviation industry deploys concept competitions to achieve technical and commercial targets of innovative systems and to support the qualification to system-supplier. This approach establishes furthermore a sustainable decision for preferred product concepts and an important input for the selection of supplier. Here, concept competitions are based on METUS® - a tried-and-tested, scientifically based methodology for developing product and platform concepts in the early development phase. METUS® is developed by ID-Consult in Munich, a technology consulting firm focused to innovation and development.*

Stichwörter: *Konzeptwettbewerb, Systemlieferant, Modularisierung, Requirement-Management, Variantenmanagement, Variantentreiber, Zielkosten, Produktkonzeption, METUS*

Keywords: *concept competition, system-supplier, modularization, requirement management, variant management, variant driver, target costing, product concept, METUS*

1 Zielsetzung von Konzeptwettbewerben

Wie bereits in anderen Branchen zu beobachten ist, setzt auch der Flugzeugbau zunehmend auf den Ausbau seiner Lieferanten zu Systemlieferanten. Der Vorteil für den Hersteller des Gesamtsystems ergibt sich aus der Spezialisierung des Systemlieferanten und der Nutzung des Know-hows aller Wertschöpfungsstufen seines Kerngebietes. Systemlieferanten sind in der Lage, durch ein umfangreiches Leistungsangebot von der Entwicklung, Konstruktion über die Herstellung sowie Lieferung in Serie bis hin zur Erstellung von technischen Dokumentationen und Übernahme des Ersatzteilmanagements die Kernbereiche des Herstellers zu entlasten. Im Gegensatz zum Geräte- und Teilelieferant zeichnet sich der Systemlieferant vor allem durch eine hohe eigene Entwicklungsleistung aus.

Ziel des Ausbaus der Lieferanten zu Systemlieferanten ist die Reduzierung der Lieferantenzahl, um dadurch sowohl logistische Komplexität als auch Entwicklungskomplexität zu reduzieren und die Anzahl zu berücksichtigender Schnittstellen zu verringern. Der Transfer der Systemverantwortung an die Lieferanten gelingt aber nur, wenn die Qualität der Zusammenarbeit zwischen der Entwicklungsabteilung des Herstellers und den Systemlieferanten auf ein höheres Niveau gehoben wird.

Dazu ist eine frühe Einbindung der Lieferanten in den Produktentwicklungsprozess des Herstellers erforderlich. Hier hat sich das Instrument der Konzeptwettbewerbe bewährt. Folgende Ziele werden dabei verfolgt:

- Nutzung der spezifischen Fachkompetenz der Lieferanten
- Frühe Einbindung der Systemlieferanten in den Entwicklungsprozess
- Klare Kommunikation der Anforderungen und Funktionen der Systeme
- Definition von Schnittstellen zwischen den Systemen
- Transparenz und Vergleichbarkeit alternativer Konzeptlösungen für die Systeme von potenziellen Systemlieferanten
- Bewertung alternativer Lösungen von potenziellen Lieferanten anhand vordefinierter Kriterien, wie Kosten, Gewicht, Entwicklungszeiten sowie Liefer- und Montagezeiten.

2 Ausgangssituation im Projekt

Im Rahmen der Entwicklung einer neuen Flugzeugkabinengeneration sollen die zentralen Subsysteme wie Sitze, Toiletten, Küchen etc. weitgehend von Systemlieferanten konzipiert, entwickelt und gefertigt werden, während der Flugzeughersteller Anforderungen, Funktionalität und Ziele insbesondere für Kosten und Gewicht definiert. Um die oben genannten Zielsetzungen zu erfüllen, wurden mehrere potenzielle Lieferanten der Subsysteme über mehrere Wochen zu Konzeptwettbewerben eingeladen. Die Lieferanten bekamen dort die Gelegenheit, ihre Konzepte vorzustellen und sich als künftige Systemlieferanten zu qualifizieren. Airbus konnte die vorgestellten Konzepte aufgrund der standardisierten Art der Darstellung vergleichen, Vor- und Nachteile erkennen und mit den Lieferanten in eine detaillierte Diskussion einsteigen.

3 Methodik zur Abbildung der Konzepte

Die methodische Vorgehensweise beruht auf der von der Münchener Unternehmensberatung ID-Consult entwickelten METUS®-Methodik [1] sowie der entsprechenden Softwarelösung. Diese Methodik wird eingesetzt, um die unterschiedlichen Konzepte der Lieferanten in einer einheitlichen Form zu entwickeln und zu visualisieren. Systematisch berücksichtigt werden dabei alle konzeptionell relevanten Aspekte: Heutige und zukünftige Kundenanforderungen, die technisch zuverlässige Realisierung geforderter Funktionen, die Abbildung der geforderten Varianz, Montagegesichtspunkte, Materialkosten, die Gestaltung der Arbeitsteilung zwischen Herstellern, Lieferanten und Sublieferanten sowie Qualitätsanforderungen. Zentraler Erfolgsfaktor ist dabei die Modellierung und Visualisierung der komplexen Zusammenhänge.

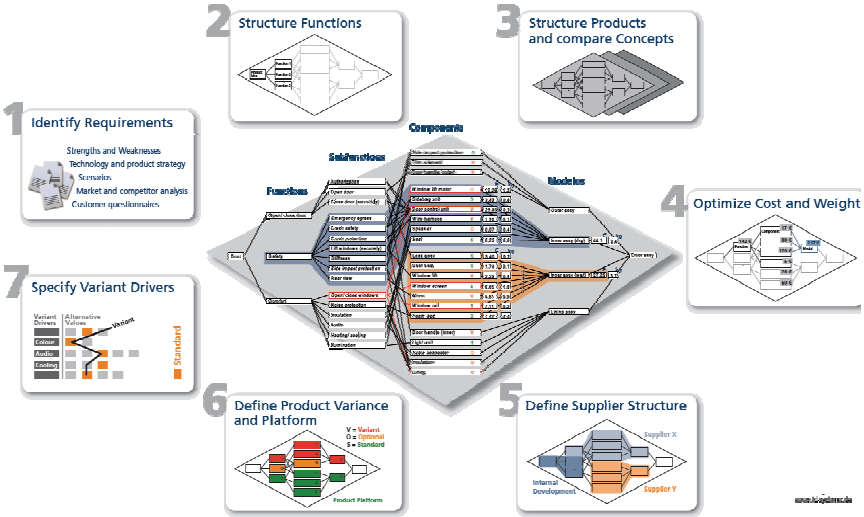


Bild 1: Grundprinzip von METUS®

Das Grundprinzip von METUS® folgt einer einfachen Rautendarstellung [2]: Die Produktidee wird funktional beschrieben und in technische Komponenten umgesetzt. Im rechten Teil der Raute werden die Module dargestellt, die schließlich zum Gesamtprodukt zusammengesetzt werden. Im Hintergrund werden organisatorische Verantwortlichkeiten abgebildet, z.B. die Lieferumfänge der Lieferanten. Durch die vorliegende Systematik und die geschaffene Transparenz wird eine kritische Diskussion des entwickelten Konzeptes ermöglicht – und zwar bereits vor der eigentlichen Entwicklung.

4 Vorgehensweise Konzeptwettbewerbe

Die Vorgehensweise im Konzeptwettbewerb gliedert sich in drei Phasen: Definitionsphase, Konzeptphase sowie Konsolidierungs- und Bewertungsphase. Nach einem gemeinsamen Kick-Off Meeting, in dem Zielsetzung und Vorgehensweise des Projektes vermittelt werden, erfolgt in der Definitionsphase herstellerseitig die Definition der „Startbedingungen“ und Produktziele. Auf diesen setzen in der Konzeptphase die Lieferanten auf und entwickeln alternative Konzepte. Diese Konzepte werden in der nachfolgenden Konsolidierungs- und Bewertungsphase verglichen und zu einem Idealsystem konsolidiert. Diese Vorgehensweise zeigt Bild 2:

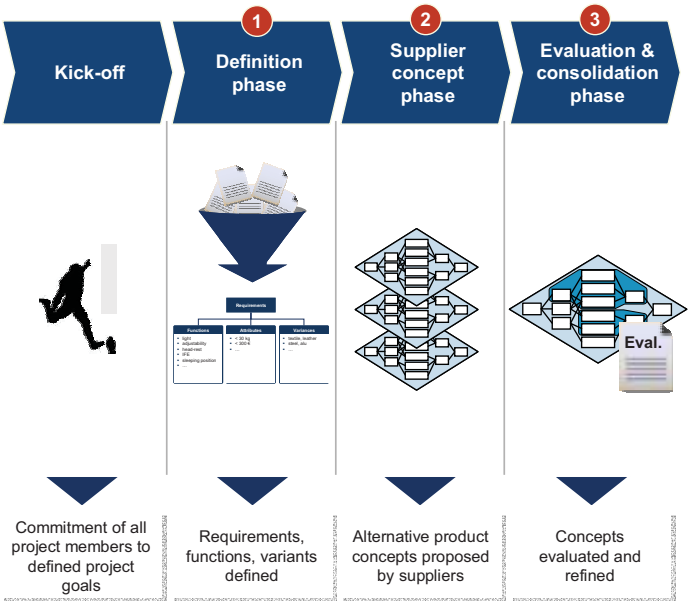


Bild 2: Vorgehensweise im Konzeptwettbewerb

Im vorliegenden Projekt wurden Konzeptwettbewerbe für alle wesentlichen Subsysteme einer Flugzeugkabine wie z.B. Sitze, Bordküchen und Toilettensysteme durchgeführt.

5 Definitionsphase

Die Definitionsphase hat zum Ziel, alle ausgewählten Systemlieferanten eines Subsystems mit denselben Ausgangsdaten auszustatten. Dazu werden vom Flugzeugbauer die Systemanforderungen, die Funktionen des ausgewählten Subsystems und die geforderte Varianz definiert und mit Hilfe von METUS® systematisch aufbereitet.

Die Darstellung der **Systemanforderungen** speist sich aus heutigen und künftigen Anforderungen [3] an das Produkt – aus Kundensicht, aber auch aus Sicht der eigenen Organisation. Anforderungen der Montage und Fertigung werden dabei ebenso erfasst wie Anforderungen aus Entwicklung, Einkauf, Logistik, Service etc. Aufgrund der typischerweise langfristigen Entscheidungen, die im Rahmen der Konzeptfindung getroffen werden, sind neben strategischen Einflussfaktoren auch mittel- und langfristige Markt- und

Technologietrends in dem Anforderungskonzept zu berücksichtigen. Das definierte Anforderungskonzept stellt zugleich die „Messlatte“ für die spätere Bewertung erarbeiteter Konzeptalternativen dar.

Mit Hilfe der **Funktionsstruktur** werden die Haupt- und Teilfunktionen des Subsystems beschrieben. Die funktionale Betrachtungsweise ermöglicht es, von der existierenden technischen Lösung zu abstrahieren und alle Funktionalitäten des Subsystems erneut zu hinterfragen und ggf. zu optimieren. Die Abbildung unten zeigt einen Ausschnitt der Funktionsstruktur einer Bordküche.

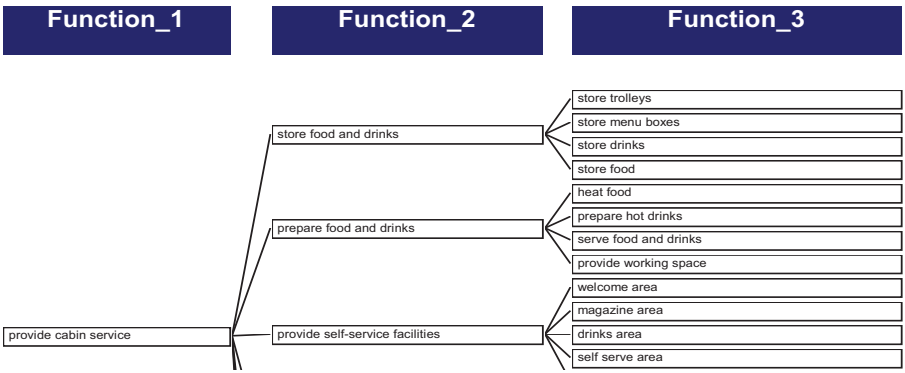


Bild 3: Funktionsstruktur Bordküche - Ausschnitt

Mit der Definition der **Variantentreiber** wird festgelegt welches „Variantenfenster“ zukünftig mittels der Subsysteme abgedeckt werden soll und welche Varianten ggf. gestrichen bzw. durch kundenspezifisches Customizing realisiert werden sollen. So wird beispielsweise festgelegt, dass sowohl eine Halogenbeleuchtung als auch fluoreszierende Beleuchtung möglich sein muss oder dass 2 unterschiedliche Typen von Rettungswesten angeboten werden können. Die geforderte Varianz wird in einer Variantentreibertabelle übersichtlich dargestellt. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt:

Struct Cabin Item	Variant Driver Group	Variant Driver	Parameter Value 1	Parameter Value 2	...
	Illumination				
		Illumination type	Fluorescent	Halogen	...
		Illumination color	Cold illumniation color	Warm illumination color	...
	Safety equipment				
		EEPMS (Escape Path Marking)	Floor-mount EEPMS	Monument-mount EEPMS, type A	...
		Life vest type	Life vest (compartment) type A	Life vest (compartment) type B	...
		Oxygen system type			...
		Safety placard information	English only placards	Bi-lingual placards (english + customer language)	

Bild 4: Beispiele Variantentreiber und deren Ausprägungen

Die erzeugte Datenbasis wird nun den potenziellen Systemlieferanten zur Verfügung gestellt und im Detail erläutert. Gleichzeitig werden die Lieferanten mit der Software METUS® vertraut gemacht. Ziel ist es, die Lösungskonzepte der Systemlieferanten in einer vereinheitlichten Form darzustellen.

6 Konzeptphase

Die Systemlieferanten erarbeiten nun auf Basis der definierten Eingangsdaten einen Lösungsvorschlag für das Konzept des ausgewählten Subsystems der Kabine. Mit der Produktstruktur werden die zentralen Komponenten definiert und in ihrer modularen Struktur dargestellt. Durch die softwaregestützte Verknüpfung von Funktionen und Komponenten wird transparent, wie die Funktionen des Produktes erfüllt werden. Die Realisierung der Varianz wird durch Verknüpfung von Variantentreibern mit den Komponenten des Konzeptes dargestellt. Auf diese Weise lässt sich erkennen, welche Komponenten als Gleichteile konzipiert sind, welche optionalen Komponenten vorgesehen sind und welche Komponenten variantenbehaftet sind. Durch die vorgegebene Methodik wird auch das Montagekonzept des jeweiligen Lösungskonzeptes transparent gemacht. Skizzen und zusätzliche Informationen ergänzen die rein strukturelle Abbildung. Ein exemplarisches Konzept ist im Folgenden dargestellt.

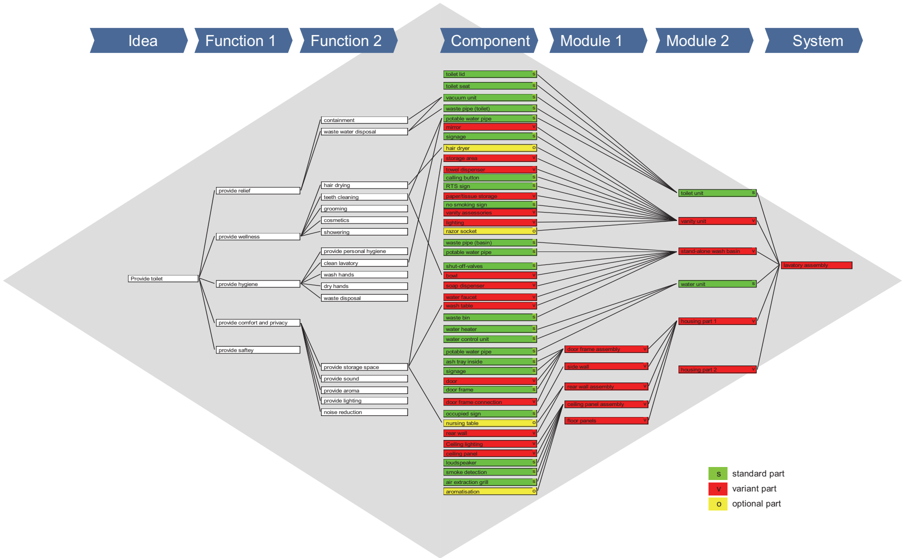


Bild 5: Vereinfachtes Beispiel einer Konzeptdarstellung mit METUS®

Die Erarbeitung der Konzepte erfolgt jeweils in moderierten Workshops unter Verwendung der METUS®-Methodik und der entsprechenden Software-Lösung. Im Anschluss an die einzelnen Workshops erhalten die Lieferanten die Möglichkeit, ihre Konzepte intern weiter zu entwickeln und zu optimieren. Die optimierten Konzepte sind dann die Grundlage für den Vergleich und die Bewertung der Konzepte durch den Flugzeugbauer.

7 Bewertungsphase

Im Rahmen der Workshops mit den Lieferanten werden die individuellen Konzepte vorgestellt und diskutiert. Die Bewertung erfolgt im Nachgang anhand vorher definierter und kommunizierter Kriterien wie z.B. Innovationsgrad der Lösung, Anzahl Komponenten und Ausführungen, Gewicht, Materialkosten, Fertigungszeiten, aber auch Liefer- und Montagezeiten.

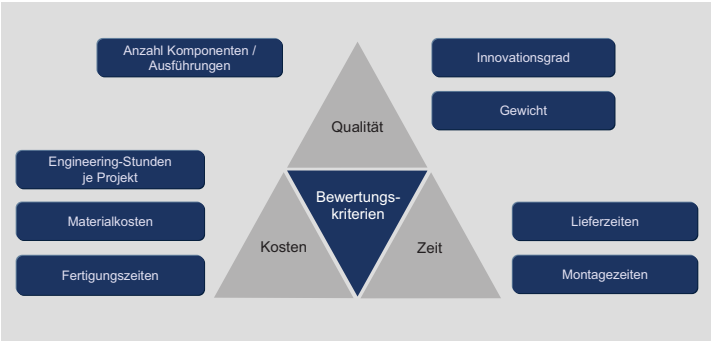


Bild 6: Darstellung der Bewertungskriterien

Neben der kriterienbasierten Evaluierung erfolgt ein struktureller Vergleich der Alternativen, wobei die jeweiligen Vor- und Nachteile der Konzepte vom Flugzeughersteller diskutiert werden.

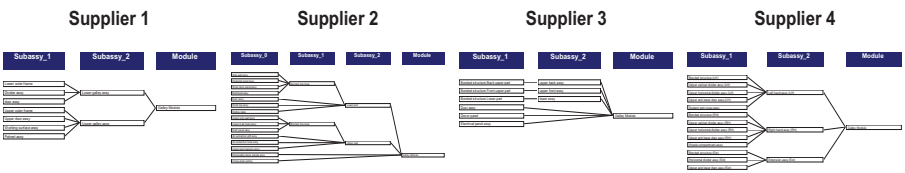


Bild 7: Struktureller Konzeptvergleich

Im Rahmen der Konzeptbewertung mit allen ausgewählten Bewertungskriterien ergibt sich ein Gesamtbild der alternativen Konzeptlösungen. Anhand der zentralen Stellhebel der Produktarchitektur können jeweils die Lösungen so angepasst werden, dass die definierten Ziele erreicht werden können. Dazu sind in der Regel weitere Iterationen mit den Systemherstellern erforderlich.

Den Abschluss der Bewertungsphase bildet die endgültige Konzeptauswahl, die ein wesentliches Kriterium für die Auswahl des oder der Systemlieferanten darstellt.

8 Fazit

Durch die durchgeführten Konzeptwettbewerbe gelingt einerseits die frühe Einbindung der potenziellen Lieferanten in den Entwicklungsprozess und ein wichtiger Schritt in Richtung der Qualifizierung zum Systemlieferanten, andererseits kann eine solide

Entscheidungsgrundlage für eine qualifizierte Konzeptauswahl geschaffen und ein wesentlicher Input für die Lieferantenauswahl erzeugt werden. Durch die systematische Vorgehensweise auf Basis der METUS® Methodik wird eine hohe Vergleichbarkeit der Lösungen erzielt. Dazu trägt auch die eingängige Visualisierung der Konzepte bei, die eine gute Grundlage für interne Diskussionen sowie Detaildiskussionen mit dem Lieferanten darstellt. Somit wird eine tragfähige Basis für die weitere Entwicklungsarbeit gelegt.

Literatur

[1] CAD-CAM Report, Nr.6, 2008: Entwickeln mit Methode spart Ingenieurstunden

[2] Göpfert, Jan: Ein Ansatz zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation, Gabler Verlag, Wiesbaden 1998

[3] Göpfert, Jan; Steinbrecher, Michael: Modulare Produktentwicklung leistet mehr, in: Harvard Business Manager, Heft 3/2000, S. 20-31

Produktentwicklung optimieren unter Nutzung von Künstlichen Neuronalen Netzen und grafischer Visualisierung der Anforderungen (PONNGA)

Jörg Feldhusen, Arun Nagarajah

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen
Email: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de; nagarajah@ikt.rwth-aachen.de
Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

Inhalt: *In dieser Veröffentlichung wird ein Ansatz zur Anwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) für die Unterstützung des Entwicklers bei der Suche nach den optimalen Lösungen für neue Anforderungen dargestellt. Das KNN soll durch die Verknüpfung der Kundenanforderungen mit den bestehenden unternehmensspezifischen Produktlösungen trainiert werden. Damit soll das KNN in der Lage versetzt werden, für eine neue evolutionäre Produktentwicklung mit veränderten Anforderungen dem Anwender die möglichen Lösungen, in ihrer Erfolgswahrscheinlichkeit sortiert, in Form eines intuitiv bedienbaren Vorschlagssystems anzubieten. Der Vorteil dieses Ansatzes gegenüber einem regelbasierten ist, dass das Netz die Fähigkeiten hat, Gesetzmäßigkeiten in einem komplexen System zu erkennen. Zudem wird das Wissen des Entwicklers automatisch eingefangen.*

Abstract: *This paper describes an approach to apply Artificial Neural Network (ANN) to support the developer by selecting the optimal parent solution for new specifications. First of all the ANN should learn from the previously mapping between the customer requirements and the companies product solutions. For a new development process of an evolutionary product with changed requirements the ANN can identify the possible existing solution and sort them according to their probability of success. The advantages of this approach compared to the rule-based systems are on the one hand that ANN is able to identify principles and structures of an complex system and on the other hand the ANN automatically store the knowledge of the developer.*

Stichwörter: *Produktenwicklungsprozess, Konstruktionsmethodik, Neuronales Netz, Evolutionäre Produkte*

Keywords: *Product Development Process; Engineering Design; Neural Network; Evolutionary Products*

1 Einleitung

In der heutigen Automobilzulieferindustrie wird ein hoher Anteil der zu entwickelnden Produkte durch Anpassungs- und Variantenkonstruktion entwickelt [1]. Ein Grund hierfür liegt sicherlich in der gestiegenen Forderung der Hersteller, die Kosten zu senken und die

Zeit für die Produktentwicklung immer weiter zu verkürzen. Dabei stehen die Unternehmen vor dem Dilemma, auf der einen Seite auf bestehende Produktlösungen zurückgreifen zu müssen, aber auf der anderen Seite innovative Lösungen zu entwickeln, um die Wettbewerbesfähigkeit gegenüber der nationalen und internationalen Konkurrenz zu steigern. Für die Optimierung dieses Spannungsfeldes müssen die Entwicklungsprozesse, die zwar sehr zeitraubend, aber nicht kreativ anspruchsvoll sind, automatisiert werden. Ein Entwicklungsprozess wird erfahrungsgemäß durch die Suche nach bereits erarbeitetem Wissen verzögert [2]. Ein Expertensystem kann hier Abhilfe schaffen. Das Erstellen regelbasierter Expertensysteme wäre jedoch in Anbetracht der Komplexität der durchzuführenden Gesamtaufgabe zu aufwändig, da ein immenses Regelwerk (durch explizites Generieren und Verknüpfen von Logikbausteinen) geschaffen werden muss.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, ein KNN - basiertes Expertensystem zu entwickeln, das zur Beschleunigung des Produktentstehungsprozesses durch Verbesserung der erwähnten Problemsituation führt. Der Vorteil dieses Systems gegenüber einem regelbasierten System ist, dass das Netz in der Lage ist Gesetzmäßigkeiten in einem komplexen System, welches die Produktentwicklung ohne Frage darstellt, zu erkennen. Aus den erkannten Gesetzmäßigkeiten können dann automatisch Regeln abgeleitet werden. Hierdurch entfällt der Aufwand zum Erstellen der Regeln. Damit ein solches System seine Arbeit durchführen kann, muss es erst eine Lernphase durchlaufen. In dieser Phase wird das Netz durch die Auswahlprozesse des Entwicklers zum Auffinden von bestehenden und passenden CAD-Modellen zu den Produktanforderungen trainiert. Danach ist das System in der Lage für neue Produktanforderungen dem Anwender die möglichen Lösungen, in ihrer Erfolgswahrscheinlichkeit sortiert, in Form eines intuitiv bedienbaren Vorschlagssystems anzubieten.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit eines KNN-basierten Systems in der Produktentwicklung ist, dass die Produktanforderungen im Rechner abgebildet werden müssen. Hierzu ist eine möglichst eindeutige Beschreibung der Produktanforderungen erforderlich. Eine weitere Bedingung ist, dass die CAD-Modelle änderungsstabil entwickelt werden müssen, da sie sich automatisch auf die neuen Produktanforderungen anpassen sollen.

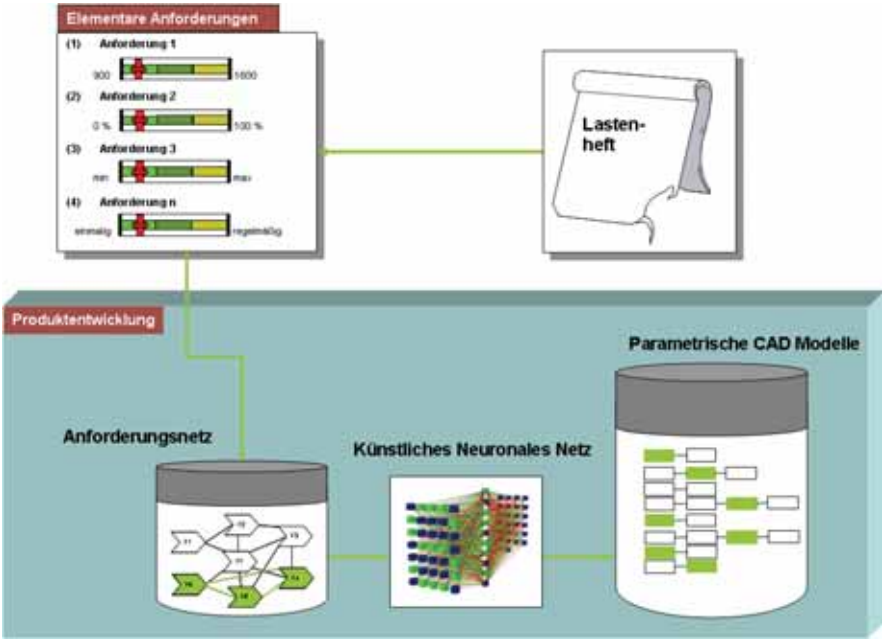


Bild 1: Vorgehensweise nach PONNGA

Folgende Punkte sollen in diesem Projekt entwickelt werden (Bild 1):

1. Entwicklung einer Vorgehensweise zur Beschreibung der textuellen Anforderungen in elementare Anforderungsbausteine und ableiten einer grafischen Modellierungssprache für die Visualisierung der Anforderungen.
2. Entwicklung von Modellierungsmethoden für änderungsstabile CAD Modelle
3. Entwicklung eines KNNs, welches in der Lage ist aus der Vorgehensweise des Entwicklers zu lernen, und diesen bei der Durchführung der Produktentwicklung für neue Anforderungen zielgerichtet zu unterstützen.

2 Entwicklung einer Vorgehensweise zur Optimierung der Anforderungsbeschreibung

2.1 Vorgehensweise zur Bildung von Elementaren Anforderungsbausteinen

Die Grundvoraussetzung für das angestrebte Ziel ist die Entwicklung einer möglichst eindeutigen Anforderungsbeschreibung. In einem ersten Schritt soll in Anlehnung an die VDA-Empfehlung (Verband der Automobilindustrie e.V.) eine Beschreibungsform für Anforderungen in Form von elementaren Bausteinen entwickelt werden. Diese Bausteine, welche aus Subjekt, Anforderungswort, Objekt und Prädikat gebildet werden, sollen branchenspezifisch erfasst und in einer Datenbank abgelegt werden [3].

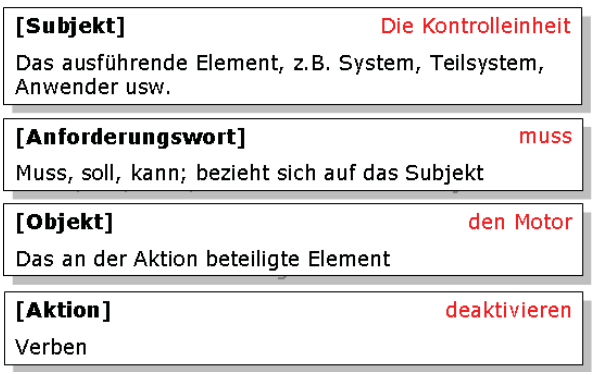


Bild 2: Anforderungsbeschreibung in Anlehnung an VDA [3]

Es muss weiterhin sichergestellt werden, dass die Fehler, die während der Kommunikation mit dem Kunden entstehen können, minimiert werden. Ein Lastenheft mit einer textuellen Beschreibung der Anforderung birgt durch eine unscharfe Sprache ein hohes Fehlerpotential. Dieses wird zwar durch eine elementare Beschreibungsform verbessert, ist jedoch nicht als optimale Lösung anzusehen, da durch diese das Verhalten des Systems in Ihrer Gesamtheit nur mit Mühe identifiziert werden kann. Eine grafische Visualisierung der Anforderung wird in diesem Fall zu einer weiteren Optimierung der Anforderungsbeschreibung führen.

2.2 Grafische Visualisierung der Anforderungen

Komplexe Sachverhalte können häufig in textueller Form nicht allgemeinverständlich dargestellt werden. In diesem Fall stellen grafische Visualisierungen eine große Hilfe dar. Auch Grafiken verfügen über einen definierten Syntax mit einer definierten Semantik. Die Zusammensetzung solcher Grafiken ergibt ein Modell der Wirklichkeit, das einfach durch andere Beteiligte verstanden werden kann.

Die größte Sammlung von Modellen, mit denen sich allgemeine Systeme beschreiben lassen, wurde innerhalb der Object Management Group (OMG) entwickelt: Dabei handelt es sich um SysML (Systems Modeling Language) [4]. Die funktionalen Systembegrenzungen werden in der SysML mit Hilfe von Use- Case-Diagrammen beschrieben. Anwendungsfälle wurden entwickelt, um die funktionalen Systembegrenzungen, d. h. die funktionalen Anforderungen, zu erfassen [5]. Der Anwendungsfall wird mit den Akteuren verknüpft (Personen oder Systeme), die mit dem System interagieren, sowie mit den Vor- und Nachbedingungen, die sich aus den funktionalen Anforderungen ergeben.

Für die Erstellung der grafischen Modellierung soll in einem ersten Schritt die durch die VDA Vorgehensweise erarbeiteten elementaren Anforderungsbausteine klassifiziert werden. Die Klassenbeziehungen sollen durch Attribute wie „gehört zu“ und „steht im Widerspruch zu“ beschrieben werden. Bei der Entwicklung einer neuen Baureihe kann dann überprüft werden, ob die ermittelten Kundenanforderungen einer bestehenden Anforderungsklasse zugeordnet werden können. Damit sollen mögliche Widersprüche zu Beginn der Entwicklung identifiziert werden.

Aufbauend auf diesen Anforderungsklassen soll in Anlehnung an die grafische Modellierungssprache SysML eine Branchenabhängige grafische Modellierungssprache erarbeitet werden. In einem Anforderungsklassenmodell sollen die gewünschten Eigenschaften eines Produktes definiert werden und in einem Anwendungsfallmodell das gewünschte Verhalten visualisiert werden (Bild 3).

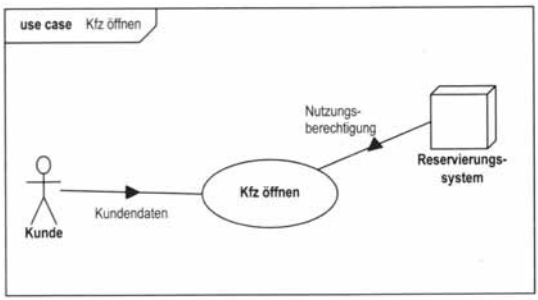


Bild 3. Anwendungsfallmodell [5]

Jede Branche hat ihre eigene Sprache und Symbole. Diese müssen für die Modellierungssprache berücksichtigt werden. Für eine effektive Kommunikation muss das System als ein lebendiges System betrachtet werden. Nach der ersten Visualisierung der Anforderungen müssen in weiteren Interaktionen mit dem Kunden die Darstellung detailliert werden. In der grafischen Darstellung soll die Möglichkeit geboten werden, Änderungen der Anforderungen bei einer Neuentwicklung in der vorhandenen Darstellung zu aktualisieren. Zudem soll die Darstellung hierarchisch in einer Top - Down Vorgehensweise aufgebaut werden.

2.3 CAD Modellierungsmethoden

In der Automobilbranche haben sich parametrisch-assoziative 3D-CAD-Systeme wie CATIA V5, Unigraphics NX oder ProEngineer mittlerweile durchgesetzt. Die Systeme ermöglichen auf der einen Seite die Beschleunigung der Produktentstehung, aber auf der anderen Seite sind sie so komplex, dass ohne eine sinnvolle methodische Vorgehensweise die Modellierungszeit unnötig verlängert wird.

Im Unterschied zu den reinen 2D-CAD-, wo einzelne Geometrieelemente in keinem direkten Bezug zu einander standen, bilden die parametrisch-assoziativen 3D-CAD-Systeme komplexe interne Abhängigkeitsketten, deren Beherrschung während des Modellierungsprozesses von großer Bedeutung ist. Die verbreitete sequentielle Arbeitsweise in einem 3D-CAD-System, bei der neue Modellelemente auf bereits bestehende referenziert werden, hat hauptsächlich das Modellierungs-Endergebnis im Fokus und vernachlässigt dabei die interne Modell Repräsentation [6]. Fällt bei einer Änderung ein Referenzierungselement weg oder wird es durch ein anderes ersetzt, wird

der sequenzielle Aufbau gestört und alle nachfolgenden Elemente können nicht mehr assoziativ wiederaufgebaut werden [6].

Es kann festgestellt werden, dass die Modellstabilität von der Anzahl der Modellelemente und der Zwangsbedingungen innerhalb eines CAD-Modells direkt abhängt. Bei den Unternehmen fehlt sowohl die sinnvolle Auswahl der Zwangsbedingungen als auch ein strukturierter Modellaufbau. Dadurch können umfangreiche Modelländerungen ohne Geometriefehler auch bei komplexen CAD-Modellen in weiteren Modellnutzungsphasen nicht sichergestellt werden.

In den letzten Jahren ist im Bereich der Konstruktion die Feature-basierte Modellierung stark in den Vordergrund gerückt, um den Konstruktionsprozess zu unterstützen. Feature-basierte Modellierung wird in der VDI 2218 als das Modellieren eines Produktes mit Hilfe von bereitgestellten Elementen charakterisiert. Die für die Modellierung notwendigen Feature-Elemente werden aus Bibliotheken entnommen und nach der Definition der geometrischen Ausprägung und Position im Produktmodell platziert. Die entscheidenden Vorteile der Feature-Technologie bestehen in der Wiederverwendung von Expertenwissen und einen dadurch beschleunigten Entwicklungsprozess [6].

Die Basis dieses Forschungsprojektes bilden standardisierte Konstruktionselemente, die unter Verwendung der Feature-Technologie erstellt werden, wodurch es ermöglicht wird, den CAD Modellierungsprozess zu strukturieren. Durch eine einheitliche Modellierung der CAD-Modelle kann gewährleistet werden, dass Produktmodelle auch durch Personen modifiziert werden können, die sie nicht erstellt haben, da ähnliche Strukturen zugrunde liegen.

2.4 Entwickelung eines Neuronalen Netzes:

Neuronale Netze sind den Informationsverarbeitungseinheiten und Speichermechanismen im biologischen Gehirn nachgebildet. Eine Vielzahl einfacher Prozessorelemente, so genannte Neuronen, sind mit einer großen Anzahl von Nachbarneuronen über Synapsen verbunden. Sie sammeln Informationen und berechnen eigene Ergebnisse durch relativ einfache Rechenschritte [7].

Nach Otte besteht die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes nicht in den komplexen Berechnungsmöglichkeiten der einzelnen Neuronen, sondern in der parallelen

Datenverarbeitung von mehreren Millionen oder sogar Milliarden Einzelelementen. Obwohl die Informationsverarbeitung eines einzigen Neurons sehr einfach ist [7].

Die Künstlichen Neuronalen Netze (KNN) sind eine Abstraktion der biologischen Netze. Ein Künstliches Neuronales Netzwerk besteht aus bis zu tausenden von künstlichen Neuronen, die auf verschiedenen Arten miteinander verbunden sind.

Nach Seraphin zeichnen folgende Punkte neuronale Netze aus und heben sie von anderen Ansätzen, komplexe Problemstellungen mit dem Computer zu lösen, ab [8]:

- Assoziationsfähigkeit: Generalisierung von Aussagen und Erkennung ähnlicher Eingabe-Daten.
- Fehlertoleranz: Teilweise fehlerhafte oder unvollständige Eingabe-Daten erzeugen, bis zu einem bestimmten Grade, trotzdem den gewünschten Output.
- Lernfähigkeit: Fähigkeit der Änderung der Neuronenverbindungsstärken in Abhängigkeit der lokalen Neuronenaktivität bzw. verschlüsselte Speicherung der zu lernenden Informationen in diesen Verbindungsstärken.
- Ausfallsicherheit: Selbst bei Teilausfällen bestimmter Bereiche eines neuronalen Netzes ist es noch in der Lage, je nach Grad des Verlustes, einen Großteil seiner Fähigkeiten beizubehalten. Dieses ist bedingt durch die verteilte Speicherung bzw. die fehlende Abhängigkeit einer zentralen Steuereinheit.
- Parallele Verarbeitung: Enorme Leistungsfähigkeit durch hochgradige, parallele Informationsverarbeitung.

Damit das KNN seine Aufgabe durchführen kann muss es trainiert werden [7]. Die hierfür notwendigen Lernverfahren gliedern sich nach Otte in überwachte und unüberwachte Lernverfahren [7].

Unüberwachte Lernverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass dem KNN nur Eingabewerte und keine Ausgabewerte zum lernen vorgeben werden.

Beim überwachten Lernverfahren existiert eine Trainingsmenge von Eingabemustern sowie deren korrekte Ergebnisse in Form der genauen Aktivierung sämtlicher

Ausgabeneurone. Für jedes in das Netz eingegebene Trainingsmuster kann so beispielsweise die Ausgabe direkt mit der korrekten Lösung verglichen werden und anhand der Differenz die Netzgewichtungen geändert werden. Ziel ist eine Veränderung der Gewichte dahingehend, dass das Netz nach dem Training nicht nur selbstständig Ein- und Ausgabemuster assoziieren, sondern bis dato unbekannte, ähnliche Eingabemuster einem plausiblen Ergebnis zuführen, also generalisieren kann. Dieses Lernverfahren soll in diesem Forschungsprojekt zur Anwendung kommen.

Auf Grund der oben erwähnten Eigenschaften von KNN ist es sinnvoll diese als Unterstützungssysteme für die frühe Phase der Produktentwicklung in der Automobilzulieferindustrie zu nutzen. Durch das KNN soll die evolutionäre Produktentwicklung effektiver und effizienter gestaltet werden. Neuronale Netze entsprechen hierbei einem kontinuierlichen Lernen möglicher und gewünschter Produktkomponenten zu den Kundenanforderungen.

Im ersten Schritt soll jede Anforderungsklasse mit einem bereits existierenden Produkt bzw. Produktkomponente verknüpft werden. Hierzu werden basierend auf vorhandene Lastenhefte entsprechende Anforderungen in parametrisierbare Größen überführt und anschließend bereits realisierten Produktkomponenten zugeordnet.

Das Neuronale Netz soll durch diese Verknüpfungen des Anwenders aus den Entwicklungen der vergangenen Produkte lernen und für eine neue Produktvariante Vorschläge für die Auswahl der in Frage kommenden bestehenden Produktkomponenten für die neuen Kundenanforderungen machen. Zudem lernt das Netz durch Anpassung des Entwicklers an das tatsächlich gewählte Produktkomponente für die Kundenanforderungen hinzu. Somit lässt sich ein Vorschlag für die Produktkomponente ermitteln, der die wesentlichen Kundenanforderungen erfüllt, jedoch nicht mit unnötigen Varianten überladen ist. Durch die Implementierung eines NN soll die Entwicklungszeit für bekannte Anforderungen effektiv verkürzt werden. Hierdurch kann bereits in der Anforderungsermittlung automatisch überprüft werden, ob die Anforderung durch die bestehenden Produktvarianten realisiert werden kann (Bild 4).

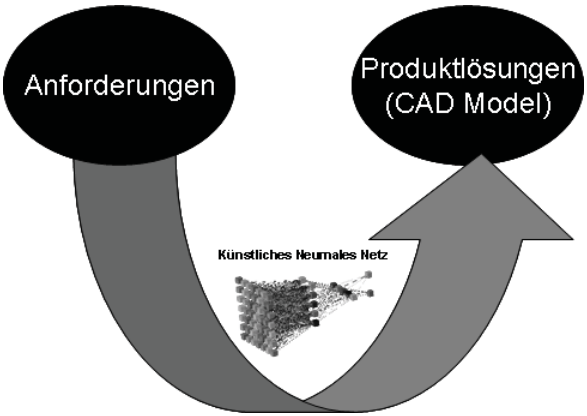


Bild 4: Verknüpfung zwischen Anforderungen und Produktlösungen

Die Ergebnisse sollen dem Anwender, in ihrer Erfolgswahrscheinlichkeit sortiert, in Form eines intuitiv bedienbaren Vorschlagssystems realisiert werden. Das Vorschlagssystem soll dabei zu jedem Konstruktionsschritt die erfolgversprechenden Lösungskonzepte in Form von CAD – Modellen, CAD – Feature oder CAD Skelettmodelle anbieten.

Literatur

[1] Tovey M., *Design of Lean Implementation Based on Cost Analysis*, Journal of Engineering Design, July 2001, ISSN 0954-4838

[2] Almefelt, L., Andersson, F., Nsilsson, P., Malmqvist, J., *Exploring Requirements Management in the Automotive Industry*. Stockholm, International Conference on Engineering Design (ICED), 2003

[3] Verband der Automobilindustrie e.V., *Automotive VDA-Standardvorlage Komponentenlastenheft*, Frankfurt a.M., 2006, ISSN 0943-9412

[4] Störrle, H., *UML 2 erfolgreich einsetzen –Einführung und Referenz-*, München, Addison Wesley, 2005, ISBN 3-8273-2268-5

[5] Weilkiens, T., Systems Engineering mit SysML / UML: - Modellierung, Analyse, Design-, Dpunkt Verlag, 2006, ISBN 3-898-64409

[6] Braß, E., *Konstruieren mit CATIA V5. Methodik der parametrisch-assoziativen Flächenmodellierung*, München, Hanser, 2005, ISBN 3-446-22801-2

[7] Otte R., Otte V., Kaiser V., *Data Mining für die industrielle Praxis*, München, Hanser, 2004, ISBN 3-446-22465-3

[8] Seraphin, M., *Neuronale Netze & Fuzzy-Logik, München*, Franzis', 1994, ISBN 3-7723-6385-7

Diskussion der Gültigkeit des Allgemeinen Konstruktionsprozesses in der Lehre und industriellen Praxis

Jörg Feldhusen, Alex Brezing

Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 B, D-52074 Aachen
Email: brezing@ikt.rwth-aachen.de; Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

Inhalt: *Der Allgemeine Konstruktionsprozess, wie er in weitgehender Übereinstimmung mit zahlreichen Autoren der Konstruktionsmethodik beispielsweise in der VDI-Richtlinie 2221 [1] in Form einer Handlungsanweisung für das Konstruieren beschrieben wird, ist ein grundlegender Bestandteil der Konstruktionsausbildung an vielen Hochschulen, vor allem im deutschsprachigen Europa. Obwohl vermutlich kein beteiligter Autor jemals für diese Darstellung die uneingeschränkte Anwendbarkeit auf jeden Anwendungsfall im Umfeld der Produktentwicklung beansprucht hat, waren und sind diese Ansätze stets den Vorwürfen der mangelnden Praxistauglichkeit ausgesetzt; auch in den Bereichen der Methodikforschung und der Lehre besteht ein weitreichender Konsens dahingehend, dass die VDI-Richtlinien zu starr gehalten waren und es einer Flexibilisierung bedarf [2]. Vor dem Hintergrund einer sich wandelnden industriellen Praxis und universitären Ausbildung und eines zunehmenden Stellenwertes der interdisziplinären und verteilten Produktentwicklung, aber auch anlässlich der aufgenommenen Ausschussarbeit zur Aktualisierung dieser Richtlinie sollen die folgenden Ausführungen einen Beitrag zur Diskussion zur Gültigkeit eines Allgemeinen Konstruktionsprozesses leisten.*

Abstract: *The "General Process of Engineering Design" has been a fundamental component in the methodology of design engineering education in many universities - especially in Germany - since its origination in the late 1960s and the publication of a VDI guideline 2221 [1], that summarizes the different authors' approaches. Although universal applicability of this phase model has probably never been claimed by any involved author, it has always been subject to accusations of unsuitability for practical use. Even experts from the fields of design methodology and engineering education seem to agree that the VDI guideline needs to be changed to be more flexible [2]. This paper is a contribution to the ongoing discussion about the validity of the "General Process of Engineering Design" in the context of evolving changes in industrial practice and engineering education and the growing importance of interdisciplinary and collaborative product development.*

Stichwörter: *Konstruktionslehre, Konstruktionsmethodik, Konstruktionsprozess, Designprozess, Problemorientierung, Lösungsorientierung, VDI 2221, Methodikforschung, Designtheorie*

Keywords: *Design Engineering Education, Engineering Design Methodology, Engineering Design Process, Industrial Design, Product Design, Problem Orientation, Solution Orientation, Design Theory*

1 Einleitung

Die Entwicklung des als Allgemeiner Konstruktionsprozess (AKP) bekannten Phasenmodells erfolgte in Deutschland beginnend in den 1960er Jahren als Folge einer als „Engpass Konstruktion“ bezeichneten Krise, in der Rufe nach einer Systematik im Konstruktionsablauf und einer Methodik in der Konstruktionslehre laut wurden [2]. Die Krise bestand unter Anderem in einem Mangel an qualifizierten Konstrukteuren und war daher von wirtschaftlicher Relevanz, was zur Bildung eines DFG-Schwerpunktprogramms „Konstruktionsforschung“ im Jahre 1969 führte. Laut DFG Jahresbericht 1970 gingen die Bestrebungen dahin, sich von der Auffassung der Konstruktion als Kunst zu lösen und das Konstruieren nach möglichst wenigen Grundprinzipien auszurichten [3]. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch die von Heymann in seinem Abriss „Forderungen nach einer Konstruktionswissenschaft“ [2] zusammengetragenen Erklärungsansätze für den Fachkräftemangel. So nennt z. B. Brader 1976 zwei Kernfaktoren: Zum Einen führe der Mangel an einer Konstruktionswissenschaft dazu, dass Entscheidungen oft gefühlsmäßig getroffen werden müssten, was in seiner Unwissenschaftlichkeit vom Anfänger abgelehnt würde. Zweitens führe der hohe Grad der Arbeitsteiligkeit in der Industrie zu einer „Verarmung des Arbeitserlebnisses“, da er sinngemäß nicht am Gesamtprodukt teilhabe, womit eine „emotionale Unterernährung“ bzw. eine „gesellschaftliche“ bzw. „gefühlsmäßige“ Isolation des Konstrukteurs im Betrieb einhergehe. Beide Faktoren wurden als Erklärung für die geringe Attraktivität des Berufes genannt, die dazu geführt hätten, dass gegen Ende der 1970er Jahre in der BRD „auf drei freie Stellen im Konstruktionsbüro der Maschinenindustrie ein Bewerber [...] kommt“ (Federn 1970, gefunden in [2]). Hier existieren Parallelen zur heutigen Situation: Neben dem aktuell existierenden Mangel an Ingenieuren findet ebenso aktuell, wenn auch nicht im Bereich des allgemeinen Medieninteresses, durch eine zunehmend ganzheitliche Sicht der Produktentwicklung ein Umbruch im Verständnis der Rolle des Ingenieurs in Entwicklung und Konstruktion statt, der sich dahingehend auswirkt, das Ingenieure in zunehmenden Maße in interdisziplinären Teams tätig sind.

2 Der Allgemeine Konstruktionsprozess

Die in den Jahren 1966 bis 1974 entstandenen Konstruktionsmethodiken von Rodenacker, Roth, Koller, Pahl und Beitz wiesen trotz unterschiedlicher Schwerpunktsetzungen ähnliche phasenartige Beschreibungen eines Konstruktionsprozesses auf, die auf der Abstraktion des Konstruktionsproblems beruhen. So besteht der Ansatz des Vorgehens in der Beschreibung der geforderten Funktion des technischen Systems, weswegen Heymann von „funktionsorientierten“ Ablaufplänen spricht [2]. Die genannten Ansätze befassten sich mit der erklärten Zielsetzung, neuartige Lösungen hervorbringen zu können, besonders eingehend mit der Konzeptionsphase. Die Motivation hinter dieser Schwerpunktsetzung war eine deutliche Abgrenzung zu der Konstruktionspraxis, die sich am Kopieren guter Beispiele orientiere; insbesondere auch die klare Abgrenzung der Konstruktion von künstlerischer Tätigkeit. Der Allgemeine Konstruktionsprozess stellt ein „methodisches Gedankengerüst“ dar, das „wohlgeordnete Schritte“ sowie eine „Übersicht über alle Möglichkeiten, eine Aufgabe anzufassen“ bereitstellt, wie Rodenacker es 1970 forderte [2].

Nicht unmittelbar aus der grafischen Darstellung des Phasenmodells (Bild 1) ersichtlich ist das Prinzip der systematischen Variantenbildung in jeder Arbeitsphase, das jedoch wie die Abstraktion der Konstruktionsaufgabe zu Funktionsstrukturen grundlegend für die methodische Konstruktion ist [2, 6]. Besonders bei Koller [7] wird der Anspruch deutlich, durch eine systematische Berücksichtigung aller für die Erfüllung einer geforderten Funktion existierender physikalischer Effekte, die dem Konstrukteur in Katalogen bereit gestellt werden, sogar ein vollständiges Lösungsfeld aufzustellen, aus dem dann anhand bekannter Anforderungen die optimale Lösung ausgewählt werden könne. Hier wird deutlich, dass die Rationalisierung des Konstruktionsprozesses auch im Hinblick auf die Ermöglichung des Rechnereinsatzes vorangetrieben wurde.

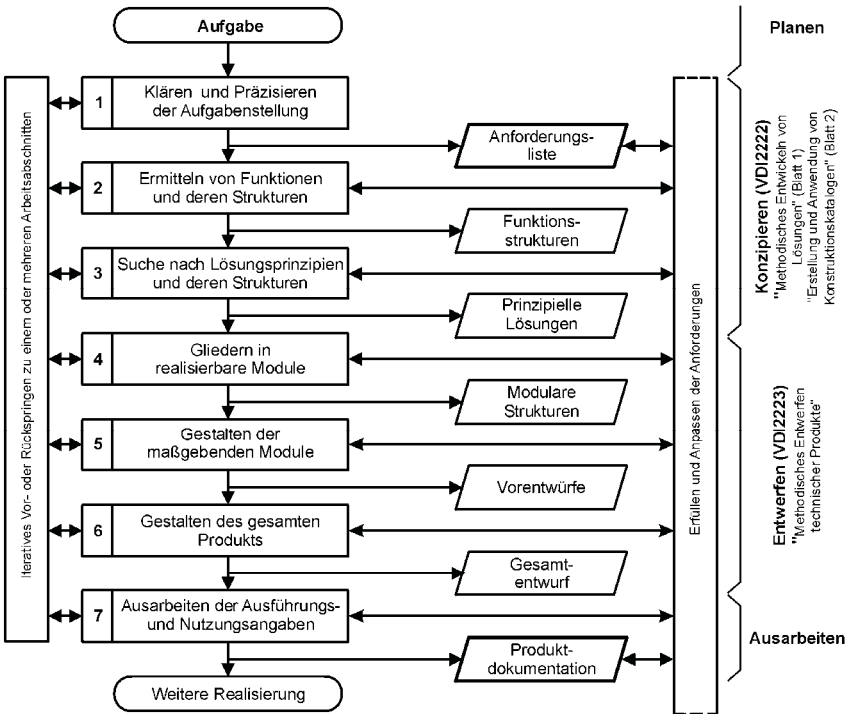


Bild 1: Vorgehen bei der Produktentwicklung nach VDI 2221 [1] und Eingliederung der vertiefenden Richtlinien VDI 2222 [4] und VDI 2223 [5]

Heymann teilt die Vertreter der Konstruktionsmethodik je nach dem Grad, in dem den systematischen bzw. physikalisch orientierten Ansätzen gegenüber den heuristischen bzw. intuitiven Ansätzen ein absoluter Vorrang eingeräumt wird, in „strikte“ (z. B. Rodenacker, Roth, Koller) und „flexible“ Methodiker ein, zu denen Pahl und Beitz zählen. Die Unterschiede zwischen den Lehrbüchern bestehen in den einzelnen Methoden, die den Phasen des Konstruktionsprozesses zugeordnet sind, im Wesentlichen Methoden zur Identifikation von Prinziplösungen, aber auch Regeln zur Gestaltung. Die von den verschiedenen Vertretern vorgeschlagenen Phasenmodelle sind jedoch unabhängig von Heymanns Einteilung vergleichbar bzw. so ähnlich, dass eine Zusammenführung der Modelle in den VDI-Richtlinien 2221, 2222 und 2223 [1, 4, 5] möglich war (vgl. Bild 1). Auffällig gegenüber den Darstellungen der Lehrbücher bis zur Veröffentlichung der VDI

2221 ist, dass dort im Gegensatz zu einem streng linearen Ablauf ein iteratives Vorgehen empfohlen wird, bzw. explizit darauf hingewiesen wird, dass diese Iteration in der Praxis unumgänglich ist [1]. Heymann vermutet, dass dies eine Reaktion an der Kritik der Konstruktionsmethodik sei, dass ein Konstruieren nach einem starren Ablaufplan „realitätsfremd und undurchführbar“[1] sei [2].

3 Anwendbarkeit und Grenzen des AKP

Trotz der offenkundig am AKP geübten Kritik scheint dieser durch die VDI Richtlinien und durch die gute Verbreitung der Lehrbücher, insbesondere von Pahl und Beitz [8], die den AKP nach der VDI-Richtlinie in ihrem Lehrbuch übernommen haben, in der Praxis der Produktentwicklung anerkannt und (auch im englischsprachigen Ausland [9]) verbreitet zu sein. Zur Klärung dieses scheinbaren Widerspruchs sollen daher zunächst die Anwendbarkeit und Grenzen beleuchtet werden.

3.1 Anwendung des AKP als Idealtypisches Beispiel

Die Konstruktionswissenschaft ist die philosophische Betrachtung der Tätigkeit des Konstruierens, mit dem Ziel, über die Erlangung von Erkenntnissen praktischen Nutzen für die Konstruktionspraxis zu erzielen. Insofern liegt es nahe, dass sich Methodiker je nach persönlichem Bildungshintergrund bewusst oder unbewusst auf die philosophischen Lehren des eigenen Kulturkreises beziehen. Der Ansatz, ein einheitliches Phasenmodell als Verallgemeinerung des Konstruktionsprozesses darzustellen, entspricht der Ideenlehre Platons. Der AKP wäre somit die *Idee* bzw. *Urbild* (=Paradigma) im Sinne einer höheren Wahrheit; nicht dinglich, sondern ein geistiges Prinzip [10]. Tatsächliche Konstruktionsprozesse sind entsprechend *Erscheinungen* bzw. *Nachbildungen* dieses Ideals in der „sinnlichen“, also „realen“ Welt, die nicht mit diesem identisch sein müssen; es ist jedoch enthalten, siehe auch *Höhlengleichnis* [11]. Laut Platon besteht zwischen Urbildern (paradeigmata) und ihren Nachbildungen (eidôla) ein Verhältnis der Ähnlichkeit.

[1] Ob und in welchem Ausmaß eine derartige Kritik tatsächlich belegbar geäußert wurde oder wird, ist den Autoren nicht bekannt; das Zitat stammt aus [2], Seite 380, wo das Vorliegen dieser Kritik zumindest angenommen wird. Allerdings deckt sich diese Aussage mit dem, was gemeinhin als „Einzelberichte“ bezeichnet bzw. nach eigener Erfahrung der Autoren gelegentlich verbal geäußert wird.

Auch wenn man als Techniker nicht willens ist, sich mit der Philosophie als Domäne auseinanderzusetzen, sollte doch zumindest für Akademiker der Nutzen für die Lehre erkennbar sein. Das Vermitteln eines idealtypischen Leitbildes, das wesentliche Eigenschaften einer jeden Ausprägung aufweist, ist in der Lehre erheblich effizienter, da nicht jeder Sonderfall des Konstruktionsprozesses gesondert dargestellt werden muss. Es ist auch effektiver, da es den Anwender nicht nur in die Lage versetzt, Prozesse aus der Praxis zu analysieren, sondern Erkenntnisse auf die Definition neuartiger Prozesse anzuwenden. Insofern muss eine Kritik des AKP als grundsätzlich „realitätsfremd und undurchführbar“ unbedingt zurückgewiesen werden, weil dieses Leitbild nicht für die unmittelbare Umsetzung bestimmt ist.

3.2 Verhältnis des AKP zur Änderungs- und Variantenkonstruktion

Trotzdem ist ein Teil der Kritik durchaus berechtigt, bedenkt man den Absolutheitsanspruch, der durch die Bezeichnung „Allgemeiner Konstruktionsprozess“ erhoben wird. Tatsächlich zielt in der industriellen Praxis ein erheblicher Anteil der Konstruktionsprozesse bzw. Projekte nicht auf neuartige Lösungen, sondern strebt die exakte Wiederverwertung einer vorhandenen Lösung, mindestens aber die Wiederverwertung vorhandener Elemente an. Aus Unternehmenssicht ist in den meisten Fällen die Erarbeitung einer neuartigen Lösung, auf die der AKP ja wie dargestellt abzielt, nur ein letzter Ausweg, wenn die technischen oder wirtschaftlichen Anforderungen nicht durch vorhandene Lösungen abgedeckt werden oder das Unternehmen vom Markt zu Innovationen gezwungen wird. Die Zielsetzung von *Änderungs-* oder *Variantenkonstruktionen*[2] (deren Existenz auch von den Methodikern nie bestritten wird) läuft also diametral mit der des AKP auseinander, womit erklärbar wird, dass der AKP auch als Leitbild nicht zur Beschreibung derartiger Konstruktionsprozesse geeignet ist.

[2] Als Maßzahl für die wirtschaftliche Bedeutung dieser Konstruktionsarten bzw. allgemein die Bedeutung der Wiederverwertung von im Unternehmen vorhandenen Lösungen im Verhältnis zu Neukonstruktionen könnte der Aufwand betrachtet werden, der aktuell von Unternehmen des Maschinenbaus in Projekte zum Product Data Management oder Variantenmanagement investiert werden und diese mit Investitionen in die Grundlagenforschung und Vorentwicklungen vergleicht.

3.3 Lösungs- und Problemorientierte Konstruktionsprozesse

Die beiden Vorgehensweisen der Neukonstruktion gemäß dem AKP und der Variantenkonstruktion in der Praxis entsprechen den beiden gegensätzlichen Kategorien, in die sich nach Wynn und Clarkson Strategien zum Erreichen eines Entwicklungs- bzw. Gestaltungszieles einteilen lassen:

- Nach dem *Lösungsorientierten Ansatz* wird eine erste Lösung vorgeschlagen, analysiert und dann in wiederholten Schritten verändert, während die Randbedingungen und die Anforderungen angenähert werden.
- Nach dem *Problemorientierten Ansatz* wird das Problem abstrahiert und gründlich analysiert, bevor ein Feld von möglichen Lösungen generiert wird [12, 6].

Der funktionsorientierte Ansatz des AKP entspricht also dem grundlegenden Typ des problemorientierten Vorgehen, was sich mit der Definition der Funktion des zu entwickelnden Produkts als Entwicklungsaufgabe und damit als zu lösendes Problem vereinbaren lässt. Der AKP ist aber ein Sonderfall des problemorientierten Vorgehens, da er nur anwendbar ist auf Probleme, die sich im Sinne der Funktionsanalyse bzw. -synthese so abstrahieren und zerlegen lassen, dass sich für die Teilfunktionen/-probleme Lösungen identifizieren lassen, die wiederum zusammengefügt als Gesamtlösung die Gesamtfunktion erfüllen [6]. Dies ist in Übereinstimmung mit zumindest allen genannten Autoren zur Konstruktionsmethodik für die sog. technische Funktion der Fall.

Obwohl also das problemorientierte Vorgehen sozusagen zum Paradigma des systematischen Vorgehens in der Konstruktion geworden ist, entsprechen viele Konstruktionsprozesse in der Praxis „als Ganzes“ dem lösungsorientierten Vorgehen. Als Beispiel sie der Fall genannt, dass ein OEM für Computernetzteile bei einem Lieferanten die Herstellung und Lieferung von Lüftern mit einem bekannten Anforderungsprofil bestellt. Der Lieferant hat in der Regel in der Vergangenheit schon zahlreiche Lüfter mit ähnlichen Leistungsspezifikationen hergestellt und wird daher die Strategie verfolgen, die vorhandene Lösung im eigenen Datenbestand zu identifizieren und soweit nötig, direkt auf Gestaltebene (also nicht auf Prinzipebene!) zu modifizieren, sollte dies zur Erfüllung des Anforderungsprofils nötig sein.

Aber auch „im Kleinen“ ist das lösungsorientierte Vorgehen in der Konstruktion bekannt und üblich. So ist das heuristische Finden einer Teil- oder Prinziplösung auch im Rahmen eines Vorgehens gemäß des AKP lösungsorientiert[3].

Als Zwischenergebnis lässt sich also festhalten, dass der AKP tatsächlich nicht *Allgemein* in dem Sinne ist, dass er als Idealtypisches Leitbild für sämtliche praxisrelevante Konstruktionsprozesse eignet. Das lässt sich aus der historischen Entwicklung und Zielsetzung zwar damit erklären, dass die Zielsetzung ausschließlich die Konstruktion *neuer* Produkte war, sollte aber im Sinne einer für die Anwendung konzipierten Konstruktionsmethodik behoben werden.

Aber auch für die Entwicklung von neuen Produkten hat die Anwendbarkeit des AKP als Leitbild seine Grenzen, und zwar dann, wenn die Entwicklung nicht überwiegend technische Produkte betrifft und der Ablauf des Entwicklungsprozesses durch die Arbeitsweisen beteiligter Designer mitbestimmt wird. In den 1980er Jahren wurde angesichts der wachsenden Anerkennung des Beitrags des Industrial Design zum Erfolg von Produkten und einer fehlenden allgemein anerkannten Theorie des Industrial Design vom VDI eine Richtlinie 2424 „Industrial Design - Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen“ erarbeitet, deren Zielsetzung es war, dem „beteiligten Ingenieur Anteil und Wirkungsweise des Industrial Design bewusst zu machen“ [13]. Im ersten Blatt wurden Begriffsbestimmungen vorgenommen, die teilweise auch vor dem Hintergrund der fortgeschrittenen Entwicklungen zur Design-Theorie noch Gültigkeit haben. Nach Fallbeispielen zur Verdeutlichung der dargestellten Zusammenhänge im zweiten Blatt der Richtlinie wird im dritten Blatt der Versuch unternommen, einen „Industrial-Design-Prozess“ zu beschreiben. Dabei wurde der Versuch unternommen, das problemorientierte Vorgehen des AKP auf die Arbeit des Designs zu übertragen, der aufgrund unüberbrückbarer Widersprüche letztlich als gescheitert erkannt wurde. Zu einem ähnlichen Ergebnis führen auch die Anstrengungen des Designlehrers Heufler, den Vorgehensplan der VDI 2221 auf die Tätigkeit des Designers anzuwenden [14], wie auch der Designtheoretiker Bürdek seinen entsprechenden Ansatz von 1975 [15] im Jahre 2005 widerruft [16]. Brezing kommt nach einer Recherche zu Theorien zu Designprozessen zu

[3] Mit dieser Feststellung ließe sich Heymanns Kategorisierung in *strikte* und *flexible* Methodiker formulieren als solche, die ausschließlich problemorientiertes Vorgehen zulassen bzw. solche, die auch lösungsorientiertes Vorgehen erlauben.

dem Ergebnis, dass das Design im Wesentlichen lösungsorientiert arbeitet, da die Aufgaben bzw. Funktionen des zu entwickelnden Produkts, die durch die Arbeit des Designs realisiert werden, sich nicht sinnvoll wie bei der technischen Funktion abstrahieren und zerlegen lassen, um sie als Teilaufgaben zu lösen.

4 Erfahrungen in der Lehre

Der Lehrstuhl für Allgemeine Konstruktionstechnik der RWTH Aachen ist in der interessanten Situation, auf die konstruktionsmethodische Tradition sowohl des Institutsgründers Koller als auch von Pahl und Beitz zurückgreifen zu können, da der Nachfolger von Professor Koller Jörg Feldhusen bei Prof. Beitz promoviert hat und seit einigen Jahren als Herausgeber des Lehrbuchs von Pahl und Beitz tätig ist. Dieser Hintergrund spiegelt sich auch in der konstruktionsmethodischen Ausbildung an der RWTH Aachen wieder, die vor allem im Hauptdiplom in der Vertiefungsrichtung „Konstruktion und Entwicklung“ bzw. in der Vertiefung „Konstruktionstechnik“ des neuen Bachelorstudienganges und in einem eigenen Masterstudiengang „Entwicklung und Konstruktion“ angeboten wird.

Die zweisemestrige Hauptvorlesung „Konstruktionslehre“ vermittelt aufbauend auf den ingenieurtechnischen Grundlagen die Konstruktionsmethodik, wobei wie allgemein üblich der Lehrstoff in der Vorlesung in einer großen Breite dargestellt und mit Beispielen veranschaulicht wird, während in den Übungen die Studierenden angehalten werden, die Methoden an Beispielen anzuwenden. Die Struktur der Vorlesung orientiert sich seit der Übernahme von Prof. Feldhusen im Jahre 2000 ganz deutlich am Allgemeinen Konstruktionsprozess, d. h. nach einer Einführung des Phasenmodells werden im Laufe des Semesters in der dort angelegten Reihenfolge die einzelnen Methoden und Hilfsmittel gelehrt, z. B.

- Methoden und Hilfsmittel zur Erstellung von Anforderungslisten
- Funktionssynthese nach Koller
- Erstellen von Teillösungen (z. B. nach Katalogen phys. Effekte (Koller), aber auch nach heuristischen Ansätzen und Analogiebetrachtungen...)
- Konzeptentwicklung (Gesamtkonzept, also z. B. Morphologie...)
- Verfahren zur Bewertung und Auswahl
- ...

Dabei hat sich gezeigt, dass sich diese Chronologie sehr gut für die Phasen der Konzeptentwicklung eignet, weniger aber für den Bereich der Gestaltung. Insbesondere problematisch ist dabei die Synchronisierung der Übung mit der Vorlesung. Während sich Themen wie die oben dargestellten sehr gut einzeln „üben“ lassen, sind einzelne Gestaltungsregeln praktisch nicht völlig getrennt an einem Beispiel darstellbar. Selbst das „üben“ von den an sich praxisnahen Einzelphasen „Gliedern in realisierbare Module“ und „Gestalten der maßgebenden Module“ gelingt nur mäßig befriedigend im Rahmen einer 90-minütigen Übung. Diese Erkenntnisse, die tatsächlich im Lehrbetrieb gewonnen wurden, decken sich mit den Bemerkungen in der VDI 2223, die die dort dargestellte lineare Folge von Arbeitsschritten stark als „übergeordnete Strategie“ relativiert [5]. Aus diesem Grund wird der strenge inhaltliche Zusammenhang zwischen Vorlesung und Übung für die Phase des Entwerfens leicht gelockert. Während sich die Vorlesung nach einer Darstellung der genannten Arbeitsphasen an der für Pahl und Beitz typischen hierarchischen Strukturierung der Konstruktionsregeln in „*Grundregeln*, *Prinzipien* und *Richtlinien* der Gestaltung“ orientiert [8], werden in den Übungen die Grundregeln und Prinzipien gemeinsam an Mechanismen behandelt, während im Anschluss ausgewählte Richtlinien an der Detaillierung von Einzelteilen und Baugruppen demonstriert werden (z. B. Schweißgerecht, Kunststoffgerecht, Montagegerecht etc.).

Insgesamt stellt sich trotz der genanten Einschränkungen der AKP als außerordentlich gut geeignet dar, wesentliche Methoden der Konstruktion (oder auch der „ingenieurmäßigen Produktentwicklung“) zu vermitteln. Einerseits eignet er sich überwiegend für die ursprünglich vorgesehenen Zweck als „methodisches Gedankengerüst“, an dem die zahlreichen Einzelmethoden der Konstruktionsmethodik „befestigt“ werden, andererseits ist das problemorientierte Vorgehen tatsächlich für den Anfänger neu und muss daher studiert werden. Das Lösungsorientierte Vorgehen wird hingegen ohnehin mehr oder weniger erfolgreich intuitiv bzw. unreflektiert von nicht methodisch geschulten Konstrukteuren angewendet.

Als Beleg für die große Relevanz des AKP für die Ausbildung von Ingenieuren in der Produktentwicklung sollen Erfahrungen aus einer vertiefenden Lehrveranstaltung „Kollaborative Produktentwicklung“ genannt werden, die der Lehrstuhl als gemeinschaftlichen Kurs mit der Hongik University in Seoul, Süd Korea durchführt [17]. Im Rahmen dieses Kurses werden deutsche und koreanische Studierende der Ingenieurwissenschaften und Koreanische Studierende des Industrial-Designs in Teams

zusammengefasst, um in einer Wettbewerbssituation innerhalb eines Semesters ein Konzept für ein elektrisch betriebenes Fahrzeug zu entwickeln. Neben den ungewohnten Herausforderungen für die deutschen Teilnehmer durch das Arbeiten über sprachliche und kulturelle Grenzen hinweg und in verschiedenen Zeitzonen, was im Wesentlichen durch Web-basierte Kommunikationstools und den Einsatz von PDM-Systemen realisiert wird, ist vor allem die Projektform für die methodisch geschulten Ingenieure ungewohnt. Es existiert zu Beginn des Projekts, das vom Charakter eher eine Produktplanung als eine Produktentwicklung darstellt, keine im Sinne des AKP klare Aufgabenstellung, da diese erst im Laufe des Projekts in Form eines Fahrzeugkonzepts von den Designern definiert wird. Die Ingenieure haben im Projekt die Aufgabe, das vom Design vorgeschlagene Konzept zu validieren, indem die technischen Besonderheiten des Konzepts identifiziert und für diese Besonderheiten abgesicherte technische Konzepte entwickelt und zumindest grob gestaltet in einem digitalen Mockup modelliert werden sollen.

Es zeigt sich, dass die zwar methodisch geschulten aber unerfahrenen Ingenieure stets auf die neue Situation reagieren, indem sämtliche problemorientiert systematischen Ansätze ignoriert und direkt eine beliebige Lösung umgesetzt wird, die sich nicht selten als technisch unbefriedigend herausstellt. Die Gründe für dieses Verhalten ist die im Rahmen des Konzepts der Lehrveranstaltung durchaus gewollte Verunsicherung durch das Vorgehen des Designs, das nicht nur frühzeitig zur Gestalt führt, sondern vor allem technische Lösungen impliziert. Das Konzept des Kurses sieht vor, in regelmäßigen Design-Reviews die vorgeschlagenen Lösungen zu hinterfragen und Alternativlösungen zu verlangen, was dazu führt, dass sich die Studierenden auf das erlernte methodische Vorgehen besinnen und innerhalb des gesamten Projekts die anfallenden Teilaufgaben problem- bzw. funktionsorientiert bearbeiten, Varianten erarbeiten und dokumentieren und nachvollziehbar auswählen. Die Rückmeldungen der teilnehmenden Studierenden am Ende des Kurses bestätigen den Eindruck, dass der AKP und die zugehörigen Methoden in einer neuen Projektsituation Orientierung vermitteln, bei Diskussionen innerhalb des Teams und gegenüber dem „Kunden“ eine gute Argumentationsbasis liefert und letztlich zu besseren Lösungen führt. Insgesamt wird sogar regelmäßig geäußert, dass die Anwendung der erlernten Methodik in diesem Kontext insgesamt die Motivation gegenüber dem Eintritt in das Berufsleben steigert, da den Teilnehmern die eigene Kompetenz bewusst gemacht wurde.

5 Ergebnis

Trotz der anteilsmäßig geringen unmittelbaren Übertragbarkeit des Allgemeinen Konstruktionsprozesses (AKP) auf die Gesamtheit realer Konstruktions- bzw. Produktentwicklungsprozesse in der Praxis kommen die Autoren zum Ergebnis, dass dieser als ein idealtypisches Modell gültig und unverzichtbar ist. Der wesentliche Grund für dieses Ergebnis ist, dass der AKP als problemorientierter Ansatz zur Lösungserarbeitung nicht intuitiv ist und daher gelehrt werden muss. Selbst wenn der Anteil der Konstruktionsaufgaben, bei denen die Entwicklung eines neuartigen technischen Konzepts gefordert ist, in der Praxis gering sein mag, ist der Ansatz des problemorientierten Vorgehens für jede technische Aufgabenstellungen vor allem für wenig erfahrene Konstrukteure hilfreich und verleiht dem Anwender letztlich Sicherheit, was nicht zuletzt die persönliche Motivation steigern kann. Schließlich stellt diese spezielle Ausprägung des problemorientierten Vorgehens, die sich aus den Möglichkeiten der Abstraktion und zergliederten Bearbeitung der Konstruktionsaufgabe ergibt, für die Lehre ein praxiserprobtes Gedankengerüst dar, das eine für die Studierenden nachvollziehbare Verknüpfung der vermittelten Einzelmethoden bildet.

Allerdings zeigt sich, dass die Konstruktionsmethodik mit dem AKP als einzigen idealtypischen Prozess unvollständig ist, da, wie gezeigt wurde, auch lösungsorientierte Ansätze sowohl für rein technische Entwicklungsprozesse als auch für Projekte unter Mitwirkung des Designs relevant sind. Aus diesem Grund kommt diese Betrachtung zum Ergebnis, dass dem AKP ein Idealtyp eines lösungsorientierten Prozesses gegenübergestellt werden muss. Eine solche Paarung von zwei gegensätzlichen Idealtypen würde es erlauben, jedwedes konkretes Prozessbeispiel aus der Praxis einzuordnen und zu erklären.

Literatur

[1] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag, 1993.

[2] Heymann, Matthias: <<Kunst>> und Wissenschaft in der Technik des 20. Jahrhunderts: Zur Geschichte der Konstruktionswissenschaft. Zürich: Chronos, 2005. – ISBN 3-0340-0723-X

[3] DFG Jahresbericht 2007.

[4] VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Prinziplösungen. Berlin: Beuth Verlag, 1997.

[5] VDI-Richtlinie 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth Verlag, 2004.

[6] Brezing, A.: Planung innovativer Produkte unter Nutzung von Design- und Ingenieursdienstleistungen. Diss. RWTH Aachen: Shaker, 2005. - ISBN 3-8322-4986-9

[7] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau, 4. Aufl. Berlin: Springer, 1998. - ISBN 978-3-5405-7928-1

[8] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[9] Clarkson, J., Eckert, C.: The Reality of Design, in: Clarkson, J., Eckert, C.: Design Process Improvement. Cambridge: Springer, 2005. - ISBN 978-1-85233-701-8

[10] http://de.wikipedia.org/wiki/Ideenlehre. Letzter Zugriff: 7.08.2008

[11] http://de.wikipedia.org/wiki/H%C3%B6hlengleichnis. Letzter Zugriff: 7.08.2008

[12] Wynn, D., Clarkson, J.: Models of Designing, in: Clarkson, J., Eckert, C.: Design Process Improvement. Cambridge: Springer, 2005.

[13] VDI-Richtlinie 2424: Industrial Design - Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen. Berlin: Beuth-Verlag, Blatt 1, 2: 1986, Blatt 3: 1988.

[14] Heufler, G.: Produkt-Design:…von der Idee zur Serienreife. Linz: Veritas, 1987. - ISBN 3-85329-552-5

[15] Bürdek, B.: Einführung in die Designmethodologie. Hamburg: Redaktion Designtheorie, 1975.

[16] Bürdek, B.: Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung. Basel: Birkhäuser, 2005. - ISBN 978-3-7643-7028-2

[17] Feldhusen, J. Brezing, A., Bungert, F., Löwer, M., Yim, H., Lee, K.: An Interuniversitary Education Concept For Collaborative Product Development, in: Clarke, A., Evatt, M., Hogarth, P., Lloveras, J. Pons, L.: New Perspectives in Design Education. Barcelona: Artyplan Global Printers, 2008

Autorenverzeichnis

Abramovici, Michael 221
Alber-Laukant, Bettina 31
Arnoscht, Jens 109
Bader, Rainer 241
Beyer, Christiane 251
Binz, Hansgeorg 169
Birkhofer, Herbert 211
Bitzer, Michael 179, 339
Brezing, Alexander 371
Brix, Torsten 129
Bröckerhoff, Markus 119
Brockmeyer, Henrich 315
Brökel, Klaus 11, 241,291
Bungert, Frederik 201
Callsen, Riklef 85
Corves, Burkhard 129
Deger, Rupert 327
Dehen, Frank 73
Deimel, Markus 149, 271
Dörnhöfer, Andreas 31
Drechsel, Frank 41
Eigner, Martin 179, 339
Faßbender, Sven 119
Feldhusen, Jörg 73, 201, 361, 371
Gärtner, Thomas 85
Göpfert, Jan 351
Grote, Karl-Heinrich 19, 251
Hadler, Jana 11
Hadzhiyski, Vilhelm Milkov 263
Hanusch, Dirk 211
Hochstein, Niklas 179
Hüsing, Mathias 129
Jung, Robert 305
Kern-Trautmann, Andreas 51
Kind, Christian 191
Kipp, Thomas 159
Kliewe, Christian 241
Kloppenburg, Johannes 129
Krause, Dieter 159
Künne, Bernd 281
Lenders, Michael 59, 109
Lindow, Kai 191
List, Stefan 351
Lucko, Andreas 315
Mantwill, Frank 315
Meimann, Valentin 221
Müller, Jochen 59
Nagarajah, Arun 361
Nussbaum, Christopher 59
Oertelt, Stephan 19
Prüfer, Hans-Peter 231
Rehan, Ahmad 251
Richard, Tim 281
Rieg, Frank 31, 97
Rohleder, Norbert 85
Roith, Bernd 97
Saske, Bernhard 1
Schlick, Christopher M. 85
Schnegas, Henrik 139
Schöne, Christine 305
Schuh, Günther 59, 109
Schulz, Ingo 51
Stark, Rainer 191
Steger, Wolfgang 1
Stelzer, Ralph 1, 305
Vielhaber, Michael 179, 339
Watty, Robert 169
Wegmann, Roland 291
Woll, Robert 191
Wörnle, Christoph 241
Zapf, Jochen 31
Zimmermann, Martin 97