

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

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



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

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

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012



STAATLICHE
KUNSTSAMMLUNGEN
DRESDEN

technischesdesign.org

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

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

ENTWICKELN – ENTWERFEN – ERLEBEN.

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)

Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)

Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)

Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)

Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei

ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

ma design
//ENGINEERING

xPLM
Solution

TEDATA

Continental 

B.I.M.
consulting

REISS

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Layout: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.

Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Inhalt

| | |
|----|--|
| 13 | Vorwort |
| 15 | Heinz-Simon Keil Ganzheitlicher »Produkt-Entwicklungs-Prozess« beeinflusst nachhaltig das schlanke »Life-Cycle-Management« – From Lean to Digital Approach |
| 29 | Alfred Katzenbach & Peyman Merat Methodik zum Austausch eines CAD Systems in einem Großunternehmen |
| 37 | Martin Eigner, Torsten Gilz & Radoslav Zafirov Interdisziplinäre Produktentwicklung |
| 55 | Bodo Machner Neue Produkte, neue Märkte, effizientere Prozesse – Herausforderungen an das Produktdatenmanagement |
| 71 | Ernst-Eckart Schulze, Lars Wolter, Haygazun Hayka & Martin Röhlig Intuitive Interaktion mit Strukturdaten aus einem PLM-System |
| 89 | Michael Wegner, Georg Freitag & Markus Wacker GENIAC – Konfigurieren komplexer Produktsimulationen mit Hilfe von natürlichen Benutzeroberflächen |

| | |
|-----|---|
| 103 | Michael Abramovici & Jens Christian Göbel Systematisierung und Evaluation von Gestaltungsalternativen für die Harmonisierung firmenspezifischer PLM-Umgebungen |
| 123 | Christiane Kamusella Digitale Ergonomie-Tools zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte im Produktentstehungsprozess |
| 145 | Ingolf Rehfeld & Jan Wunderlich Virtual Reality und Product Lifecycle Management – Entwicklung eines durchgängigen Prozesses für die BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH |
| 153 | Ralph Stelzer, Wolfgang Steger & Dirk Petermann Virtual Reality als zentrale Komponente einer PLM-Strategie – Herausforderungen und Umsetzungskonzepte |
| 177 | Michael Muschiol & Stefan Schulte Globale Collaboration im Kontext mit PLM |
| 195 | Andreas Seibold, Ralph Stelzer & Bernhard Saske Virtual Reality bei Kärcher |
| 207 | Uwe Freiherr von Lukas Visual Computing als Basis für Prozessinnovation im Produktlebenszyklus |
| 225 | Detlef Gerhard & Touba Rahmani PDM based Lifecycle Analysis – A Case Study |
| 237 | Wolfgang Holle, Stephan Husung & Christian Weber CAD-Produktmodell – Quelle der Produktbewertung nach Zeit und Kosten |

| | |
|-----|--|
| 251 | Markus Färber, Johannes Ghiletiuc, Peter Schwarz & Beat Brüderlin Echtzeit-Visualisierung von sehr großen Virtual- und Augmented-Reality-Szenen auf Smartphones und mobilen Tablet-Computern |
| 267 | Hans-Peter Prüfer Quo vadis, FEM? |
| 281 | Petra Hoske, Günter Kunze, Kai Bürkle, Martin Schmauder, Mark Brütting & Christian Böser Interaktiver Simulator für mobile Arbeitsmaschinen – Virtuelle Prototypen im Einsatzkontext erleben |
| 303 | Ingo Jonuschies & Klaus Brökel Ansatz für die Modellierung und Simulation von Hybridgleitlagern für Wellen mit großen Durchmessern und geringen Drehzahlen am Beispiel einer Windkraftanlage |
| 315 | Christoph Wehmann, Florian Nützel & Frank Rieg Auslegung von Dehnschrauben bei plastischem Materialverhalten unter Einsatz der Finite-Elemente-Analyse |
| 333 | Denis Polyakov & Willi Gründer Design Process Management |
| 351 | Christine Schöne & Ralph Stelzer Reverse Engineering in der Produktentwicklung – Aktuelle Herausforderungen |
| 365 | Jörg Szyszka, Dietmar Süße & Christine Schöne CAE Methoden in der Einarbeitungsphase der Blechumformung |

| | |
|-----|--|
| 377 | Petra Aswendt Mikrospiegel basierte 3D Scannersysteme für Reverse Engineering Lösungen in einem weiten Skalenbereich |
| 385 | Gunter Sanow, Oliver Erne & Hagen Berger Optische 3D-Messtechnik zur Schwingungsanalyse an Windkraftanlagen |
| 395 | Jürgen Gausemeier, Christian Tschirner, Roman Dumitrescu & Tobias Gaukstern Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem als Basis für eine erfolgreiche Produktentstehung |
| 413 | Bernd Neuschel, Matthias G. Raith & Sándor Vajna Moderne Produktentwicklungsprozesse als Grundlage für universitäre Gründerförderung |
| 425 | Sebastian Schubert, Jan Erik Heller & Jörg Feldhusen Produktmerkmale in der Entwicklung von kundenindividuellen Produkten |
| 441 | Rolf Klamann Mobility 2.0 — Driving assistance simulation for Zero accidents and Electromobility |
| 447 | Janna Hahn, Michael Hazelaar & Karl-Heinrich Grote Unterstützung der eigenschaftsbasierten Fahrzeugkonzeption in der frühen Konzeptphase |
| 459 | Sven Kleiner & Christoph Kramer Entwerfen und Entwickeln mit Systems Engineering auf Basis des RFLP-Ansatzes in V6 |

| | |
|-----|--|
| 475 | Fabian Klink, Rocco Gasteiger, Harald Paukisch & Ulrich Vorwerk Workflow zur generativen Herstellung von Felsenbeinfaksimilemodellen für die Optimierung von Cochlea-Implantat Operationen |
| 483 | Daniel Krüger & Sandro Wartack Ein Werkzeug zur schnellen Konfiguration biomechanischer Simulationen in der Produktentwicklung |
| 501 | Ines Barz & Frank Engelmann Cutane Mikrogewebspartikel – Lösungsansätze für eine neue Technologie zur Behandlung Schwerbrandverletzter |
| 513 | Tibor Bercsey & György Gyurecz Surface Shape Correction by Highlight Lines |
| 527 | Jana Hadler & Klaus Brökel Analyse des monetären und qualitativen Nutzens schwimmender Energiekonverter |
| 537 | Benedikt Posner, Alexander Keller, Hansgeorg Binz & Daniel Roth Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren |
| 549 | Bettina Alber-Laukant, Markus Zimmermann, Florian Nützel, Michael Frisch & Frank Rieg Anforderungen an die grafische Oberfläche eines FE-Systems aus Sicht des Ingenieurs |
| 565 | Jan Erik Heller, Judith Pollmanns & Jörg Feldhusen Bestimmung des Produktentwicklungsaufwands basierend auf Kennzahlen am Beispiel der Luftfahrzeugentwicklung |

- 581 Emanuel Richter, Axel Spickenheuer & Gert Heinrich
Entwicklungs- und Designmethoden für hochintegrale
Leichtbauteile aus Faser-Kunststoff-Verbundmaterial
- 591 Alexander Martha, Uwe Klemme & Peter Köhler
Interdisziplinäre Prototypenentwicklung
am Beispiel eines Seilroboters
- 609 Vilhelm Hadzhiyski & Zviatko Atanasov
Investigation of stressed state
of elastic element of elastic clutch
from three ply reinforced polymer material
- 619 Ralph Stelzer, Erik Steindecker & Bernhard Saske
Kombinierter Einsatz von Augmented Reality
in virtuellen Umgebungen
- 643 Alexander Krauß & Uwe Fischer
Konstruktionsintegrierte Optimierung
mit intelligenten Bauteilfeatures im Dünnschleibereich
- 655 Carsten Böhme, Clemens Lieberwirth & Klaus Brökel
Konzept zum Parametertausch zwischen
unterschiedlichen CAD/CAE-Plattformen
- 665 Victor Gomes, Durval J. De Barba Jr.,
Jefferson de Oliveira Gomes, & Karl-Heinrich Grote
LCA to support decision-making in layout designs
- 677 Thomas Hohnen, Ino Schliefer,
Claudia Gneist & Jörg Feldhusen
Methode zur kennwertgestützten Modularisierung –
Retrospektive Untersuchung der Produktmodularität

- 691 Nikoletta Szélig, Sándor Vajna & Michael Schabacker
Modellierungsmethoden für die Prozessplanung
- 709 Marcel Böttrich, Matthias Sieber & Ralph Stelzer
Numerische Methode zur Bestimmung der
Fahrwerkskonfiguration aus Baukastenkomponenten
- 725 Kevin Kuhlmann, Fabian Klink & Carsten Haugwitz
Optische Vermessung mit Streifenlichtscannern –
aus Industrie und Forschung nicht mehr wegzudenken
- 739 Ute Dietrich, Marc Glauche & Jörg P. Müller
Produktstrukturbeeinflussende Gestaltungskriterien
am Beispiel von Offshore-Windkraftanlagen
- 755 Peter Köhler & Marcin Humpa
Geometrische Umsetzung von Designabsichten
bei der Produktmodellierung
- 771 Jan Brökel
Risikoabwägung im Rahmen
einer Windkraftanlagenentwicklung
- 781 Reimund Neugebauer, Volker Wittstock,
René Heinig, Tino Riedel & Eckhart Wittstock
VR-basierte Serviceanwendungen als
Produkt im Werkzeugmaschinenbau
- 791 Christoph Kneschke & Martin Schmauder
Grundlagen zur methodischen Beurteilung
der montagegerechten Produktgestaltung
anhand virtueller Werkzeuge

Vorwort

In diesem Jahr findet das *Gemeinsame Kolloquium Konstruktions-technik* nun bereits zum zehnten Mal statt. Es ist für mich eine besondere Freude, dass wir dieses Jubiläum in Dresden feiern können. Nach dem zweiten Kolloquium in Pillnitz sowie dem fünften Kolloquium auf der Bastei versammeln sich Vertreter aus Industrie und Hochschule diesmal im Dresdner Residenzschloss. Dabei nutzen wir die Chance, die sich daraus ergibt, dass auch das von uns aller zwei Jahre durchgeführte *Symposium Technisches Design* stattfindet. Im Zusammenschluss der beiden Veranstaltungen laden wir zur Konferenz *Entwerfen – Entwickeln – Erleben* ein.

Ich bin überzeugt, dass wir mit der damit verbundenen thematischen Erweiterung des bisherigen Rahmens der beiden Einzelveranstaltungen den aktuellen Fragestellungen in der Produktentwicklung besonder gut entsprechen. Nach dem Hype des häufig sehr vordergründig technisch und nicht immer auch organisatorisch getriebenen Computereinsatzes in der Produktentwicklung in den 90er Jahren des letzten Jahrhundert, setzt sich immer mehr die Erkenntnis durch, dass die Effizienz der neuen Werkzeuge erst durch eine angepasste Entwicklungsmethodik zu erreichen ist. Dass wir hier noch lange nicht am Ziel sind, zeigt sich in vielen Bereichen. So gibt es viele Versuche, die Konstruktionsmethodik der 70er Jahre

(stark geprägt durch die Arbeiten von Pahl und Beitz) weiter zu entwickeln. Doch viele aktuelle Randbedingungen können wir noch nicht zufriedenstellend berücksichtigen. Das betrifft die verstärkte Konzentration auf die frühen Phasen der Entwicklung und Herausforderungen durch die verteilte und simultane Entwicklung ebenso, wie die immer weiter zunehmende Integration von Simulationsverfahren und insbesondere auch eine unabdingbare ganzheitliche Produktbetrachtung, bei der neben den klassischen mechanischen Komponenten heute natürlich gleichberechtigt elektrische und elektronische Elemente, die Software und auch der Service zu betrachten sind. Im Sinne dieser Konferenz soll hier auch auf die noch immer nicht ausreichende Harmonisierung der methodischen Unterstützung einer funktional ausgerichteten Produktentwicklung und dem Vorgehen im Produktdesign hingewiesen werden.

Wir möchten deshalb dieses Jahr in Dresden gemeinsam Ideen und Lösungsansätze diskutieren, die Methoden und Werkzeuge für alle Phasen der Produktentwicklung zum Inhalt haben. Dies betrifft gleichberechtigt den frühen Entwurf, die sich anschließende funktionale Entwicklung als auch die Berücksichtigung des auf die spätere Nutzung durch den Menschen gerichteten Erlebenswertes. Das sich daraus ergebende breite Spektrum an Themen werden wir in drei parallelen Session, mit den Schwerpunkten der virtuellen Produktentwicklung, der Konstruktionstechnik, des Reverse Engineering und dem Rapid Prototyping sowie dem Technischen Design behandeln.

Die große Zahl von Anmeldungen zeigt, dass wir mit dieser thematischen Ausrichtung richtig liegen. Allen Vortragenden und Gästen danke ich für ihr der Konferenz entgegengebrachtes Interesse. Den Sponsoren der Konferenz danke ich für ihre großzügige Unterstützung. Gleichfalls gilt mein ganz besonderer Dank auch allen Mitarbeitern meines Lehrstuhls, welche sich mit großem Engagement für das Gelingen der Veranstaltung eingesetzt haben.

Ralph Stelzer
Dresden im Juni 2012

Heinz-Simon Keil

Ganzheitlicher »Produkt-Entwicklungs-Prozess« beeinflusst nachhaltig das schlanke »Life-Cycle-Management« – From Lean to Digital Approach

Globalisierung, Urbanisierung, Technisierung (Klimawandel) und Humanisierung (demografischer Wandel) sind Trends, die immer stärker unser Umfeld und Handeln beeinflussen. Dabei werden ganzheitliche, weltumspannende Prozess- und Produktansätze immer entscheidender um die Markt- und Kundenerfordernisse zu erfüllen. Kunden werden verstärkt nachhaltiges Lebenszyklusmanagement fordern, was sich auch immer häufiger in Betreiber-Geschäftsmodellen abbilden wird. Dies wird dazu führen, dass diese Erfordernisse früh in einem ganzheitlichen, globalen Produktentwicklungsprozess abgebildet werden.

Zwei Grundthemen (»Enabler«) werden sein:

- Wissen; weltweite, redundanzfreie, konsistente Verfügbarkeit der Daten
- Befähigung; qualifizierte, selbstständige Mitarbeiter

Daten und Mitarbeiter werden in der nachfolgenden Diskussion immer wieder im Mittelpunkt stehen. Hierzu wird die Notwendigkeit von »Lean«- Prinzipien, -Philosophien erörtert um begeisterte eigenständige Mitarbeiter zu coachen, auch um damit dann die richtigen Geschwindigkeiten sowohl zum Kunden hin als auch in den eigenen Geschäftsprozessen zu erreichen und hierzu dann global die aktuellsten, digitalen Daten zu Verfügung zu haben.

Des Weiteren wird nachhaltiges »Life-Cycle« Management als Schlüssel für gezielte Innovation, globale Wettbewerbsfähigkeit und nachhaltige Kundenbindung aufgezeigt. Diese notwendigen Befähigungen, Erfordernisse und Aspekte verlangen die Adaption der Unternehmen und ihrer Prozesse. Deshalb spielt die Gestaltung von Geschäftsprozessen eine entscheidende Rolle für das Tempo von Innovationen, Marktpräsenz und Produkt-»Ramp-up«. Daher benötigen wir nahtlose, globale Planung von Prozessen und damit verbunden die globale redundante Datenverfügbarkeit. Dies werden wir nicht in allen Fällen selbst erreichen können. Aus diesem Grund sind Systempartnerschaften ein geeignetes Kooperationsmodell um das Innovationstempo aufrecht zu erhalten und die richtigen Impulse für Technologietrends zu generieren, welche eine Führungsposition auf dem globalen Markt sichern. Immer kürzere Innovationszyklen und Technologietrends erfordern vorausschauendes und zügiges Handeln, um auf den neuen, verändernden Märkten Handlungsfreiheit zu haben.

Globale Trends

Die Trends 2005 für die nächste Dekade waren schnellerer Technologiewechsel, anhaltende Globalisierung, abnehmende Ressourcen und wachsendes Wissen. Diese Trends erfordern ein schnelleres, kundenspezifisches Reagieren auf die sich wandelnden Marktgegebenheiten. Gleichzeitig erfordert die e-Business-Welt eine globale und permanente Präsenz in den Informations- und Wissens-Netzwerken rund um den Erdball. Die Trends (Siemens AG; 2012) setzen sich unverändert fort und werden durch neue Ausprägungen wie Urbanisierung ergänzt!

1.1 Globalisierung

- Zwischen 1990 und 2009 hat sich das Volumen des weltweiten Warenhandels mehr als verdoppelt.
- Die Zahl der multinationalen Unternehmen stieg von ca. 10.000 in den Jahren 1968/69 auf 82.100 im Jahr 2008
- Setzen sich gegenwärtige Trends fort, werden die Schwellenländer 2030 zwei Drittel der Weltwirtschaftsleistung erbringen.

- Im vergangenen Jahrzehnt stieg der Preis von Rohstoffen durchschnittlich 20% pro Jahr bei etwa gleichbleibendem Volumen

1.2 Urbanisierung

- 2009: Erstmals in der Geschichte der Menschheit leben mehr Menschen in der Stadt als auf dem Land
- Heute: 320 Millionen Menschen in Megacities (Städte mit mehr als 10 Millionen Einwohnern)
- 2050: 70% der Menschen leben in Städten
- Urbane Ballungsgebiete leisten einen überproportional hohen Beitrag zur Wirtschaft: Tokio erwirtschaftet 40% des BIP von Japan, Paris 30% des BIP von Frankreich

1.3 Klimawandel (Ausprägung Technisierung)

- Die durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche hat sich seit dem 19. Jahrhundert um 0,76°C erhöht
- Die Jahre 2001 bis 2010 waren das wärmste Jahrzehnt seit Beginn der Wetteraufzeichnungen
- Die Treibhausgasemissionen haben sich seit der Industrialisierung massiv erhöht. Heute verzeichnen wir die größte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit 350.000 Jahren

1.4 Demografischer Wandel (Ausprägung Humanisierung)

- Die durchschnittliche Lebenserwartung weltweit steigt an: Von 48 Jahren (1950) auf 69 Jahre (heute)
- Weltbevölkerung wächst um 2 Sekunden um eine Person. 2011 bewohnten 7 Milliarden Menschen die Erde – im Jahr 2050 werden es 9,3 Milliarden sein.
- Bevölkerung der am wenigsten entwickelten Länder wird sich von 0,8 Milliarden (heute) auf 1,7 Milliarden (2050) mehr als verdoppeln
- Generation 65+ wird sich von heute 550 Millionen auf 1,5 Milliarden im Jahr 2050 weltweit fast verdreifachen

Diese Trends interpretiert als anhaltend beschleunigte Globalisierung, abnehmende, knappere Ressourcen, schnellerer Technologie-

wechsel, wachsendes immer während vorhandenes Wissen und steigende Bedeutung der Virtuellen Communities erfordern ein schnelleres, kundenspezifisches Reagieren auf die sich wandelnden Marktgegebenheiten und nachhaltigen Kundenerfordernissen. Gleichzeitig bedingen die schnell wachsenden Potentiale der Social Media eine globale und permanente Präsenz in den Informations- und Wissens-Netzwerken rund um den Erdball.

Life-Cycle Management – Vom Product-Life-Cycle Management zum Life Cycle Management

Wenn wir über globale Produkte (System, Lösung, Dienstleistung) reden ist der Weg zum gelebten, nachhaltigen Produktlebenszyklus nicht weit. Die Lebenszyklusplanung wird in Zukunft das differenzierende Kriterium sein. Deshalb wird das PLM eine immer gewichtigere Rolle unter den Geschäftsprozessen einnehmen. Aus diesem Blickwinkel wird »Product Lifecycle Management« (PLM) als der technologie- und produktportfolioverantwortliche Geschäftsprozess zum Schlüssel für Innovationsführerschaft, Wettbewerbsfähigkeit und Kundenorientierung. Diese Aspekte mit ihren Einflüssen auf die erforderlichen Änderungen und Anpassungen in den Unternehmen, Gesellschaft und Wissenschaft werden uns die nächste Dekade im globalen Wettbewerb treiben. Wesentliche Gestaltungsaspekte im Life Cycle Management werden die Bildung von Systempartnerschaften und die zielgerichtete Anwendung von Plattformbildung sein sowie ein globales Data-Exchange-Management. Systempartnerschaften sind die geeigneten Kooperationsmodelle um das Innovationstempo aufrecht zu erhalten und die richtigen Impulse für Technologietrends zu generieren, welche eine Führungsposition auf dem globalen Markt sichern. Die Plattformbildung bietet die Möglichkeit auch beim Thema kundenspezifische Anpassungen, Preisbildung und Qualität eine andauernde Spitzenposition sowohl als Technologieführer als auch als Preisführer einzunehmen

Globales, redundantfreies konsistentes Produkt-Daten-Management ist die Voraussetzung für standardisiertes Vorgehen und »global collaboration« an jeden Ort der Welt und ermöglicht folglich schnelle Erfüllung der Kundenwünsche, Anpassung an die lokalen

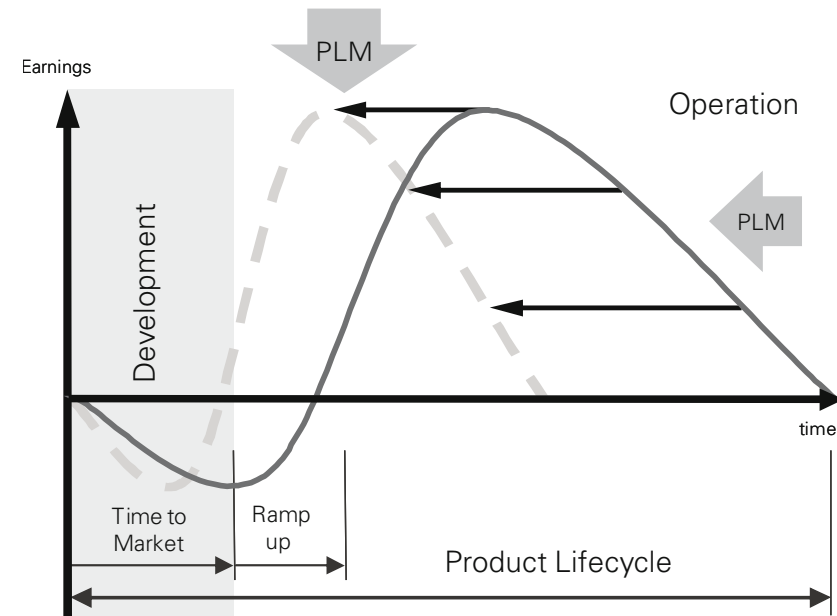


Abbildung 1: Verkürztes Lebenszyklus Management und seine Wirkungen

Markterfordernisse und Möglichkeit der Erfüllung von »local-content« Forderungen durch eigene Wertschöpfung oder/und Einbindung von lokalen und globalen Lieferanten!

Lean Principles

In der traditionellen Welt wird über mehrstufige Planung, Anweisung und Kontrolle geführt. Die »Lean« Welt stellt dieses Prinzip auf den Kopf, da sie davon ausgeht, dass nur derjenige, der einen Prozess durchführt, diesen auch verbessern kann und alle anderen nur dazu da sind ihn dabei zu unterstützen.

Ein weiterer Paradigmenwechsel wird durch Lean forciert; »Fehler sind Schätze« damit werden folgende Fragen

- Wer ist schuld an schlechten Ergebnissen?
- Wer wird für hervorragende Ergebnisse gefeiert?

in den Hintergrund gerückt. Schlechte Ergebnisse sind Chancen und gefeiert wird das gemeinsame Ergebnis und das Team! Die



Abbildung 2: Coachen heißt befähigen; Die Managementpyramide steht auf dem Kopf!

»Lean« Denkhaltung strebt zu einer nachhaltigen Form der Problemlösung, nicht nur Werkzeuge ermöglichen das, sondern vor allem veränderte Verhaltensweisen!

»Glaubensbekenntnis« zu »Lean«

- Der Weg Wissen zu generieren erfolgt durch geplante Experimente
- Lernen geschieht aus Fehlern; Sie sind Chancen
- Ein guter Prozess wird gute Ergebnisse (unique selling point) bringen.
- Streben nach dem perfekten Prozess ist vorrangig
- Standards sind vorübergehend und gehören dem Team.
- Abweichungen werden sofort beim Auftreten gelöst
- Kein Problem zu haben ist für uns das größte Problem

Ergebnis des »Lean Mental Modell«

- Prozesse im eigenen Zugriff können wir verbessern
- Nur perfekte, optimierte Prozesse vergeben wir
- Prozessorientierung bestimmt die Strukturierung; Segmentierung
- Angepasste, prozessorientierte Wertschöpfungstiefe bestimmt die Kernkompetenzen

Erkenntnis: an Abweichungen wird wissenschaftlich herangegangen. Newton fragte nicht »wer hat den Apfel geworfen?«, sondern: »warum fiel der Apfel vom Baum?« und entdeckte so die Schwerkraft. Probleme werden strukturiert und durch eine Gegenmaßnahme gegen die Kernursache gelöst (z.B. Driver Prozess). Idealerweise erfolgt die Problemlösung auf der untersten möglichen organisatorischen Ebene (Arbeitsebene) mit einfachen Mitteln. Das sind die täglichen Hebel der kontinuierlichen Prozessverbesserung (KVP). Die hauptsächlichen Angriffspunkte für exzellente Geschäftsergebnisse und Wettbewerbsfähigkeit liegen in der Produkt- und Prozessentwicklung.

Auf Seite der Produktentwicklung geht es darum Wissen über die Produktfähigkeiten zu generieren (Lean Product Development). Auf Seite der Prozesse geht es darum Wissen über die Prozessfähigkeiten zu generieren (Lean Process development). In beiden Fällen ist Führung der wichtigste Hebel (Lean Mindset). Die Führungskräfte verstehen sich als Mentor ihrer Mitarbeiter in einer lernenden Organisation.

Produktmanagement

Der Produkt(Projekt-)manager ist die verantwortliche Rolle im Life-Cycle Management. Er hat die eindeutige, global, nachhaltige Produktverantwortung! Die Rolle des Produktmanagers ist der konsequente Übergang aus der Funktions- in die Prozessverantwortung! Was heißt das? Der Produkt (Projekt-)manager ist :

- der globale Unternehmer
- treibt die globale Produktstrategie/-portfolio
- verantwortet das Produktbudget und –»roadmap«
- verbesserte den »Product Lifecycle« Management-Prozess
- steuert die globale of Produktadaptierung und -kommerzialisierung
- verantwortet den Produktvertrieb und -konfiguration
- treibt die Standardisierung der Prozesse and Produkt-plattformentwicklung
- Verantwortet die Ressourcenzuordnung für Forschung, Technologie-/Produktentwicklung, globalem/lokaalem Engineering/Konfiguration, Einkauf und Produktion

Über den gesamten »PLM«-Prozess sind die drei wesentlichen Zeitfenster zu steuern über:

- »Time to market«, nur wer zum richtigen Zeitpunkt mit den marktkonformen Produkt-/Lösungs-/Geschäfts-
 - Funktionen
 - Eigenschaften, Merkmalen
- »Product ramp up« im den globalen Wettbewerb an den treffenden Märkten
 - Orten, Regionen, Staaten
 - Kapazität und Geschwindigkeit
- »Product life time« mit den richtigen »unique selling points« zu jeder Zeit der Nutzung des Produkts antritt
 - Verfügbarkeit
 - Nachhaltigkeit
 - Servicefähigkeit

Nehmen wir den Produktmanager als den Architekten des Industrieumfeldes, er steht für Technologie, Design, Marketing, Marktpräsenz und Wirtschaftlichkeit seines Produkts! Seine Rolle wandelt sich je nach Lebensphase seines Produkts zuerst Visionär mit dem Ziel der Veränderung des Marktes durch bestmögliche Funktionen und Eigenschaften, dann Gestalter mit dem Ziel schnell größtmögliches Wachstum und Marktanteile zu gewinnen und dann sehr lange als Bewahrer um vom installierten Bestand und an der Verfügbarkeit zu verdienen!

Speed up (beherrschte Prozesse)

Geschwindigkeit! Was ist das?

Welche Wirkung hat Geschwindigkeit auf die globalen Trends für die nächste Dekade?

Anhaltende Globalisierung: Aus der Triade wurde BRIC und jetzt folgt »N11«! Sprich es entstehen neue Märkte, neue Bedarfe und Anforderungen an die »Operations«. Wenn wir der Strategie »product follows market« folgen, werden wir die lokalen Ansprüche erfüllen müssen. Globale Produktionsnetzwerke in welcher Ausprägung auch immer werden der Alltag sein!

Beschleunigte Urbanisierung: Immer schneller wandern die Menschen in die Städte. Wenn wir heute davon ausgehen, dass wir >600 Städte mit mehr als 1.000.000 Einwohnern haben, welche alle Zuwachs erleben und somit zusätzliche Infrastruktur und Versorgung benötigen, dann heißt das Wachstum! Der Life-Cycle der Infrastruktur-, der Versorgungs- und Entsorgungseinrichtungen vor allem die Verfügbarkeit von Energie, Wasser, Transport ... drängt immer stärker in den Fokus. In China gibt es 200.000.000 Wanderarbeiter, die irgendwann in Städten leben dürfen und schnell sowie nachhaltig versorgt werden wollen! Das erfordert eine gesteigerte Geschwindigkeit für die globale »Supply Chain« mit einem Grenzproblem: Den abnehmenden, limitierten Ressourcen!

Diese abnehmenden, limitierenden Ressourcen treiben eine beschleunigte Technisierung! Die Verknappung der Ressourcen durch immer stärkeren Bedarf wird fort schreiten; mit jedem Mensch der dem Urbanisierungs-Trend folgt entsteht ein erweiterter Bedarf! Durch den Bedarf entsteht eine stetige Rohstoff-Teuerung und dies erfordert ständige Technisierung um damit immer mehr Menschen zu gleichbleibenden Kosten die gewünschte Anwendung zu liefern! Ergebnisse leichtere Autos durch Carbon-Einsatz! Energieeffizienter elektrische Antriebe durch permanent erregte Motoren,...

Humanisierung der Arbeitswelt, war ein Trend in den 80iger Jahren des letzten Jahrhunderts. Dies war jene Zeit in der Toyota die Lean-Ansätze entwickelt hatte und in deren Anwendung überging. Im Zuge der Lean Mental Ansätze, wird von Mitarbeitern ausgegangen die ihre Prozesse verstehen und verändern! Das gleiche Denkmuster stand hinter der Humanisierung der Arbeitswelt als man von der Qualifizierung der Facharbeiter ausging! Also wird Lean dort breite und erfolgreiche Anwendung finden, wo die Qualifizierung der Menschen ein Teil des Gesellschaftsbilds ist. Denn um dies noch einmal zu betonen: das Lean Mental Model stellt qualifizierte, selbstständige Mitarbeiter, die kontinuierlich bestrebt sind ihre Prozesse und Produkte zu verbessern, in den Mittelpunkt!

Alle die Trends erfordern eine Geschwindigkeitsdenken und Verhalten, denn es wird keine Guten und Schlechten (Prozesse, Geschäfte..)

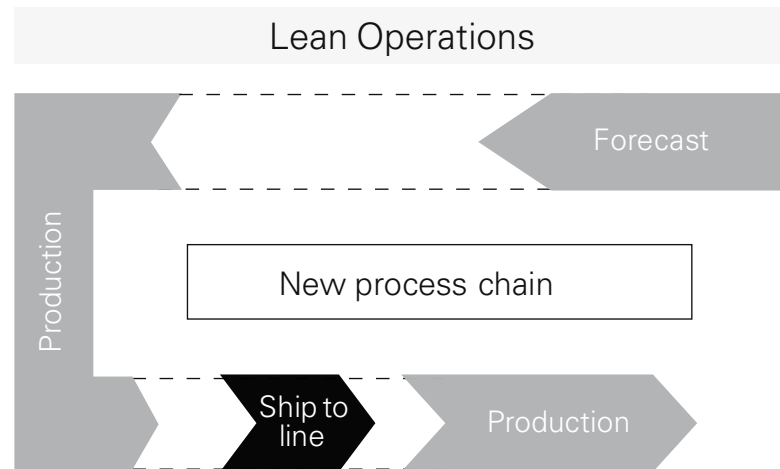


Abbildung 3: Beherrschte Prozesse führen zu einer verkürzten und damit weniger komplexen Lieferkette!

geben, sondern nur Schnelle und Langsame; die Schnellen werden überleben die Langsamen werden die Märkte verlassen!

Die Trends erfordern auch ein schnelleres, kundenspezifisches Agieren in dem sich wandelnden Marktumfeld. Gleichzeitig verlangt die neue e-Business-Welt eine globale und permanente Präsenz in den Informations-, Wissens- und Sozial Media Netzwerken rund um den Erdball. Deshalb werden nur beherrschte Prozesse und globale Strategien die Geschwindigkeitsanforderungen erfüllen; erstens gilt: „*think global, act local*“, zweitens gilt: „*No backward planning, that’s thinking in the past, plan with future trends that’s forward-looking thinking*“

Lean to Digital

Die Trends Technisierung und Humanisierung sind für »Lean to Digital« in der nächsten Dekade treibende Veränderungsfaktoren. Der immer schnellere Technologiewechsel verbunden mit anhaltender Globalisierung erfordert global beherrschte Prozesse und »Workflows«. Um perfekte Prozesse zu erlangen, benötigen wir selbstständige, qualifizierte Mitarbeiter die das ständige, wachsen-

de Wissen umsetzen. Häufig wird zwischen »Lean« und digitalen Anwendungen ein Widerspruch gesehen; das entspricht jedoch nicht der Realität! Die Lean Prinzipien beziehungsweise das Lean Mental Modell sind die Voraussetzung für beherrschte optimierte Prozesse und nur beherrschte Prozesse sollten digital in entsprechenden »Workflows« abgebildet werden;

Bisher galten die folgenden Argumente als Entscheidungsparameter:

- Funktionsorientierte, reduzierte Fertigungstiefe lässt uns aufs Kerngeschäft fokussieren
- funktionsorientierte Finanzkennzahlen bestimmen die Strukturierung/Segmentierung
- Prozesse die nicht wirtschaftlich sind vergeben wir extern

Grundsätzlich sind diese Argumente nicht von der Hand zu weisen! Jedoch ist eine Fertigungstechnologie/-funktion oder der -prozess der Entscheidungsfaktor für die Fertigungstiefe! Wie berechnen wir die Wirtschaftlichkeit eines Prozesses? Sind Finanzkennzahlen nicht meist nach Kostenstellen und damit nach Funktionseinheiten bewertet und bilden damit nicht die Prozesskosten sondern nur eine Funktionssicht ab?

Wenn wir den Lean-Mental-Modell folgen rückt die Prozesssicht immer stärker in den Fordergrund und die Entscheidungsparameter wandeln sich in:

- Prozesse im eigenen Zugriff können wir verbessern
- Nur perfekte, optimierte Prozesse vergeben wir
- Prozessorientierung bestimmt die Strukturierung; Segmentierung
- Angepasste, prozessorientierte Wertschöpfungstiefe bestimmt die Kernkompetenzen

Diese Argumente sind heute bei vielen »hidden champions« der mittelständischen Industrie die angewandten Entscheidungsparameter; Fertigungstechnologien werden im Gesamtprozesskontext gesehen. Die Fertigungstiefe richtet sich nach der Wirtschaftlichkeit

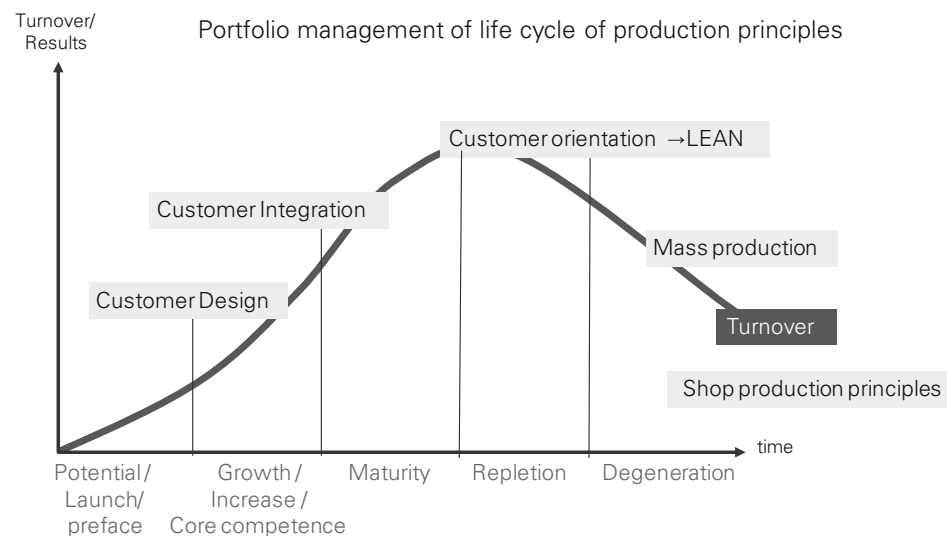


Abbildung 4: Auch Prinzipien unterliegen einem Lebenszyklus!

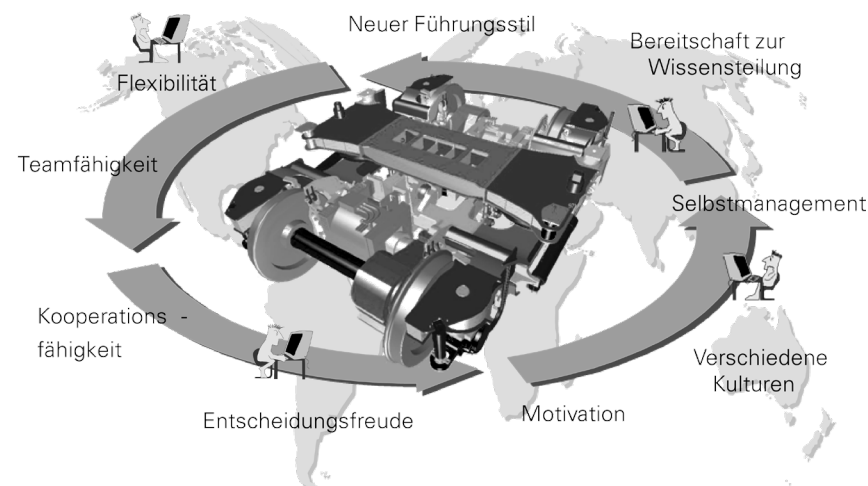


Abbildung 5: Neuer Führungsstil zielt auf die Befähigung der Mitarbeiter um immer breitere Anforderungen erfüllen zu können.

eines Prozesses und nicht nach der einzelnen Funktion! Die kontinuierliche Verbesserung erfolgt anhand einer Prozessbetrachtung (Value-Stream-Design) und nicht eines funktionalen Ausschnitts. Angewandte »Lean-Prinzipien« lassen uns erst das Mögliche oder sogar den perfekten Prozess diskutieren. So verändern wir in kleinen Schritten die Differenz zum »Ist«. Die Segmentierung erfolgt entlang von Prozessketten und »Workflows«, die inzwischen über den gesamten Globus reichen!

Was bisher nur lokal an einer Stelle bzw. in einer Funktion erfolgte ist durch die erweiterten, digitalen Möglichkeiten der neuen Kommunikationswelten sofort jedem Teammitglied global möglich. Es gilt wieder: „*think global — act local*“.

Produktion-Prinzipien unterliegen ebenfalls einer »Life-Cycle« Betrachtung; sieht man diese in einem zeitliche Zusammenhang gelten hier auch die gleichen Einordnungskriterien wie bei jedem Lebenszyklus! (Keil & Schnorr 2011)

Betrachtet man die einzelnen Prinzipien als Produkt gibt es eine klare Einordnung für Lean-Anwendungen und für die digitale Fabrik. Nichtsdestotrotz sind die Lean-Prinzipien auch in den digitalen Prozessanwendungen gültig! Ist für die Lean Anwendungen die Fähigkeit der Mitarbeiter zur Prozessgestaltung das wesentliche Änderungsfeld, so ist es bei den Anwendungen in der digitalen Welt die Datenqualität. Diese wiederum ist wesentlich von den eingebenden Mitarbeitern und deren Qualifikation und Prozessverständnis abhängig!

Summary

Die Trends des 21. Jahrhunderts Globalisierung, Urbanisierung, Technisierung und Humanisierung sind weltumspannend wirksam! Die zuvor diskutierten zwei wesentlichen »Enabler« für die Gesellschaft werden sein

- weltweite, redundanzfreie, konsistente Datenverfügbarkeit
- qualifizierte, selbstständige Mitarbeiter

Die Befähigung der Menschen wird durch die Lean-Prinzipien gestärkt werden. Dies wird jedoch nur über angepasstes Führungsverhalten erreicht werden. Die heutigen Kommunikationsmöglichkeiten die sich rasant (Wissensplattformen, Social Media Welt, Mobile Media,...) weiterentwickeln und immer mehr Menschen zu Verfügung stehen, erfordert höchste Datenverfügbarkeit und -qualität auch in Unternehmen. Um den Kreis zu schließen, muss klar sein, dass diese wiederum nur durch dementsprechende Mitarbeiterqualifikationen erreicht wird.

Einfache Prozessmodelle sollen uns als Leitplanken zum Verständnis kausaler Zusammenhänge in den kollaborativen Prozessanwendungen dienen und helfen diese zu verbessern! Diese Trends erfordern ein schnelleres, kundenspezifisches Agieren, in dem sich wandelnden Marktumfeld. Gleichzeitig verlangt die e-Business-Welt eine globale und permanente Präsenz in den Informations-, Wissens- und Social Media Netzwerken rund um den Erdball.

Literaturverzeichnis

Keil Heinz-Simon; Schnorr Jürgen 2011: Vortrag PLM-World; Las Vegas
Siemens AG; 2012: Unternehmen 2012, Standardunternehmensfoliensatz

Kontakt

Heinz-Simon Keil
Siemens AG
Corporate Supply Chain Management
Vice President CSCM C
St.-Martin-Str. 76
81541 Munich, Germany
Tel.: +49 89 636-88634
Fax: +49 89 636-722554
PC-Fax: +49 (89) 636-700345
Mobile: +49 172 8863031
heinz-simon.keil@siemens.com

Alfred Katzenbach & Peyman Merat

Methodik zum Austausch eines CAD Systems in einem Großunternehmen

Nach einem 10 bis 15 Jahre dauernden Lebenszyklus besteht die Notwendigkeit große IT-Systeme durch eine neue Generation zu ersetzen. Dabei ist es vom Aufwand her unwesentlich, ob es sich um einen Generationswechsel des gleichen Herstellers handelt oder um die vergleichbare Lösung eines anderen Herstellers. Im beschriebenen Fall hat sich die Daimler AG im November 2010 entschieden auf ein anderes CAD-System zu wechseln und die Migration bis Ende 2016 abzuschließen. Der Beitrag zeigt die Vorgehensweise der Umstellung unter fünf Aspekten:

- Anwendungsmethodik inkl. Datenarchivierung
- Datenmigration
- Use-Case-Absicherung
- Rolloutplanung
- Schulungskonzept

Einleitung

Die Daimler AG ist ein weltweites Automobilunternehmen mit einem Produktportfolio von Klein-PKW (Smart) bis hin zu den schweren amerikanischen Überland-Trucks. Die Entwicklungszentren sind, trotz des Schwerpunktes in Deutschland, weltweit verteilt. Das Produktportfolio teilt sich in folgende Geschäftseinheiten auf:

- Mercedes Benz PKW
- Mercedes Benz VAN
- EVOBUS
- Daimler Trucks mit den Einheiten MB Trucks, FUSO und Freightliner

In den selbstständig agierenden Geschäftseinheiten arbeiten die unterschiedlichen Entwicklungszentren mit einer weitgehend gleichen IT-Infrastruktur. So sind die Konstruktionssysteme (CAD/CAM und PDM) in allen Einheiten identisch und werden zentral für eine weltweite Nutzung bereitgestellt und betrieben. Die enge Kopplung zwischen CAD und PDM ist in einem gemeinsamen Prozess integriert, deshalb muss auch bei der Migration dem Zusammenspiel dieser Systeme eine besondere Bedeutung geschenkt werden. Insgesamt sind von dem Wechsel des CAD Systems weltweit ca. 8000 Konstrukteure betroffen.

Anwendungsmethodik inkl. Datenarchivierung

Die größte Herausforderung bei dem Umstieg auf ein neues CAD System liegt in der Anwendungsmethodik des Konstruktionssystems. Die Konstrukteure sind über viele Jahre mit einem System vertraut und haben die Handhabung intensiv trainiert. Dies gilt nicht nur für die Inhouse-Entwicklung, sondern in besonderem Maße auch für die gemeinsame Zusammenarbeit mit den Engineeringpartnern und Systemlieferanten.

Auf der anderen Seite bietet eine solche Migration auch die Chance Anwendungsmethoden, die sich im Laufe der Jahre auseinander entwickelt haben, zu harmonisieren und zu optimieren. Im vorliegenden Fall wurden die einzelnen Tätigkeiten der Automobilentwicklung in ca. 150 unterschiedliche Prozessszenarien klassifiziert. Für jedes dieser Szenarien werden die Anwendungsmethoden unter Verwendung der neuen Funktionalität erarbeitet und dokumentiert. In Einzelfällen konnten daraus auch Anforderungen an die Weiterentwicklung des Systems abgeleitet werden. Insgesamt kommen 250 bis 300 unterschiedliche CAD-Funktionen zum Einsatz. Speziell bei der Methodik für parametrisch assoziative Assemblies spielen dabei die Archivierungsmethoden eine ganz entscheidende Rolle. Die fertig ausgearbeiteten Anwendungsmethoden werden in verschiedenen Formen dokumentiert und können so für Schulungen, Online Trainings, Online-Hilfen und Lieferantenhandbücher genutzt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Methodenentwicklung liegt auf der Prozessgestaltung des Migrationszeitraums. In der Phase des Starts der ersten Baureihe bis zum Abschluss der Migration sind verschiedene Konstellationen vorstellbar, da die einzelnen Funktionsmodule in verschiedenen Fahrzeugbaureihen eingesetzt werden.

Datenmigration

Die Daimler AG verfügt insgesamt über einen CAD Datenbestand von 9 Mio CAD-Modellen mit einem Datenvolumen von ca. 70 Terabyte. Eine komplette Migration aller CAD-Daten ist vom Aufwand her nicht machbar, aber auch nicht notwendig. Es müssen also Klassifizierungen vorgenommen werden, die es erlauben, den Migrationsaufwand zu minimieren. Gleichzeitig gilt es ein Migrationstool zu entwickeln, das besonders bei komplexen parametrischen Modellen ein Höchstmaß an automatischer Datenmigration ermöglicht. Hier sind aber manuelle Nacharbeiten nicht auszuschließen und müssen eingeplant werden. Bereits im Vorfeld hat sich die Daimler AG sehr stark für die Standardisierung des JT-Formates eingesetzt. Im ersten Halbjahr 2012 wird JT als ISO 14306 internationaler Standard veröffentlicht werden. Die Daimler AG archiviert alle CAD-Modelle bereits seit mehreren Jahren parallel als JT-Files. Entsprechend kann auf die Migration freigegebener Modelle, die nicht mehr verändert werden, verzichtet werden. Das neue CAD System wird auch die Möglichkeit bieten JT-Modelle als passive Geometrie in Assemblies zu integrieren und an Konstruktionen vorzunehmen. Auch bei den aktiven Modellen, an denen noch konstruktiv gearbeitet wird, sind Klassifizierungen und angepasste Methoden notwendig, um den Gesamtaufwand der Migration in Grenzen zu halten, ohne die Arbeitsfähigkeit in der Konstruktion negativ zu beeinflussen. Das Vorhandensein aller CAD-Modelle als JT-Files stellt eine gute Möglichkeit zur Langzeitarchivierung dar und reduziert den Datenmigrationsaufwand signifikant. Die Datenmigration kann in verschiedenen Migrationsarten erfolgen. Um die Migrationsnotwendigkeit der einzelnen Datensätze beurteilen zu können, ist eine eindeutige Klassifizierung unter verschiedenen Aspekten notwendig.

Migrationsarten sind:

- Neuaufbau des Datensatzes in dem neuen CAD-System
- Konvertierung der Daten mit einem Konvertierungstool mit manueller Nacharbeit
- Konvertierung der Daten mit einem Konvertierungstool ohne manuelle Nacharbeit mit Dokumentation der Konvertierungslücken
- Keine Konvertierung, sondern alleinige Bereitstellung von JT-Files

Klassifizierungsaspekte für die Zuordnung der Migrationsart sind:

- Komplexität des Datensatzes
- Anzahl der Features
- Anzahl der Assoziativitäten und Parameter
- Modellgröße
- Art des Datensatzes (Einzelteil oder Zusammenbau)
- Status des Datensatzes im Teilelebenszyklus
- Erfahrungswert bezüglich der spezifischen Änderungshäufigkeit
- Verwendung des Datensatzes in den Folgeprozessen

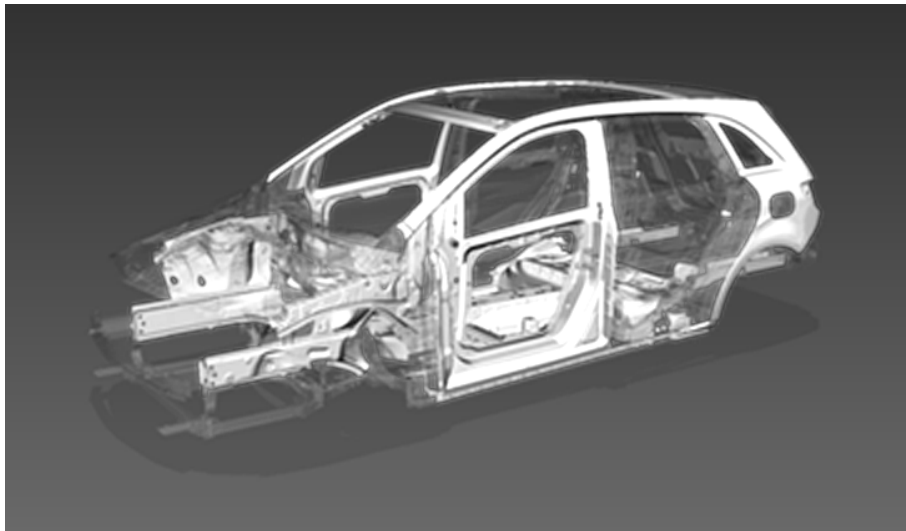


Abbildung 1: Use Case Rohbau: In NX modellierte Karosserie

Abhängig von der ausgewählten Migrationsart sind unterschiedliche Bearbeitungsprozesse mit klaren Service-Level vereinbart. So kann der Aufwand für die Datenmigration klar definiert und abgewickelt werden. Zur Vermeidung unnötiger Migrationsaufwände ist es nötig, in diesem Prozess die Durchlaufzeiten und Bearbeitungsumfänge so verbindlich zu definieren, dass »on demand« die Datenmigration auf eine höherwertige Migrationsart jederzeit nachgeliefert werden kann. Ist der Datensatz auf das neue Format konvertiert, so erhält diese neue Beschreibung der Geometrie die verbindliche Freigabe als Original. Die Beschreibung im alten Format wird bis auf Weiteres als unverbindliche Sekundärgeometrie geführt.

Use Case Absicherung

Die Absicherung der Anwendungsszenarien erfolgt durch die Nachbildung von Referenz-Baugruppen in Siemens-NX und deren Absicherung mit den betroffenen Fachbereichen (siehe Abbildung 1). Die systematische Absicherung der über 150 definierten Use Cases entlang der Prozesskette für die verschiedenen Business Units ermöglicht eine sukzessive Einbindung der Entwicklungsbereiche sowie die Downstream Prozesskette vor dem Rollout. Jeder dieser Use Cases ist eindeutig spezifiziert und dokumentiert. Die Bearbeitung erfolgt gemeinsam zwischen CAD-Experten und Key-Usern aus dem Anwendungsbereich. Die Ergebnisse der Arbeit fließen in die Anwenderschulungen ein und werden gleichzeitig auch für ein »Computer Based Training« in Form von Videosequenzen aufbereitet.

Rolloutplanung

Aufgrund der zunehmenden Vielfalt der Aufbauvarianten auf Basis von gemeinsamen Fahrzeugarchitekturen und gemeinsam genutzten Modulen, hat die Rolloutplanung eine besondere Bedeutung. Im Gegensatz zu früheren Umstellungen ist es nicht mehr möglich, einzelne Baureihen mit dem Vorgängersystem fertig zu entwickeln und neue Baureihen mit der neuen Lösung zu beginnen. Insgesamt ist für den Rollout im PKW-Bereich ein Zeitraum von 2,5 Jahren und im Nutzfahrzeugbereich von 3,5 Jahren vorgesehen. Dies ist nur realisierbar, wenn die beiden oben beschriebenen Themenfelder der

Anwendungsmethoden und der Datenmigration die notwendigen Voraussetzungen liefern. Bei der Rolloutplanung ist vor allem auch der Gesamtprozess in der Produktionsplanung und Erstellung der Produktionsmittel von besonderer Bedeutung. Gleichzeitig muss auch berücksichtigt werden, dass einzelne Entwicklungsbereiche nur in einem begrenzten Zeitraum mit beiden Systemen gleichzeitig arbeiten müssen.

Schulungskonzept

Bei dem Schulungskonzept ist darauf zu achten, dass die einzelnen Anwender möglichst schnell wieder die alte Arbeitsfähigkeit erlangen können. Da es sich bei dem alten und dem neuen System jeweils um ein parametrisch assoziatives CAD-System mit hybridem Modellierungskern handelt, bleibt die Grundphilosophie erhalten. Vorgesehen ist eine relativ kurze Class-Room-Schulung, in der die Grundzüge und die Grundlagen der Modellierungsmethodik vermittelt werden. Für einzelne Anwendergruppen sind spezifische Vertiefungen auf Basis der erarbeiteten Use Cases an ihren konkreten Entwicklungsaufgaben vorgesehen. Die Anwender werden analog der Rollout-Planung zeitnah geschult und danach direkt mit der Arbeit mit dem neuen System zu beginnen. In den ersten Wochen erfolgt eine intensive vor Ort Betreuung durch Support Mitarbeiter.

Zusammenfassung

Insgesamt stellt die Umstellung eines CAD-Systems in einem Großunternehmen eine besondere Herausforderung dar, die methodisch stringent und umfassend vorbereitet werden muss. Es wird erwartet, dass diese Umstellung keinerlei Verzögerungen in den operativen Fahrzeugprojekten induziert.

Auf der anderen Seite ist der Wechsel auf eine neue Systemgeneration unumgänglich. Es ist lediglich die Frage des richtigen Zeitpunktes. Die Daimler AG ist diesen Weg jetzt gegangen, da sich ein Unternehmen mit einer schnellen und konsequenten Migration einen Wettbewerbsvorteil verschaffen kann.

Der bisherige Bearbeitungsstand des Projekts stimmt sehr zuverlässig mit den vorgesehenen Zielen in der geplanten Zeit mit dem prognostizierten Budgetvolumen zu erreichen.

Kontakt

Prof. Alfred Katzenbach
alfred@katzenbach-web.de
www.katzenbach-web.de

Dr. Peyman Merat
Daimler AG
peyman.merats@daimler.com
www.daimler.com

Interdisziplinäre Produktentwicklung

1 Einleitung

Innovative interdisziplinäre Produktentwicklung erfordert ein Überdenken von heutigen Methoden, Prozessen, IT-Lösungen und Organisationsformen. Insbesondere fehlt es an Unterstützung durch geeignete IT-Lösungen für die funktionale Beschreibung und Auslegung von Systemarchitekturen. Für die disziplinübergreifende Systemmodellierung der Konzeptphase gibt es nur eingeschränkte IT-Unterstützung. Elektronik und Software stellen einen immer stärkeren Anteil im Produktentwicklungsprozess (PEP) dar. Konstruktions- und Entwurfsmethoden dieser Disziplinen sollten auf den Prüfstand gestellt und ihre Tauglichkeit für einen moderne interdisziplinären Konstruktionsansatz überprüft werden. Model Based Systems Engineering (MBSE) könnte sich als integrative Methode etablieren und eine Brücke zwischen den verschiedenen Ingenieurdisziplinen bilden. Als »Enabler« für das MBSE werden Systemmodellierungssprachen wie z.B. SysML vorgestellt, die ein Werkzeug für eine interdisziplinäre Systembeschreibung darstellen. Auf konkreterer Stufe können Simulationssprachen, wie z.B. Matlab/Simulink oder Modelica eine frühe multidisziplinäre Simulation ermöglichen, die in Verbindung mit Systembeschreibungssprachen eine frühe Konzeptformulierung erlauben. Dieser Beitrag soll neue Methoden, Prozesse und IT-Lösungen für eine interdisziplinäre virtuelle Produktentwicklung aufzeigen (Anderl et al. 2012).

Model Based Systems Engineering (MBSE) ist ein multidisziplinärer Ansatz mit dem Ziel, eine ausgewogene Systemlösung als Reaktion auf diverse Stakeholder Bedürfnisse zu entwickeln (Friedenthal 2009). MBSE hilft dem Ingenieur den Überblick über komplexe Systeme zu behalten und den Zusammenhang zu verstehen und die Spezifikation und damit alle definierten Anforderungen zu erfüllen. Während klassische Methoden des Systems Engineering papier- oder dokumentenbasiert sind, basiert MBSE auf digitalen Systemmodellen. Diese erlauben die Erfassung der Komplexität und erleichtern den Informationsaustausch unter Disziplinen. Modellierungssprachen ermöglichen eine modellbasierte Spezifikation eines Produktes auf einer allgemeinen Ebene die verständlich für alle an der Entwicklung beteiligten Disziplinen ist. Das Problem der Integration der Komponenten während des Entwicklungsprozesses kann durch die Verwendung solcher Modellierungssprachen möglichst früh in Angriff genommen werden, indem die Definition von Korrelationen zwischen Systemanforderungen, Funktionen, Struktur und Verhalten definiert wird.

Darüber hinaus werden in heutigen Unternehmen die im Entwicklungsprozess anfallenden Daten meist durch Product Lifecycle Management (PLM)-Lösungen verwaltet, so dass die Integration einer funktionalen Produktbeschreibung in PLM die interdisziplinäre Zusammenarbeit frühzeitig unterstützen kann.

2 Ausgangssituation

Die Realisierung der vielfältigen Funktionalitäten von Produkten hat sich in den letzten Jahren von rein mechanischen zu mechatronischen Komponenten verändert. Funktionen und Verhalten als eine neutrale Beschreibung werden mehr und mehr wichtig, wenn es um eine interdisziplinäre Entwicklung geht. Die Komplexität für die Integration mechatronischer Komponenten während des PEP steigt durch die starke Beteiligung der verschiedenen Disziplinen. Darüber hinaus spielt Software eine immer größere Rolle im Kontext der modernen interdisziplinären Produktentwicklung. Kommunizieren Produkte miteinander, wird von Cyber-Physical Systems bzw. cybertronischen Systemen gesprochen. Aktuelle Forschungsinitiativen konzentrieren

sich auf technologische Fortschritte mit Softwareintensiven eingebetteten Systemen in technischen Produkten (Broy 2010). Software wird in Zukunft eine Vielzahl von weiteren Produktfunktionen ermöglichen. Dies setzt eine noch stärkere Einbeziehung des Software-Engineering in den PEP voraus. Deshalb ist es wichtig, die Transparenz zwischen den Disziplinen zu erhöhen. Es fehlt jedoch an etablierten, d.h. industriell eingesetzten, Methoden, Prozessen und IT-Lösungen für die disziplinübergreifende Entwicklung interdisziplinärer Systeme und damit intelligenter und vernetzter Produkte und Produktionssysteme. Dabei hat sich gerade in Deutschland hat sich in den 60er und 70er Jahren eine auf Funktionen basierende Entwicklungsmethodik mit abgeleiteten Entwicklungsprozessen gebildet, die natürlich zu dieser Zeit noch nicht auf formalen Sprachen aufsetzte und schwerpunktmäßig mechanisch geprägt war. Parallel haben sich international im Wesentlichen auf formalen Sprachen basierende Software-Entwicklungsmethoden ausgebildet (siehe Abbildung 1).

Seit den 50er Jahren werden insbesondere bei der amerikanischen Luft- und Raumfahrt und in großen Militärprojekten Systems Engineering (SE) als interdisziplinärer dokumentengetriebener Ansatz, zur Entwicklung und Umsetzung komplexer technischer Systeme in großen Projekten definiert und eingesetzt. Dieser Ansatz wurde aus Sicht der Software- und Elektronikindustrie permanent ausgebaut und bietet heute Modellierungs- und Simulationsunterstützung von komplexen, stark vernetzten Systemen an.

Heute genutzte PLM und ERP Konzepte sind für die Umsetzung der Anforderungen aus der interdisziplinären Produkt- und Produktionssystementwicklung in der frühen Phase des PEP nicht geeignet. Die bisher genutzten Datenmodelle sind zu starr ausgelegt und die Trennung in monolithische Systeme für Entwicklung (PLM), Logistik, Produktion und Personal (PPS, ERP), Kunden- und Zuliefererintegration (CRM, SCM) sind nicht mehr zeitgemäß. Sie ermöglichen nicht mehr die Erfassung der komplexen Zusammenhänge der Produkte selbst, ihrer Wechselwirkung untereinander, sowie ihr Zusammenspiel insbesondere in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses mit zunehmend intelligent auszulegenden Produktions- und Infrastruktur Systemen umzusetzen.

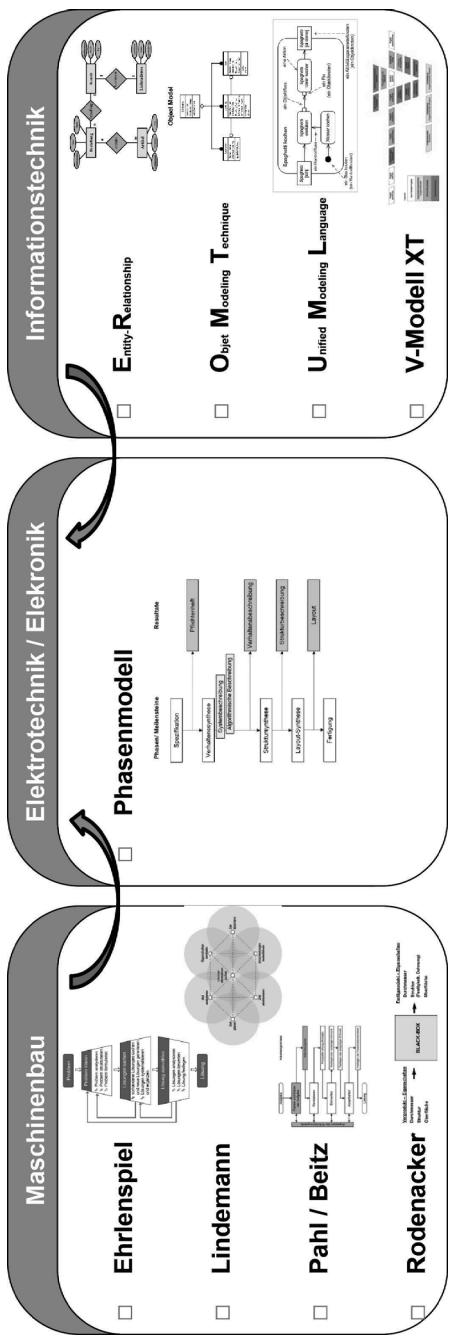


Abb. 1: Disziplinspezifische Entwicklungsmethoden und -prozesse

In den verschiedenen Phasen des PEP existieren bereits heute schon eine Vielzahl von Anwendungssprachen und -systemen:

- Modellbildung und Spezifikation: SysML (OMG Standard), ModellicaML
- Modellbildung und Simulation: Simulink, Simscape, Matlab, Modellica
- Disziplinspezifische Modellbildung und Simulation: hier existieren eine Vielzahl von M-CAD, E-CAD, CASE (Computer Aided Software Engineering) und CAE-Lösungen

Die IT-Lösungen der zweiten und insbesondere der dritten Phase sind weitgehend industriell implementiert und akzeptiert. Auf der ersten Ebene sind trotz Existenz internationaler Standards noch keine industriellen Anwendungen für interdisziplinäre Produkt- und Produktionssystementwicklung bekannt. Von wissenschaftlicher Seite existieren hier Vorschläge neben dem OMG Standard eigene Modellierungssprachen zu entwickeln. Die Schnittstellen zwischen den drei Ebenen sind nur teilweise existent und müssen für eine durchgängige Prozessgestaltung entwickelt, implementiert und ausgebaut werden. Zusammenfassend ist die Ausgangslage gekennzeichnet durch fehlende integrative Methoden, Prozesse und IT-Lösungen – sowohl auf der Administrationsseite (PLM und ERP) als auch auf der Anwendungsseite – bzw. deren fehlende Integration in ein durchgängiges Modellierungskonzept von Anforderungen (A), Funktionen (F), logischer (L) und physischer Beschreibung von interdisziplinären Produkten und Produktionssystemen. Der Ansatz des Systems Engineering und insbesondere des Model Based Design könnte ein zukünftiger Leitfaden für Methoden, Prozesse und IT-Lösungen zur Entwicklung interdisziplinärer Produkte und Produktionssystemen sein.

3 Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden die damit verbunden Arbeiten auf dem Gebiet der konzeptionellen Produktmodellierung andiskutiert. Dies beinhaltet die funktionalen Modellierung und Beschreibungssprachen von mechatronischen Systemen sowie darüber weitergehend auch die PLM Integration dieser Beschreibung.

3.1 Funktionale Modellierung

Die funktionale Modellierung stellt eine abstrakte Methode für das Verständnis und für den Gesamtwert eines Produktes dar. Die primäre Aufgabe ist die Unterstützung der Suche nach geeigneten Lösungen im Design, sowie die Schaffung von einem disziplinunabhängigen Modell eines Produktes. Ein funktionelles Modell enthält eine abstrakte Beschreibung der wichtigsten Ziele eines Produktes durch Angabe seiner Funktionen (Substantiv-Verb-Kombination) (Pahl et al. 2007). Die gesamte Funktion wird in seine Teilfunktionen unterteilt, von denen jede wiederum in weitere Teilfunktionen unterteilt werden können. Dies führt zu einer funktionalen Hierarchie. Eine typische Darstellung eines funktionalen Modells ist ein Diagramm mit den Funktionen als separate Blöcke und Verbindungen, wie z.B. Stoff-, Energie- oder Signalaustausch, dargestellt werden können.

Bisher wurden funktionale Modelle nicht im Sinne eines modellbasierten Ansatzes betrachtet, sondern mehr als Dokumente verstanden. Darüber hinaus sind funktionale Modelle selten formal und damit durch den Computer interpretierbar.

Ein Schritt in Richtung des modellbasierten Entwurfes ist der Ansatz von Stone (Stone et al. 2002). Es geht um die Definition eines formalisierten Verfahrens auf Basis von Taxonomien und Regeln für die Beschreibung von Funktionen, die das Produktdesign beschreiben.

3.2 Modellierungssprachen für die konzeptionelle Produktmodellierung

Gausemeier et.al. schlagen eine Reihe von Spezifikationstechniken für die Beschreibung von selbstoptimierenden mechatronischen Systemen vor. Mit Hilfe verschiedener Ansichten kann das System beschrieben werden. Jede Ansicht wird durch ein partielles Modell z.B. in Form eines Diagrammes dargestellt. In einem Teilmodell können spezifische Zusammenhänge dargestellt werden. Die wichtigsten Teilmodelle beschreiben Umfeld, Zielsystem, Verhalten, Anwendungsszenarien, Anforderungen, Funktionen, Wirkstruktur und Gestalt. Das Konzeptmodell wird durch die Summe von kohärenten Teilmodellen gebildet. (Gausemeier et al. 2009)

Eine andere von der OMG vorgeschlagene Sprache für die Beschreibung von Systemen ist SysML. SysML wird als Werkzeug zur unabhängigen grafischen Modellierung im Rahmen von Spezifikation, Analyse, Design, Verifikation und Validierung von Systemen verstanden. Aufbauend auf SysML und UML gab es Bestrebungen Simulationsmodelle zu integrieren. ModelicaML ist eine grafische Modellierungssprache basierend auf einem UML-Profil, um Simulationsmodelle in Modelica mit einer SysML ähnlicher Semantik zu beschreiben. ModelicaML ermöglicht die Erstellung von Beschreibungsmodellen nach den Methoden des modellbasierten Systems Engineering, die zudem in Modelica ausführbar sind (Schamai et al. 2009). Paredis et.al. schlagen darüber hinaus eine Spezifikation für die Modelltransformation von SysML-Modellen in Modelica Modellen vor, um so die analytischen Vorteile von Modelica mit der Beschreibungsfreiheit von SysML zu kombinieren (Paredis et al. 2010).

3.3 PLM Integrationsaktivitäten

Um den interdisziplinären Produktentwicklungsprozess durchgängig unterstützen zu können ist eine Integration in PLM sinnvoll. Zur Integration in eine PLM Lösung werden hauptsächlich gängige Standards betrachtet.

Die XML Metadata Interchange Spezifikation (XMI) standardisiert durch die OMG unterstützt den Austausch von Modelldaten zwischen den Werkzeugen für Meta Object Facility (MOF)-basierte Modellierungssprachen, definieren jedoch kein Datenschema. Ein weiterer Austauschstandard für den Austausch von Systems Engineering ist STEP AP233. In der SEDRES Projektgruppe wurde STEP AP233 für die Integration von Systems Engineering-Daten in PDM-Systemen formuliert. AP233 unterstützt die Systemmodellierung, welche die Systemstruktur und das Verhalten integriert (Eckert et al. 2005).

In der OMG untersucht weiterhin eine Arbeitsgruppe die Zusammenhänge zwischen SysML und AP233. Ziel ist ein Mapping der gemeinsamen Datenkonstrukte, sowie ein Change Management für SysML.

4 Erweiterter modellbasierter Ansatz in der Virtuellen Produktentwicklung

Die modellbasierte Entwicklung ist in der virtuellen Produktentwicklung von zentraler Bedeutung. Modelle können zum Beispiel topologische, physische, prozessorientierte, geometrische oder mathematische Modelle sein.

Im modellbasierten Systems Engineering (MBSE) werden Modelle für die Beschreibung und Spezifikation verwendet, um eine Strukturierung von komplexen technischen Problemen zu erleichtern. Dabei werden die Beziehungen zwischen Eigenschaften für die Analyse auf einer höheren strukturellen Ebene erfasst. Akteure aus verschiedenen Disziplinen sind in der Konzeption und Entwicklung eines komplexen Systems beteiligt. Jeder Stakeholder hat einen anderen Blick auf die Spezifikation (Friedenthal 2009). Die Metho-

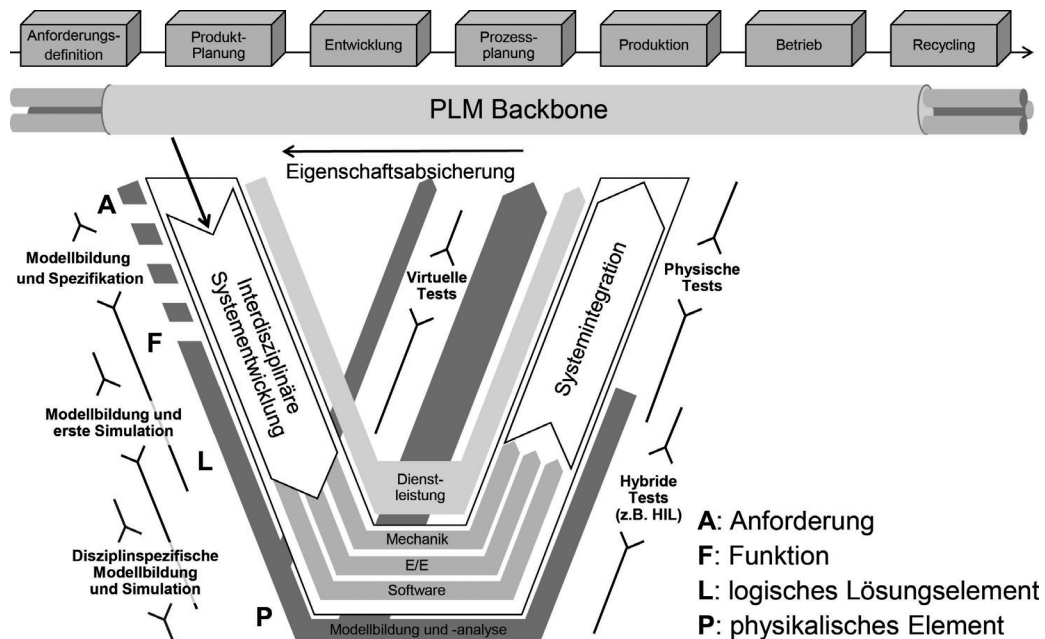


Abbildung 2: Erweitertes V-Modell für Model Based Systems Engineering

den des modellbasierten Systems Engineering können dazu beitragen, ein multidisziplinäres Produkt in einer abstrakten Weise zu beschreiben. Die VDI 2206 definiert einen systematischen Ansatz für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Der Fokus in diesem Artikel liegt hier auf dem linken Flügel des »V« und erweitert es mit dem Einsatz von Methoden aus der modellbasierten Systems Engineering (siehe Abbildung 2).

Es können drei Ansichten der Modellierung identifiziert werden:

- Modellbildung und Spezifikation: Ein System wird durch qualitative Modelle beschrieben. Diese beinhalten Anforderungs-, Funktions- oder Systemstrukturen. Die Modelle sind beschreibend und können nicht simuliert werden. Als Autorenwerkzeuge dienen z.B. Editoren für Beschreibungssprachen wie SysML.
- Modellbildung und erste Simulation: Auf dieser Ebene werden meist quantitative, simulierbare Modelle erstellt, z.B. multi-physikalische Simulationsmodelle die mehrere Disziplinen mit einbeziehen. Als Autorenwerkzeuge dienen z.B. Simulationseditoren wie Dymola oder Matlab/Simulink.
- Disziplinspezifische Modellbildung: Auf dieser Ebene werden z.B. Geometrie- oder CAE-Modelle erstellt, die einen sehr disziplinspezifischen Charakter haben. Als Autorenwerkzeuge dienen z.B. CAD Systeme oder disziplinspezifische Berechnungs- und Simulationssoftware.

Die Anforderungsdefinition ist der Ausgangspunkt der Entwicklung. Es spiegelt die mehr oder weniger abstrakte Idee in Form von Kundenbedürfnissen oder Anforderungen der Anwender wieder. In der folgenden Anforderungsanalyse werden die Kundenanforderungen in logisch konsistente, technische Anforderungen übersetzt. Dies ist mit A in Abbildung 2 markiert.

In der frühen Phase der Produktentwicklung ist der interdisziplinäre Systementwurf für die Erstellung einer funktionalen Lösung, die alle Disziplinen vertreten können, unerlässlich. Dies wird auch oft als Requirements Engineering bezeichnet. Beginnend mit einer gro-

ben Funktions- und Verhaltensbeschreibung, kann dieses Konzept Schritt für Schritt verfeinert werden. Die Aufgliederung und Abbildung in Funktionen und Teilfunktionen wird mit F in Abbildung 2 markiert. Diese bietet eine zunächst disziplin- und lösungsneutrale Sichtweise auf das Gesamtsystem in Form einer ersten Spezifikation.

Das Lösungskonzept wird durch die Definition von logischen Komponenten (gekennzeichnet mit L in Abbildung 2) die funktionale Elemente und Verhalten realisieren, beschrieben. Das Lösungskonzept umfasst das logische und physikalische Verhalten sowie die Struktur des Systems.

Semi-formale Modellierungssprachen, wie UML oder SysML, sowie simulationsbasierte Modellierungssprachen wie Matlab/Simulink/Simscape oder Modelica unterstützen die interdisziplinäre Systementwicklung, so dass am Ende der interdisziplinären Systementwicklung gezielte Produkteigenschaften durch virtuelle Tests überprüft werden können. Bisher gibt es keinen durchgängigen Daten- bzw. Informationsaustausch zwischen der modellbasierten Spezifikation über die ersten Simulationen zu den entsprechenden Disziplinen. Gerade eine inkrementelle und integrierte Überprüfung von Eigenschaften mit virtuellen Tests setzt die Entwicklung von Anforderungen und definierten Testszenarien voraus.

Basierend auf den ersten Simulationen und der funktionalen Beschreibung beginnt die disziplinspezifische Entwicklung, die die physischen Elemente des Systems, wie Hardware-Teile oder Software-Code (gekennzeichnet mit P in Abbildung 2) adressiert. Hier setzt meist die CAx Prozesse in der die virtuelle Produktentwicklung an.

5 Datenmanagement für die konzeptionelle Produktmodellierung

Eine vollständige Definition der Anforderungen, Funktionen und logischen Systemelementen ist schwer schon zu Beginn zu erreichen. Daher sollte der Entwicklungsprozess nach dem oben vorgestellten V-Modell in inkrementellen Schleifen verlaufen, die alle Aspekte weiter verfeinern. Die Iterationen beginnen mit dem kleinsten »V«,

bis es über die virtuellen Test-Iterationen mit detaillierten Simulationsmodellen, zur physikalischen Prüfung kommt. Jede Iteration bedeutet eine Zunahme des Wissens über das Produkt. Gleichzeitig bedeutet dies, dass Änderungen vorgenommen werden können, die entsprechend verwaltet werden müssen. Hierfür bietet sich das PDM System als Kern einer PLM Lösung an, dort wo zentrale Produktinformationen aus dem Entwicklungsprozess von allen beteiligten Personen zusammen getragen und organisiert werden.

Modelle in der Sicht der Modellierung und Spezifikation (Abbildung 2, oben links) werden in den frühen Phasen der Produktentwicklung mit dem Zweck erstellt, die Beschreibung des Produktes zu verwalten und alle kritischen Aspekte unter Einbeziehung aller Beteiligten zu überprüfen.

Basierend auf dem System-Spezifikationsmodell können verschiedene Aspekte des Produktes »eingefroren« und »freigegeben« werden, so dass in der disziplinspezifischen Entwicklung darauf Bezug genommen werden kann. Dies können z.B. Parameter von Komponenten für bestimmte disziplinspezifische Planungen und Simulationen sein, die wiederum auch für andere disziplinspezifische Modelle verwendet werden.

Die Verwaltung von funktionalen Beschreibungsmodellen in PDM kann während der frühen Planungsphasen, sowie später entlang des Produktlebenszyklus als Medium für die Rückverfolgung von Änderungen an Anforderungen, Funktionen und Verhalten, logischen sowie physikalischen Elementen sein. Ein Beispiel hierfür ist die Möglichkeit, durch die funktionale Beschreibung eine Zuordnung zu schaffen, welche Anforderungen eine Änderung in der Produktstruktur beeinträchtigt und umgekehrt.

5.1 Computerunterstützung für die funktionale Produktbeschreibung

Die funktionale Produktbeschreibung bezieht sich auf die Sicht der Modellierung und Spezifikation (Abbildung 2, oben links) und beschreibt das System aus einer funktionsorientierten Perspektive. Dazu gehören die Anforderungen, die funktionalen und logischen Elemente des Systems. SysML eignet sich für die Modellierung die-

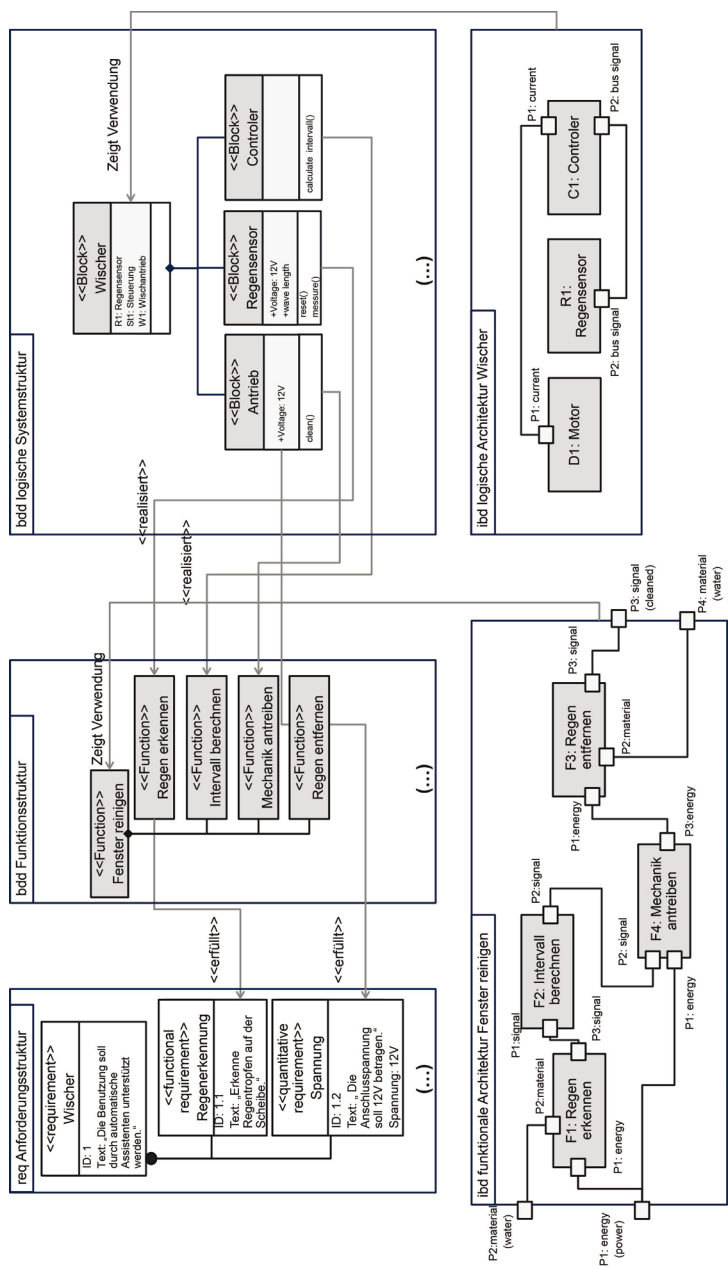


Abbildung 3: Beispiel einer funktionalen Produktbeschreibung

ser Aspekte. SysML ist eine standardisierte Modellierungssprache und es sind viele Werkzeuge für die Modellierung existent. XML stellt hier eine Basis für den Datenaustausch, ist jedoch von vielen Werkzeugen nicht vollständig unterstützt. Zusätzlich zu den SysML-Modellierungs-Tools wie z.B. Magicdraw oder Enterprise Architect, bieten Anforderungsmanagement-Tools wie z.B. Doors, Requisite-Pro oder MKS starke Unterstützung für die Modellierung von Anforderungen an.

Abbildung 3 zeigt ein exemplarisches Beispielmodell eines Scheibenwischers in SysML. Die Anforderungen sind in einem hierarchischen Anforderungsdiagramm modelliert. Funktionen und logische Elemente des Systems sind hierarchisch in einem Blockdefinitionsdiagramm modelliert. Die interne Struktur wird durch interne Blockdiagramme abgebildet, die die funktionale und logische Architektur repräsentieren.

Zwischen zwei verschiedenen Modellelementen, kann eine Zuordnungsbeziehung aufgebaut werden. Die so genannten Querverweise können auf verschiedene Arten eingeschränkt werden. In SysML existieren vordefinierte Zuweisungen, darüber hinaus können aber auch neue Zuweisungen definiert werden. In dem angeführten Beispiel ist die Zuordnung »realisiert« als eine Beziehung zwischen logischen und funktionalen Elementen des Systems verwendet. Der Regensensor realisiert die Funktion »erkenne Regen«. Ein Merkmal (Property) eines Systemelements »erfüllt« eine Anforderung. In unserem Vorschlag wird diese Zuordnung erweitert, so dass auch eine Funktion eine Anforderung erfüllen kann. Sind diese Querverweise definiert, können Anforderungen mit der funktionalen und logischen Architektur in Zusammenhang gebracht werden.

Soll der Scheibenwischer in Abbildung 3 in einem Lkw verwendet werden, kann es sein, dass die Bordspannung 24 V beträgt und sich somit die Anforderungen verändert. Um diese veränderte Anforderung umzusetzen ist es wichtig alle betroffenen logischen oder funktionalen Elemente des Systems zu kennen.

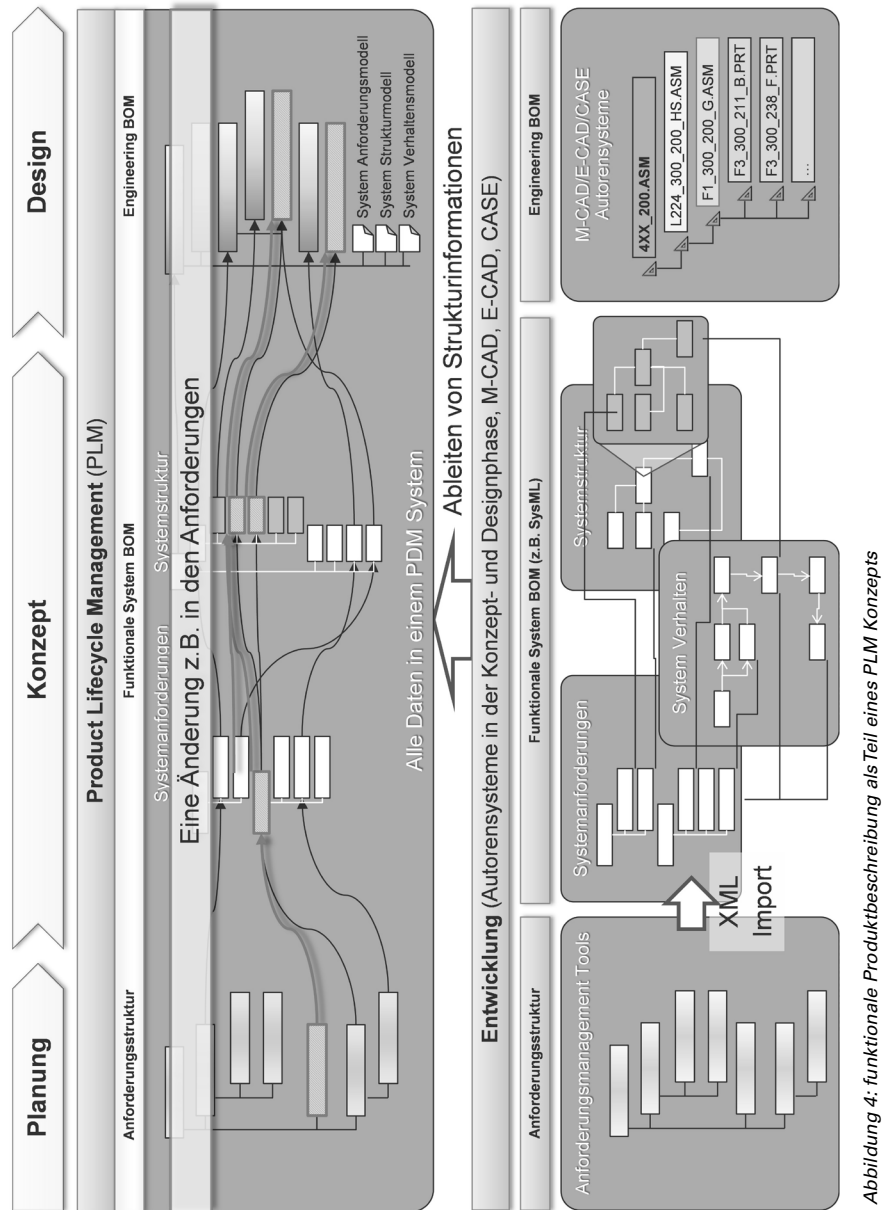


Abbildung 4: funktionale Produktbeschreibung als Teil eines PLM Konzepts

5.2 Inhalt eines funktionalen Produktbeschreibungsmodells

SysML-Editoren können helfen, ein erstes Konzept eines Systems mit Hilfe von unterschiedlichen Diagrammen grafisch zu modellieren. Zur Integration der modellierten Daten in ein PDM System wird im Folgenden ein vereinfachtes Datenschema zur Abbildung auf z.B. XML vorgeschlagen, das unterschiedliche Perspektiven beinhaltet:

- *Hierarchien*:-, Funktions- und logische Elementstrukturen können in einer hierarchischen Weise betrachtet werden. In PDM-Systemen können diese in einfacher Form als Struktur (ähnlich einer Stückliste) gespeichert werden.
- *Querverweise unter Modellelementen und über Modellgrenzen hinweg*: Querverweise sind die Beziehungen zwischen verschiedenen Arten von Modell-Elementen, die mit Zuweisungen in SysML modelliert werden können. Der Vorteil des modellbasierten Systems Engineering ist, dass diese Querverweise zusammen mit dem Systemelement verwaltet werden.
- *Typisierte interne Verbindungen unter Modellelementen innerhalb einzelner Modelle*: Schematische Blockdiagramme, z.B. in Modelica oder interne Blockdiagramme in SysML, beschreiben die interne Struktur eines Systemelements über Verbindungen zwischen zwei Ports gleichen Typs. Dies stellt die interne Vernetzung der transparent dar.

Hierarchien werden in erster Linie für das Management komplexer Systeme verwendet. Werden funktionale oder logische Zusammenhänge betrachtet ist dies für eine funktionale Produktbeschreibung meist nicht ausreichend.

5.3 Datenmodell für das Produktdatenmanagement

Abbildung 4 zeigt die mögliche Integration einer funktionalen Produktbeschreibung in eine PLM Umgebung. Für diesen Beitrag wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen und die Stücklistenstruktur im PDM-System bereits vorhanden sind. Ein Autorenwerkzeug hierfür ist z.B. Doors. Die funktionale Produktbeschreibung integriert

sich zwischen Anforderungen und der Stücklistenstruktur (BOM). Funktionen lassen sich auf einfache Art und Weise hierarchisch modellieren (siehe Abschnitt 3.1). Dies kann in SysML-Editoren über Blockdefinitionen modelliert und in XML extrahiert werden. Logische Systemelemente stellen die Realisierung von Funktionen mit einem physikalischen Effekt dar und definieren Eigenschaften. Ein Systemelement kann weitere externe Modelle als Dateien referenzieren. Dies könnte zum Beispiel eine Modelica oder Matlab/Simulink/Simscape Modelldatei sein, die entwickelt wurde, um die physikalische Eigenschaften darzustellen und zu analysieren. Ein logisches Systemelement ist mit der physikalischen Stückliste (BOM) verbunden, welche M-CAD oder E-CAD Dateien, sowie Software aufnimmt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Erweiterung des V-Modells nach VDI 2206 vorgeschlagen, welches auf die Herausforderungen der virtuellen modellbasierten Produktentwicklung näher eingeht. Des Weiteren wurde ein Datenmodell für die funktionale Produktbeschreibung vorgestellt, welches einen leichteren Zugang zu den Methoden des modellbasierten Systems Engineering für Organisationen ermöglichen soll, um eine interdisziplinären Produktentwicklung zu unterstützen. Der Anwendungsbereich ist auf hierarchische und interne Strukturen, sowie Querverweise zwischen Modell-Elementen fokussiert. Eine Integration der funktionalen Produktbeschreibung in ein PLM Konzept beinhaltet die Verfolgung von Änderungen und Einflüssen auf Anforderungen, Funktionen und logisches Systemelementen. Ein Management der funktionalen Systembeschreibung ermöglicht erst die frühe Produktdokumentation und Qualitätssicherung. Das vorgeschlagene Vorgehen in dem erweiterten V-Modell ist angelehnt an das modellbasierte Systems Engineering, was ein grundsätzliches Umdenken in der Produktentwicklung erfordert. Das vorgeschlagene Datenmodell implementiert drei Perspektiven: Hierarchien, Querverweise zwischen Modellelementen und typisierte Verbindungen innerhalb der Modellelemente. Diese Perspektiven sollten das Management der funktionalen und logischen Architekturen in einer PLM-Lösung zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- Anderl, R, Eigner, M, Sendler, U, Stark, R (2012): Smart Engineering – Interdisziplinäre Produktentstehung, in: acatech diskussion, Heidelberg: Springer
- Broy, M, Glotzbach, U (2010): Cyber-Physical Systems - Innovation durch software-intensive eingebettete Systeme. In: acatech diskutiert, Heidelberg: Springer
- Eckert, R, Mansel, W, Specht, G (2005): STEP AP233 + Standard PDM = Systems Engineering PDM?, in: Proceedings of 11th international Conference on Concurrent Engineering, München, 20.-22.06.2005, 405–412.
- Friedenthal, S, Steiner, R, Moore, A (2009): A Practical Guide to SysML - The Systems Modeling Language, San Francisco: Morgan Kaufmann Pub
- Gausemeier, J, Frank, U, Donoth, J, Kahl, S (2009): Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems, in: Research in Engineering Design, 20 (4), Heidelberg: Springer, 201–223.
- Hirtz, J, Stone, R, McAdams, D, Szykman, S, Wood, K (2002): A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts, In: Research in Engineering Design, (13), Heidelberg: Springer, 65–82
- Pahl, G, Beitz, W, Feldhusen, J, Grote, K-H (2007): Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung . 7. Aufl., Heidelberg: Springer
- Paredis, C, Bernard, Y, de Koning, H-P, Friedenthal, S, Fritzson, P, Rouquette, N, Schamai, W (2010): An Overview of the SysML-Modelica Transformation Specification, Beitrag im Internet: http://www.omgwiki.org/OMGSysML/doku.php?id=sysml-modelica:sysml_and_modelica_integration veröffentlicht 2010, abgerufen am 02.02.2012.
- Schamai, W, Fitzson, P, Paredis, C, Pop, A (2009): Towards Unified System Modeling and Simulation with ModelicaML: Modeling of Executable Behavior Using Graphical Notations, in: Proceedings 7th Modelica Conference, Como/Italy, 20.–22.09.2009, 612-621.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner
 Dipl.-Ing. Torsten Gilz
 Dipl.-Ing Radoslav Zafirov
 Technische Universität Kaiserslautern
 Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung
 Gottlieb-Daimler-Straße 44
 67663 Kaiserslautern
<http://vpe.mv.uni-kl.de>

Bodo Machner

Neue Produkte, neue Märkte, effizientere Prozesse – Herausforderungen an das Produktdatenmanagement

Die immer schnellere Veränderung des Umfelds stellt auch die internationale Automobilindustrie vor große Herausforderungen. Vor den Experten der Branche wurden diese beispielsweise auf dem 12. Internationalen CAR-Symposium der Universität auch vom Vorstandsvorsitzenden der BMW Group Dr. Norbert Reithofer diskutiert (Car 2010). Aus dem Spannungsfeld zwischen profitabilem Wachstum und Globalisierung erwachsen nicht nur größere Absatzzahlen sondern auch die Zunahme an Varianz aufgrund länderspezifischer Gesetzgebung und unterschiedlichen Kundenbedürfnissen in den Hauptmärkten Europa, Nordamerika und Asien. Ein »historisches« Beispiel für diese unterschiedlichen Kundenanforderungen war die Anforderung der amerikanischen Kunden an den »Cupholder«. Das Thema ist inzwischen gelöst. Komplexer ist der Widerspruch zwischen der Ausrichtung unserer Fahrzeuge auf das Fahrerlebnis des Fahrers in den klassischen Märkten und dem Trend zum Chauffeur in vielen neuen Märkten (v.a. China).

Nach der Globalisierung von Markt, Produktion und Einkauf erfolgt nun die Globalisierung der Entwicklung. Für BMW ist dies ein neuer Schritt, bei dem Kooperationen sowohl mit OEMs (z.B. PSA, Brilliance) als auch neuartige Partnerschaften (z.B. SGL, Sixt) eine wichtige Rolle spielen werden.

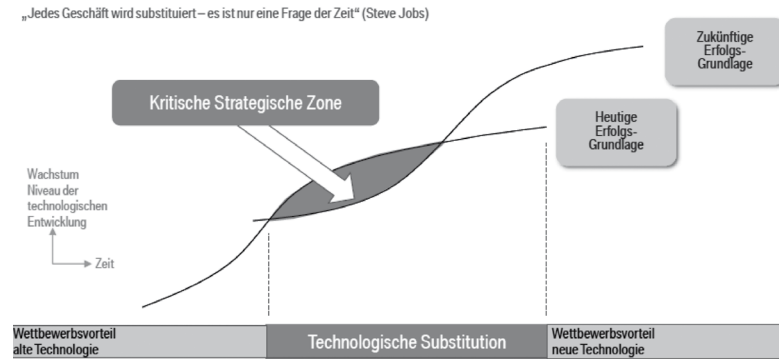


Abbildung 1: Iconic Change – die technologische Entwicklung vollzieht sich in „S-Kurven“

Die Branche steht vor einem Iconic Change: Die Veränderung vom klassischen Verbrennungsmotor zu nachhaltigeren Antriebskonzepten oder vom Auto als Statussymbol zum Bedürfnis der Kunden nach der Dienstleistung Mobilität – insbesondere in den großen »Megacities« auf Basis nachhaltiger Primärenergie wird anhand sogenannter »S-Kurven« diskutiert (Abb. 1; s. a. Schurkus 2012). Diese Veränderungen sind auch seit Anfang dieses Jahrtausend im Produktportfolio ablesbar. Früher waren die BMW-Prozesse in Entwicklung, Produktion und Vertrieb auf die 3 großen Baureihen (3er, 5er, 7er) ausgelegt. Heute ähnelt das Produktportfolio einem gut gefüllten Schachfeld mit bis zu 10 Derivaten einer Produktfamilie und mehreren Marken. Unter der Überschrift »Efficient Dynamics« setzen wir im Unternehmen schon seit längerem auf eine Strategie zu mehr Effizienz und Dynamic in der individuellen Mobilität um (Abb. 2). Ein Ergebnis dieser Strategie ist neben den äußerst verbrauchsarmen Fahrzeugen mit überdurchschnittlicher Leistung u.a. auch die neue Marke »BMW i«, die ab 2013 am Markt erhältlich ist.

Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ändern sich grundlegende Eckpfeiler der Fahrzeugarchitektur und -beschreibung: Ein Fahrzeug hat jetzt produktbeschreibende Merkmale, die von mehreren Motoren bestimmt werden – bislang war es eindeutig ein Verbrennungsmotor – und vom Typ des Hochvoltspeichers, der auch Auswirkung auf die Leistung hat.

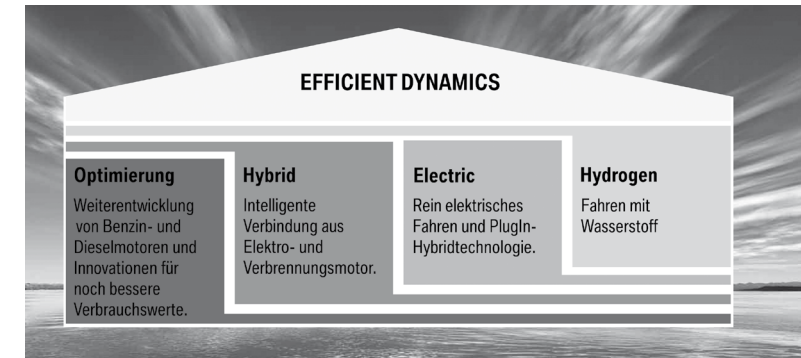


Abbildung 2: BMW Efficient Dynamics, Strategie für mehr Effizienz und Dynamik.

Wie lässt sich dieses Produktangebot effizienter und schneller entwickeln, produzieren und anschließend im Service betreuen? BMW setzt hier seit einigen Jahren viel konsequenter auf die Anwendung von Standards in der Fahrzeugarchitektur und von standardisierten Modulen/Teilsystemen, im BMW-Sprachgebrauch »Baukästen«. Dabei geht es nicht um das gleiche Teil für alle Fahrzeuge sondern um ein skalierbares Konzept aus gleichen, auszuwählenden und design-/produktspezifisch gestaltbaren Komponenten, die den Baukasten insgesamt definieren. Neben den Skaleneffekten in der Produktion geht es auch um die Reduzierung der Absicherungszeiten und –aufwände und der Rüstzeiten im Service.

Zur Umsetzung dieser Zielstellungen wurde der Produktentwicklungsprozess (PEP) bei BMW neu gestaltet. Aus einem weitgehend zeitlich linear verlaufenden Entwicklungsprozess für eine Produktlinie (z. B. Mini oder »große BMW-Modelle«) wurde der Architektur- und Baukasten-orientierte PEP (Abb. 3). Auf Basis vordefinierter und vereinbarter Baukästen erfolgt die Entwicklung und Absicherung der Fahrzeugarchitektur für eine Vielzahl von Derivaten. Diese Fahrzeugarchitektur wird in Generationen/Versionen weiterentwickelt (im Bild als »v1« und »v2« gekennzeichnet). Aus der Architektur lassen sich jetzt schneller und mit geringeren Kosten Derivate ableiten.

PDM bei BMW

Für die Steuerung des PEP bezüglich Eigenschaften, Kosten, Gewicht, Qualität und die Durchgängigkeit zu den anderen Kundenprozessen des Unternehmens spielt ein übergreifendes und effizientes Produktdatenmanagement (PDM) eine grundlegende Rolle. BMW hat dafür in den vergangenen 10 Jahren über mehrere Leistungsstufen ein neues durchgehende Konzept, den PEP-PDM-Backbone implementiert (s.u.a. Koch/Hirsch 2007 oder Spies/Biswas 2008). Kern des PDM-Backbones ist eine durchgehende konfigurierbare Produktstruktur und ein integriertes Änderungsmanagement beginnend in der Konzeptphase der Produktentwicklung. Produktstruktur, Konfigurations- und Änderungsmanagement in PEP PDM steuern heute über 30 Prozesse in Entwicklung, Einkauf, Produktion, Vertrieb/Service, z.B.:

- Vorgabe des freigegebenen Planstandes des Produkts als »Konzeptmengengerüst« bereits ab 50 MvS
- reifegradorientierte Fortschreibung des Mengengerüsts sowohl mit Bezug zum prognostizierten Serienstand als auch für Absicherungsereignisse im Prozess bis »Start of Production« (virtuelle und Hardwarebaugruppen)
- Virtuelle und »reelle« Fahrzeuge sind zueinander stimmig und konsistent zum Planstand
- Steuerung von Varianz und Kommunalität
- Bereitstellung freigegebener Lastenhefte für Einkauf, wo sinnvoll mit Bezug zum Konzeptmengengerüst
- Verwaltung und Steuerung von Gewicht und Kosten (Ziel, Plan und Ist) im Produktprojekt mit Bezug zur konfigurierbaren Produktstruktur

Abbildung 4 zeigt die Einordnung des BMW PDM-Backbones in das 4-Ebenen-PLM-Modell, das vom CAD/CAM-Strategiekreis der deutschen Automobilhersteller entwickelt, im VDA PLM-Arbeitskreis und auch in der Literatur als Referenz verwendet wird (z.B. Eigener 2011). Das von BMW gewählte Vorgehen unterscheidet sich von CAX-orientierten PDM-Konzepten, die bis heute diese durchgängige Unterstützung der Unternehmensprozesse nicht erreicht haben.

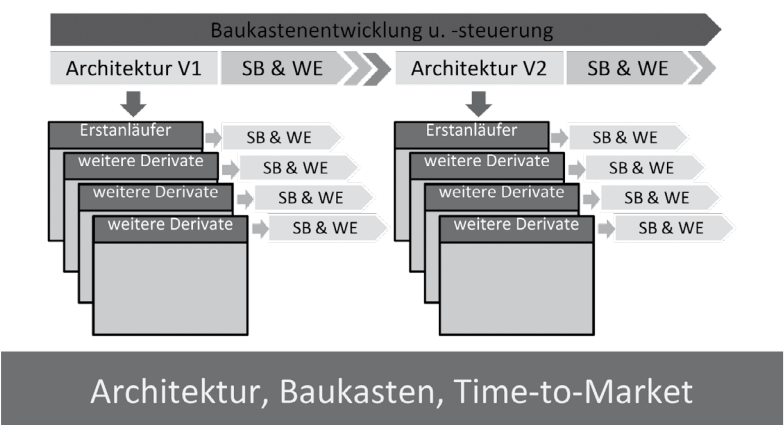
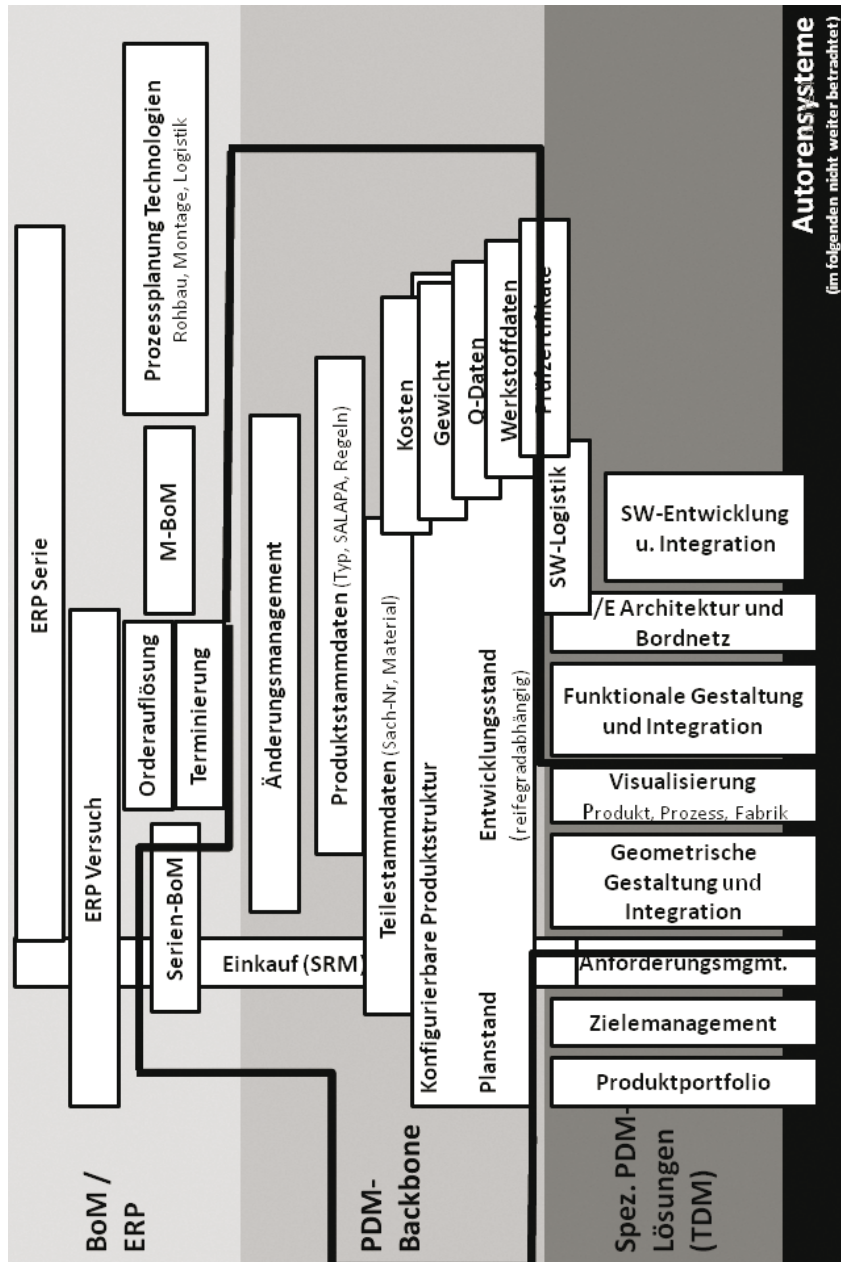


Abbildung 3: Der neue Baukasten- und Architektur-orientierte Produktentwicklungsprozess (SB & WE = Serienbetreuung und Weiterentwicklung).

Der PDM-Systemverbund basiert im Kern auf der SAP iPPE (SAP ERP 6.0), auf deren Datenbasis spezielle Applikationen entstanden sind. Beispiele sind ein Produktstammdatenmaster (grundlegende Merkmale und Regeln der Produktbeschreibung), das genehmigende Maßnahmen- und Änderungsmanagementsystem, das »Freigabecockpit« als Integrationsbaustein zur Serien-BoM oder die CAD-Produktstruktur-Integration auf Basis des BMW-Legacy-Systems »Prisma«. Zur Verbesserung der Anwenderakzeptanz (»Problemfall« SAP-Oberfläche, systemübergreifender und rollenspezifischer Zugriff auf die PDM-Daten) entstand ein PDM-Web-Client, der den Zugriff sowohl aus dem BMW-Netz als auch über gesicherte Verbindungen durch unsere Entwicklungspartner erlaubt.

Seit 2006 werden die Produktdaten aller neuen Fahrzeuggenerationen mit diesem PDM-Backbone verwaltet und die Entwicklungsprojekte darüber gesteuert. Diese PDM-Architektur bietet das Potential zur Unterstützung zukünftiger Herausforderungen, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird (Abb. 5):

Abbildung 4: Der BMW PDM-Backbone in der 4-Ebenen-PLM-Architektur (vgl. Eigner, M. 2011)



- Die Beherrschung der Komplexität in der Produktbeschreibung durch die schnell wachsende Vielfalt und Differenzierung
- Die Verbesserung der Durchgängigkeit zu den »Downstreamprozessen« insbes. in Logistik, Ordering, Vertrieb, Qualitätsmanagement Zuliefererkette
- Bessere Unterstützung durchgehender Gestaltungsprozesse in der Entwicklung im Sinne eines »Systems Engineering«.

Die Herausforderungen durch den neuen Produktentwicklungsprozess für das Produktdatenmanagement

Zu den o. g. Herausforderungen und Potentialen für das Produktdatenmanagement bei BMW wird im Folgenden näher eingegangen.

Die Beherrschung der Komplexität in Produktstruktur, Konfigurations- und Änderungsmanagement

Die im ersten Abschnitt dargestellten Herausforderungen zur Unterstützung der neuen Produktoffensive und des Iconic Change zur E-Mobilität erfordert die Weiterentwicklung der konfigurierbaren Produktstruktur. In der Vergangenheit bestand ein Fahrzeug aus einem Antriebsaggregat, dem Verbrennungsmotor. Durch dieses Objekt waren wesentliche produktbeschreibende Merkmale in der Produktbeschreibung festgelegt.

Ein Hybrid-oder Elektrofahrzeug besteht i. a. aus mehreren Motoren (z. B. klassischer Verbrennungsmotor und einem bis vier E-Motoren oder n antreibenden E-Motoren und einem Verbrennungsmotor zum Laden der Batterie (Range Extender)). Dabei können die n E-Motoren in einer Konfiguration sowohl baugleich als auch verschieden (z. B. Vorderachse, Hinterachse) sein. Das produktbeschreibende Merkmal »Leistung« ergibt sich erst nach Auswertung der gültigen (im Vergleich zur klassischen Fahrzeugarchitektur) komplexeren Konfiguration. Neue Produkteigenschaften werden notwendig, wie die Reichweite, die von der ausgewählten Batterie abhängt und Fahrzeuge zukünftig ähnlich klassifizieren wird wie heute der Hubraum des Verbrennungsmotors.

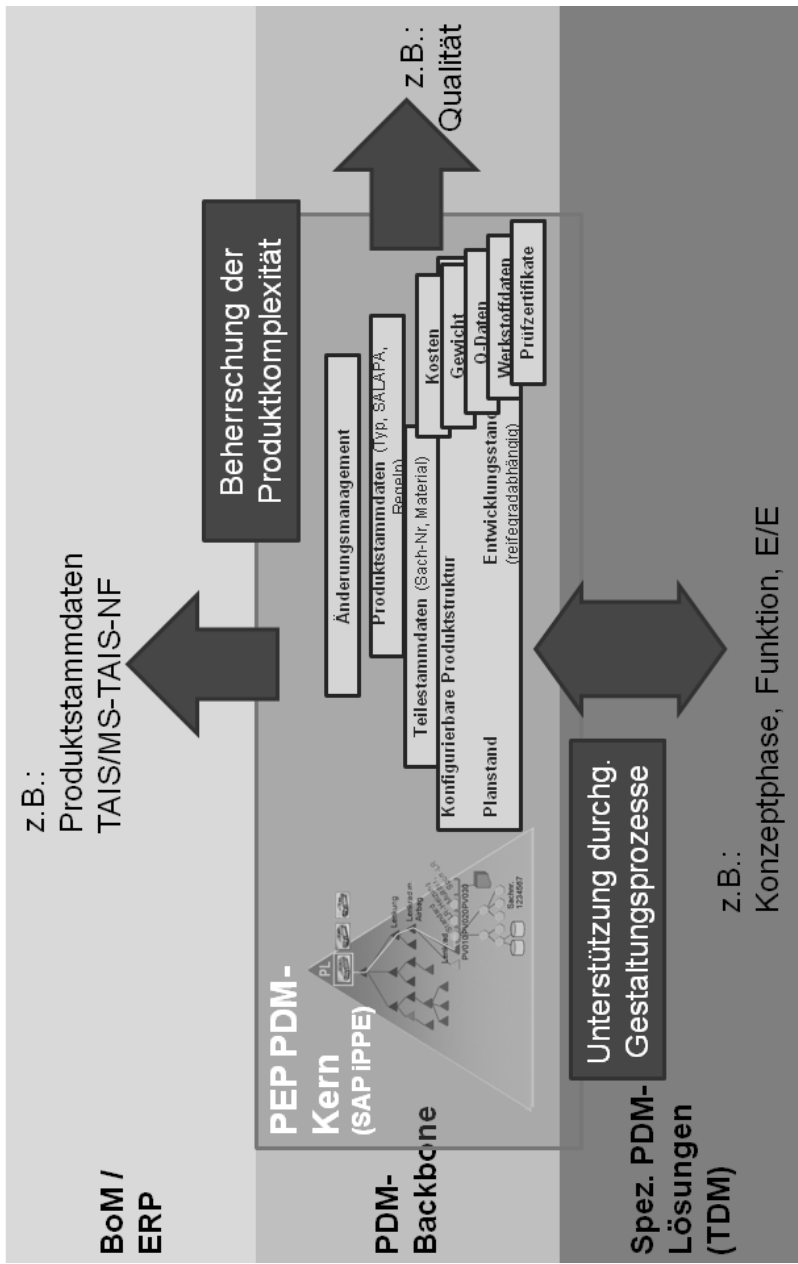


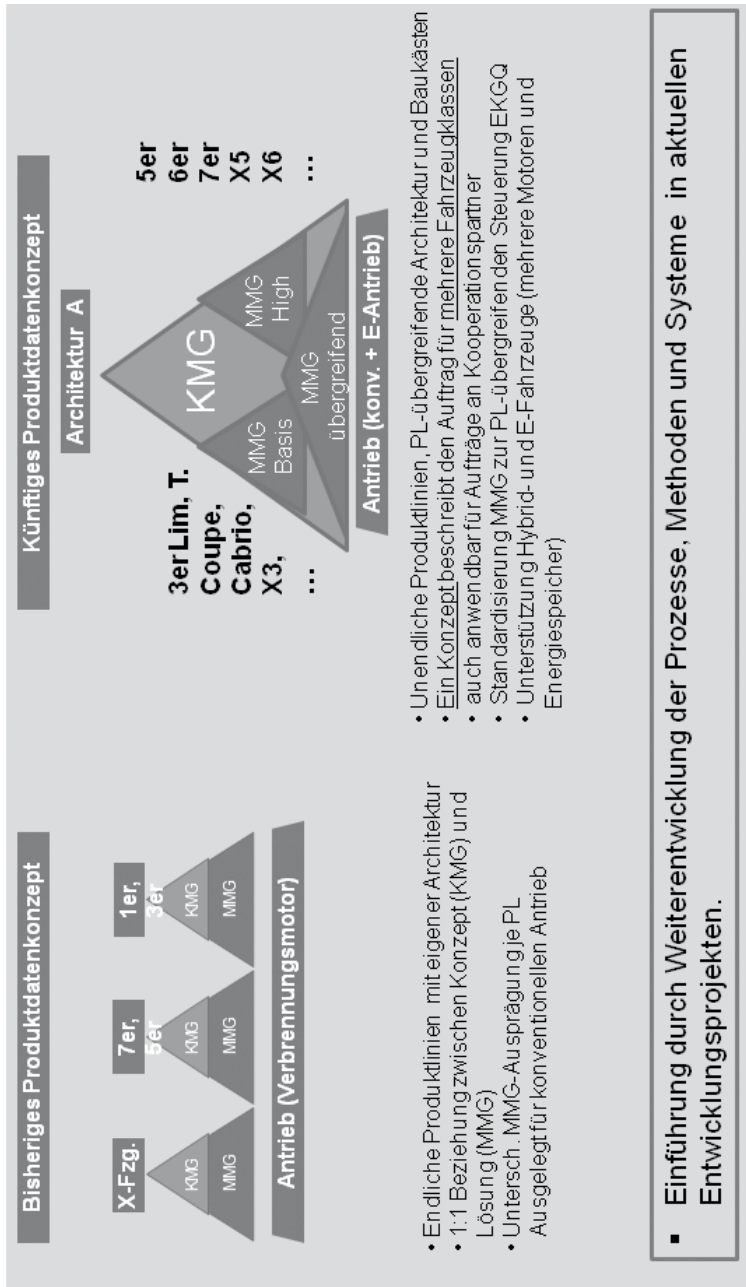
Abbildung 5: Schwerpunkte/Potentiale für den Ausbau des PDM-Backbones bei BMW

Diese neuen bzw. geänderten Produktmerkmale verändern zukünftig das Produktmanagement, die Produktplanung, das Angebot und die Preisbildung im Vertrieb und müssen von der initialen Definition im PDM in viele weitere Systeme im Unternehmen weitergegeben werden.

Eine weitere Herausforderung ist die Abbildung der übergreifenden Fahrzeugarchitektur als Basis für verschiedene Ausleitungen (Derivate) in der Produktstruktur. Während bisher für jede Produktlinie (Fahrzeugentwicklungsprojekt) ein Auftrag (Konzeptmengengerüst, KMG) definiert wurde, ist zukünftig dieses Konzept der Auftrag für mehrere Produktlinien mit einer gemeinsamen Fahrzeugarchitektur (Abb. 6). In einer »übergreifenden Klasse« werden alle Module/Komponenten verwaltet, die kommunal in allen Produktlinien dieser Architektur verwendet werden (incl. der Baukästen). Außerdem enthält diese Klasse alle architekturelevanten Produktbeschreibungen sowie die virtuellen und Hardwareabsicherungsträger für die Architektur. Für die Verwaltung der Produktlinienspezifischen Umfänge werden zwei bis n weitere Klassen ausgebaut – in Abb.6 beispielhaft mit »MMG Basis« und »MMG High« dargestellt. Dadurch können einerseits die kommunalen und Baukastenumfänge redundanzarm verwaltet und übergreifend gesteuert werden – andererseits kann die Komplexität für die Pflege und Auswertung (Auflösung) der Produktlinienspezifischen Umfänge begrenzt werden (Usability für den Anwender und Systemperformance).

Die Unterstützung von Gestaltungsprozessen auf Basis durchgängiger Modelle für Geometrie, Funktion, Systemverhalten

Die Veränderung des Autos hin zu einem »mechatronischen System« erfordert im heutigen Entwicklungsprozess Fähigkeiten und Methoden, die bisher nur aus anderen Branchen bekannt waren, z.B. die Betrachtung und Modellierung des Fahrzeugs als »System«, die durchgehende Modellierung von Geometrie, Funktion und Systemverhalten z.B. des Energie- oder Nachrichtenbordnetzes. Die Grundlagen der Systemmodellierung, -analyse und -optimierung sind seit vielen Jahrzehnten bekannt. Wichtige für die Automobilindustrie anwendbare Erfahrungen gibt es seit den 80er Jahren aus der Luft- und Raumfahrtindustrie.



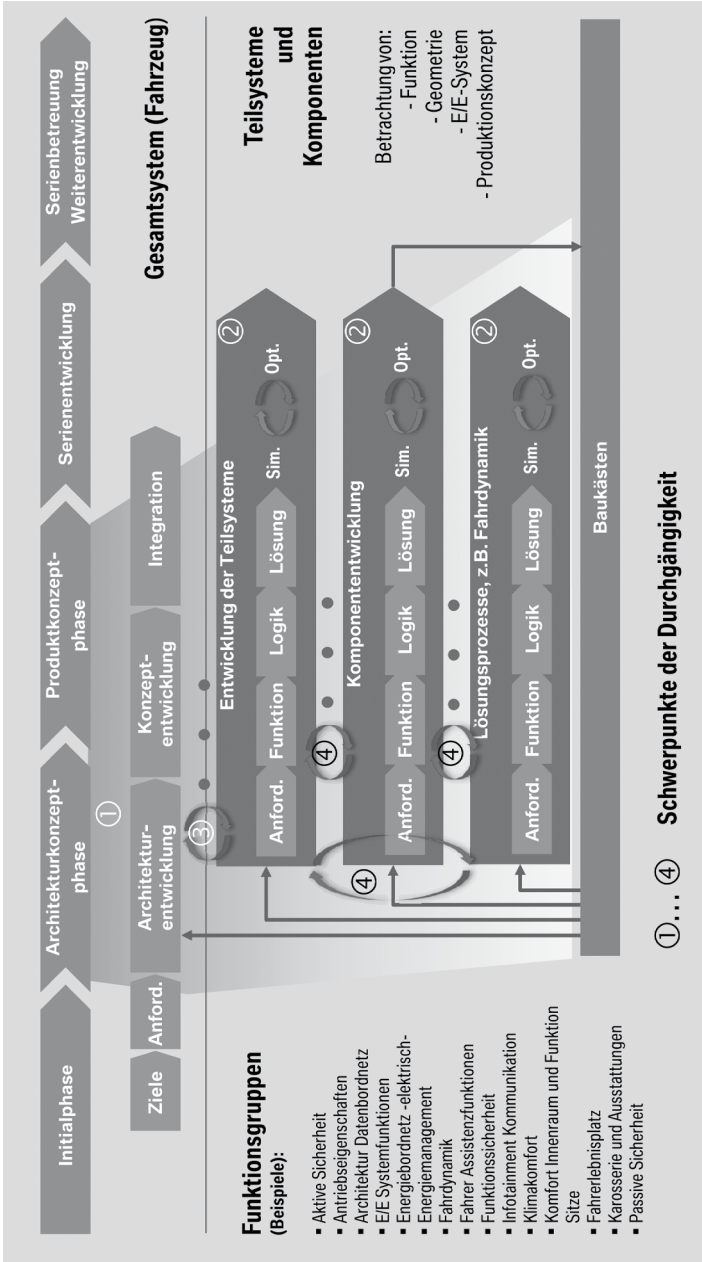


Abbildung 7: Unterstützung durchgängiger Gestaltungsprozesse

Eine Option ist dabei die Implementierung der durchgängigen Eigenschafts- und Funktionsstruktur im PDM-Backbone, die heute in verschiedenen »Dialekten« in unterschiedlichen Systemen optimiert für die jeweiligen Teilprozesse existiert. Beispiele für diese Dialekte sind der »Ziele-/Anforderungskatalog«, die Lastenheftstruktur in DOORS, die E/E-Funktionsliste.

Als Gestaltungsprinzip akzeptiert ist die Verwendung der Konfigurationsmerkmale, die heute in der PDM-Produktstruktur Anwendung finden auch für die Konfiguration von virtuellen Fahrzeugen oder Teilsystemen für funktionale Bewertungen (z.B. Simulationsmodelle und ergebnisse mit definiertem Bezug zu einer Konfiguration in der Produktstruktur).

Die Unterstützung eigenschaft- und funktionsorientierter Sichten in PDM mit Bezug zur etablierten Produktstruktur

Pilothaft wird dieser Ansatz derzeit bei der Neugestaltung des E/E-Architectureentwicklungsprozesses verfolgt. Die durch die E/E-Architektur abzubildenden Funktionen sind dabei nur eine Teilmenge aller Funktionen, die auf der Gesamtfahrzeugebene zu betrachten sind (»rechte Pyramide« in Abb. 8).

Ein weiteres »Durchgängigkeitsziel« ist die Konsistenz zu den Konfigurationsmerkmalen mit dem »Produktstrukturbackbone« (»linke Pyramide« in Abb. 8). Die derzeit in Umsetzung befindlichen Integrationsschritte sind in Abb. 8 aufgelistet.

Zusammenfassung

Der PDM-Backbone ist im BMW-Entwicklungsprozess der Enabler für die durchgängige Steuerung der Eigenschafts- Kosten-, Gewichts- und Qualitätsziele über alle beteiligten Unternehmensbereiche. Der derzeitige Umbruch in der Automobilindustrie bezüglich Produkt, Prozess und Markt stellt neue Anforderungen auch an das Produktdatenmanagement. Eine Herausforderung ist dabei die Beherrschung der zunehmenden Komplexität des abzubildenden Produktportfolios, der zu unterstützenden Prozesse und der sich ständig weiterentwickelnden Organisationsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt

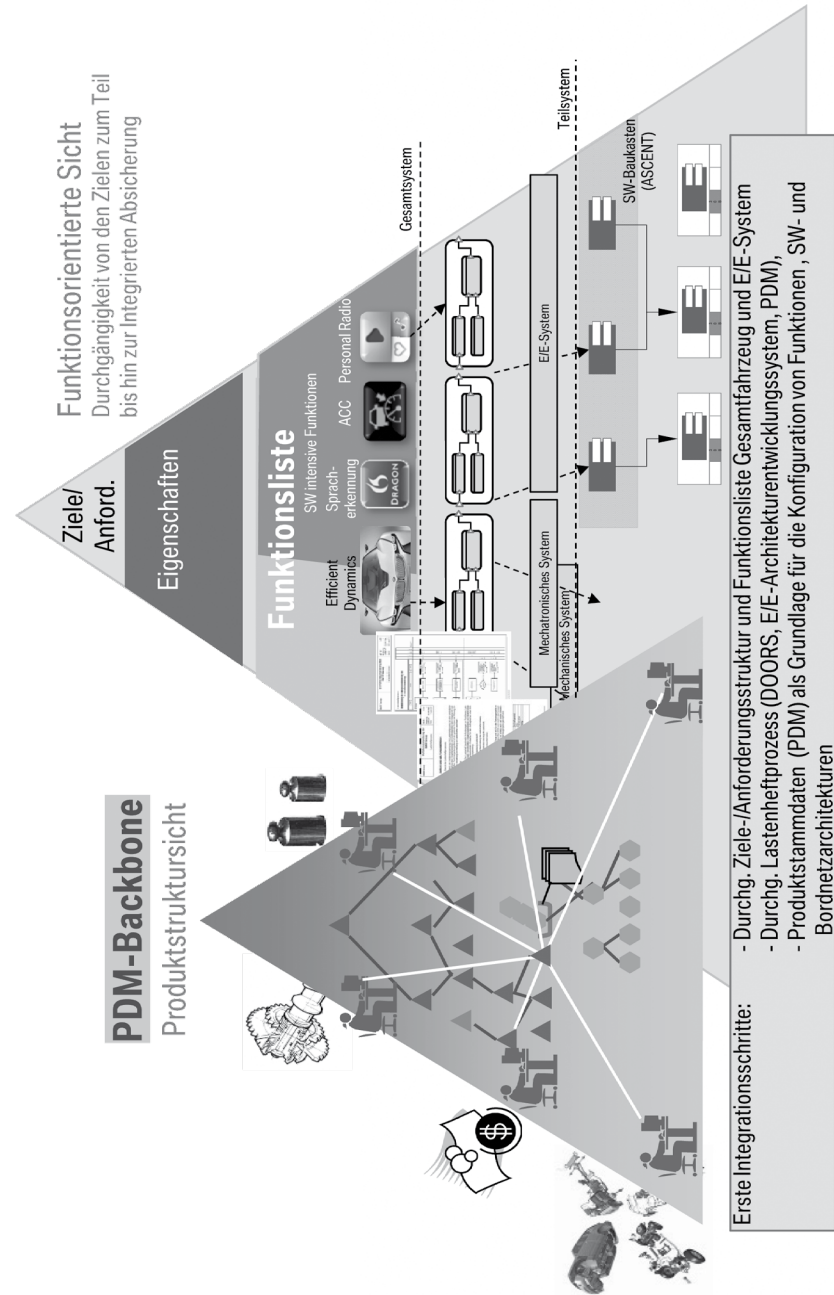


Abbildung 8: Zusammenwirken von Produktstruktur, Funktion und E/E-Architektur (Datensicht)

ist die bessere Unterstützung der Gestaltungsprozesse (nach der bisherigen Fokussierung auf die Steuerungsprozesse) durch nutzenorientierte Auswahl von »Durchgängigkeitsschwerpunkten«.

Literaturverzeichnis

- CAR 2012: 12. Internationales CAR-Symposium der Universität Duisburg-Essen
<http://www.uni-due.de/car>
- Schurkus, H. 2011: Strategische Antworten für die neuen technologischen Herausforderungen in der Automobilindustrie – Bedeutung der Elektromobilität für den Premium-Hersteller BMW Group, IG Metall-Automobilkonferenz, Bad Gögging, 14.7.2011, http://www.igmetall-bayern.de/fileadmin/00_Redaktion/02_Downloads/AuMoKo/AuMoKo11-BMW-Schurkus.pdf
- Eigner, M. 2011: 3. PLM Future Workshop am 07. November 2011 an der TU Kaiserslautern; Keynote, S. 16, http://vpe.mv.uni-kl.de/cms/fileadmin/user_upload/PDF/PLM_Future_2011/_1__PLM_Future_Workshop_2011___Eigner.pdf
- Koch, B.; Hirsch, H. 2007: Optimized product engineering processes with mySAPPLM at BMW Group, <http://www.sdn.sap.com/irj/scn/go/portal/prtroot/docs/library/uuid/00b809d4-43f0-2b10-b486-a5103d091153?QuickLink=index&overridelayout=true&39354785333631>
- Spies, P.; Biswas, A. 2008: CAD-Integration im unternehmensweiten PEP PDM Backbone, ProSTEP IViP Symposium 2008, Proceedings, <http://www.prostep.org/de/events/symposium/symposium-2008>
- Albers, A. u.a.; Katzenbach, A. 2010: Konstruktionsmethodik 2.0 – Durchgängig rechnerunterstützte Methoden und Prozesse, Jahrestagung des Berliner Kreises 2010, Ulm, in: Newsletter Berliner Kreis, Ausgabe 14, April 2010

Kontakt

Dr.-Ing. Bodo Machner
 BMW AG
 Abteilungsleiter Produktdatenmanagement
 80788 München
bodo.machner@bmw.de

Ernst-Eckart Schulze, Lars Wolter,
Haygazun Hayka & Martin Röhlig

Intuitive Interaktion mit Strukturdaten aus einem PLM-System

Einleitung

Die Tätigkeit des Ingenieurs im Bereich der virtuellen Produktentwicklung betrifft neben dem Entwurf und der Absicherung einer dreidimensionalen Produktgeometrie auch die Erstellung, Analyse und Veränderung von strukturierten Produktinformationen. Dabei handelt es sich in erster Linie um Anforderungs-, Funktions- oder Produktstrukturen, welche innerhalb unterschiedlicher Phasen des Produktentstehungsprozesses in einem PLM-System verwaltet werden. Die Produktstruktur nimmt häufig einen zentralen Stellenwert ein, da sie als digitales Grundgerüst und Referenzstruktur innerhalb der Produktentwicklung gilt.

Die Anzahl der strukturell organisierten Einzelteile und Dokumente für ein Produkt können je nach Sparte bis über 1.000.000 Elemente einnehmen (Carneo 2010), welche in mehreren Baugruppen über verschiedene Hierarchiestufen zusammengehalten werden. In der Produktstruktur werden zu dem unterschiedliche Varianten des Produktes über Konfigurationsregeln organisiert. Unter dem zusätzlichen Aspekt der zeitlichen Dynamik bei den Iterationszyklen des Entwicklungsprozesses kann für der Produktstruktur von einem komplexen Informationsgebilde gesprochen werden.

Problemstellung

Visuellen Darstellungsformen von Produktstrukturen mangelt es bei heutigen IT-Werkzeugen der virtuellen Produktentwicklung an Übersichtlichkeit zur Beurteilbarkeit von Zusammenhängen komplexer Informationsstrukturen und an einer effizienten und intuitiven Navigation mit den dargestellten Inhalten. Zur Darstellung hierarchischer Baumstrukturen bildet der sog. *Indented View* (eingerückte Listendarstellung) oftmals die einzige Form der Visualisierung. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität von strukturierten Informationsobjekten und sich wandelnder Interaktionstechniken, zur Navigation für digitale Inhalte, lässt sich die Form der Darstellung und Art der Interaktion hinterfragen. Geeignete Methoden der visuellen Darstellung unter Verwendung von Visualisierungsalgorithmen können in Kombination mit der menschlichen Fähigkeit, relevante Muster in graphischen Darstellungen schnell zu erfassen, eine effizientere Analyse und besseres Verständnis über die komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten in strukturierten Informationen liefern.

Es soll der Frage nachgegangen werden, welche Methoden aus der Disziplin der Visual Analytics geeignet sind, um die Arbeitstätigkeit des Ingenieurs effizienter zu gestalten und ob neue Formen der intuitiven Interaktion den Umgang mit Produktinformationen für den Ingenieur erleichtern können.

Relevante Lösungsansätze

Aus der Wissenschaftsdisziplin der *Visual Analytics* sind inzwischen mehrere Ansätze beschrieben, welche den Umgang mit komplex strukturierten Daten erleichtern können. Nach Thomas und Cook ist *Visual Analytics* eine Methode, um vergangene und aktuelle Situationen zu verstehen, genauso wie die Ereignisse, die zu diesen Umständen führen (Thomas & Cook 2006). Die Anwendung von *Visual Analytics* auf ein bestimmtes Gebiet, wie bspw. die Produktentwicklung, verlangt nach Werkzeugen, die auf diese Aufgabe zugeschnitten sind (Aigner et al. 2008). Diese Werkzeuge erlauben es durch ihre angepasste Visualisierung die Daten für den Menschen überschaubar zu präsentieren, die Visualisierung interaktiv zu steuernden und den Zugriff auf Details zu ermöglichen.

In der Visual Analytics existieren generische Methoden zur Darstellung beliebiger Strukturen. Für statische Strukturen wird dabei in *flächenfüllende (space-filling)* und *Knoten-Kanten-Diagramme (node-linked)* oder einer Kombination beider Methoden unterschieden. Flächenfüllende Darstellungen werden typischerweise als *Treemaps* (Shneiderman 1992) oder in einer Abwandlung als *Voronoi-Treemaps* (Balzer et al. 2005) behandelt. Die Abbildung von Strukturen mittels Knoten-Kanten-Diagramme ist eine konventionelle Methode, wobei die Strukturelemente durch knotenverbindende Kanten repräsentiert werden. Hierbei existieren verschiedene Layoutformen, von welchem der kraft-gerichtete (force-directed node-link) Ansatz (Fruchterman & Reingold 1991) eine effektive Methode zur Generierung von Knoten-Kanten-Layouts gilt.

Die Systemhersteller aktueller PLM-Systeme integrieren moderne Visualisierungskomponenten in ihre Produkte. Diese Visualisierungskomponenten erlauben, neben der Darstellung der Produkte, auch die Visualisierung der im PLM-System abgelegten Metainformationen. Diese Visualisierungskomponenten sind jedoch dazu gedacht, die Metadaten innerhalb der Visualisierung der 3D-Geometrie anzuzeigen und zu analysieren. Eine optimierte Darstellung für eine verbesserte Navigation und Analyse der reinen Produktstrukturen ist nicht das Ziel dieser Visualisierungskomponenten. In neusten Entwicklungsversionen von Dassault Systèmes existieren auch erste Ansätze für die Nutzung von spacefilling Techniken zur Visualisierung von Produktstrukturen (vgl. Turntable-View in der 3D-Live-Komponente von Dassault Systèmes PLM 2.0). Allerdings ermöglicht die Strukturdarstellungen von geometrischen Komponenten kaum die Einbindung von Produktdaten, welche keine assoziierte Geometrie besitzen (bspw. Anforderungen).

Multitouch-Tische sind seit geraumer Zeit im Fokus zahlreicher Forschungsprojekte und scheinen viele Vorteile gegenüber traditionellen Desktop-Bildschirmen zu haben (Forlines et al. 2007). Die Möglichkeiten mit großen Touch-Geräten mit mehreren Personen gleichzeitig zu interagieren sowie ihre starke Verbreitung, legt nahe, die Interaktion mit den Produktstrukturen auch unter Verwendung der Touch-Technologie zu untersuchen. Vorhergehende Untersu-

chungen betrachten meist die Tauglichkeit im Umgang mit herkömmlichen graphischen Interfaces (Wigdor et al. 2007), während hier eine neuartige Schnittstelle untersucht wird.

Umsetzung im Rahmen dieser Studie

Zur Erprobung von neuen Interaktionsmethoden mit Produktstrukturen wurden drei unterschiedliche Visualisierungsarten in einer eigens erstellten Softwareapplikation umgesetzt (Röhlig 2011). Für eine praxisbezogene Anwendung wurde eine Schnittstelle realisiert, welche die produktbezogenen Strukturdaten direkt aus einem PLM-System bezieht. Zur Realisierung des PLM-Zugriffs wurde auf die Kompetenzen des PLM-Zentrums am Fraunhofer IPK in Berlin und dessen Systemlandschaft zurückgegriffen. Die erstellte Applikation läuft unter JAVA zum einen auf herkömmlichen Desktoprechnern sowie auf Multitouchgeräten.

Visualisierung als Voronoi-Treemap

Treemap-Layouts unterteilen den zur Verfügung stehenden Visualisierungsbereich auf effiziente Weise, ohne eine Bildung von Löchern oder Überlagerungen und können ferner spezielle Attribute der Strukturelemente anhand der zugehörigen Flächengröße kodieren. Herkömmliche Treemaps beschränken sich auf rechteckige Formen, welche für die Wahrnehmung der hierarchischen Struktur nur bedingt geeignet sind. Das bei dieser Untersuchung genutzte Konzept folgt den in (Balzer et al. 2005) vorgestellten Ansätzen zu *Voronoi-Treemaps*, welche die genannten Defizite durch Verwendung und Unterteilung von Polygonen und die Einbettung der Visualisierung in frei wählbare Formen ausgleicht.

Das Grundkonzept besteht dabei in der Generierung von Polygon-Treemap-Layouts und der Anwendung von zentrischer Voronoi Tessellation. Diese Grundkonzepte wurden für die Visualisierung kombiniert und dabei die Generatorpunkte der Voronoi-Zellen auch gleichzeitig als Schwerpunkte der Zellen verwendet. Zusätzlich wurden die Generatoren der Zellen mit Gewichtungsaparametern versehen, wodurch der Zellengröße eine semantische Bedeutung zugeordnet werden kann. Diese semantische Bedeutung beschreibt

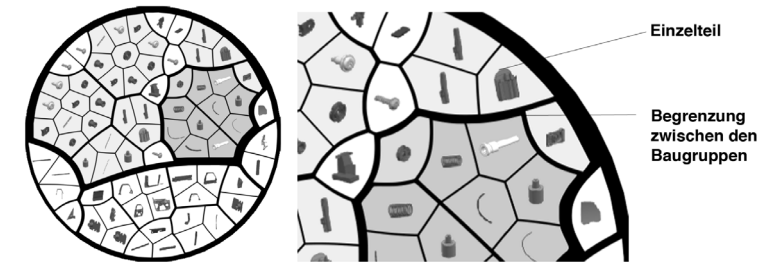


Abbildung 1: Detail der Voronoi-Treemap-Darstellung

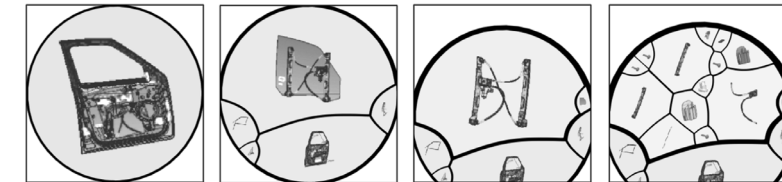


Abbildung 2: Sequenz aus der Navigation durch die Hierarchieebenen der Voronoi-Treemap-Visualisierung

den Zusammenhang zwischen dem Flächeninhalt der Regionen und Anzahl der untergeordneten Elemente in dieser Region, um den Umfang der Teilstruktur anzudeuten, welcher durch diese Region repräsentiert wird.

Wie in Abbildung 1 dargestellt entspricht in der hier genutzten Darstellung jede Voronoi-Region einem Bauteil bzw. einer Baugruppe der Produktstruktur und die Unterteilung einer Region repräsentiert die Elemente einer übergeordneten Klasse. Die allumschließende Begrenzung stellt das Wurzelement dar und die weitere rekursive Parkettierung in verschachtelte Regionen die untergeordneten Elemente.

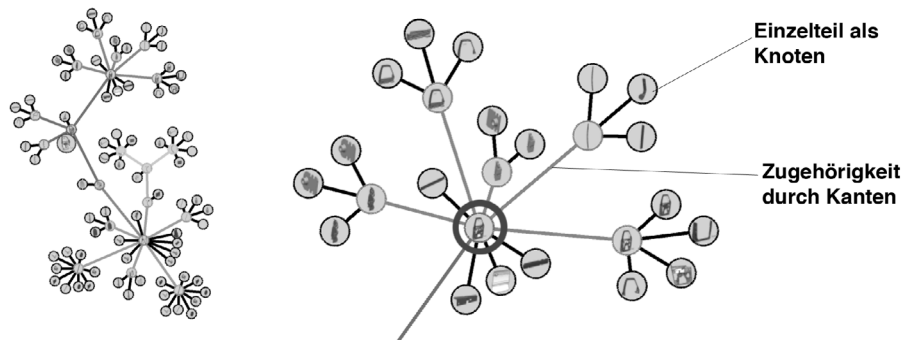
Innerhalb der Voronoi-Zellen wird jeweils ein Vorschaubild der entsprechenden Geometrie des Bauteils oder der Baugruppe dargestellt. Während der Navigation kann eine Baugruppe weiter geöffnet werden indem die darin enthaltenen Subkomponenten erscheinen. Eine Sequenz der Navigation ist in Abbildung 2 dargestellt.

Visualisierung als Force-Directed Node-Link

Die Abbildung von hierarchischen Strukturen mittels *Knoten-Kanten-Layouts* ist eine konventionelle Methode, wobei die Strukturelemente durch Knoten und deren Beziehungen durch knotenverbindende Kanten repräsentiert werden. Es existieren verschiedenartige Layoutformen, welche sich hauptsächlich durch die räumliche Verteilung der Layoutkomponenten unterscheiden. Gemein ist diesen Methoden, dass unter Verwendung unterschiedlicher Ordnungsmechanismen eine möglichst optimale oder semantisch sinnvolle Distribution der Knoten und Kanten erzielt wird.

Force-Directed (Kräfte-gerichtete) Ansätze sind Methoden für die Generierung geradliniger Knoten-Kanten-Layouts. Allgemein simulieren *Force-Directed* Algorithmen ein System von Kräften entsprechend der zugrundeliegenden Datenstruktur. Das Kräftesystem entspricht dabei typischerweise einem physikalischen Modell und ordnet jedem Strukturelement einen Körper und jeder Beziehung eine Kraft zu. In einem iterativen Prozess entsteht daraufhin eine Konfiguration mit einem Gleichgewicht innerhalb des Systems. Jeder Körper befindet sich hierbei in einer Position, in der die Summe aller Kräfte auf den Körper unter einem festgelegten Grenzwert liegt. Diese Vorgehensweise vermindert Überlappungen von Knoten und sich überschneidende Kanten wie in Abbildung 3 dargestellt ist.

Abbildung 3: Detail der Node-Linked-Darstellung



Für die Node-Linked-Darstellung wurden mehrere Force-Directed-Algorithmen umgesetzt um eine optimale Distribution zu erhalten. Zur visuellen Identifikation der Bauteile wurden alle Knoten mit einem Vorschabild von der Geometrie der betreffenden Bauteile oder Baugruppen ausgefüllt.

Visualisierung als Indented-View

Die Darstellung einer hierarchischen Struktur mittels des *Indented-View* wird von vielen Programmen unterstützt. Man findet sie in Datei-Browsern und in fast allen Programmen die eine hierarchische Struktur darstellen müssen. Bei der hier genutzten Methode zur Visualisierung wurde der JTree, eine Standardkomponente der JAVA GUI Bibliothek Swing verwendet. Die Komponente stellt jeden Eintrag in einer eigenen Zeile dar, untergeordnete Einträge sind eingerückt und können ein bzw. ausgeblendet werden.

Aus der Produktstruktur werden die Knoten über Textfelder in die Struktur eingebunden. Neben der textuellen Beschreibung der Elemente wurde zusätzlich ein Bild neben der Hierarchie des *Indented-Views* dargestellt sobald man einen der Knoten selektiert. Diese Herangehensweise entspricht der gängigen Umsetzung bei unterschiedlichen Applikationen der industriellen Informationstechnik.

Nutzung von unterschiedlichen Interaktionsgeräten

Die Applikation zur Visualisierung der Produktstruktur funktioniert auf herkömmlichen Desktoprechnern sowie auf Multitouch-Geräten. Dadurch werden für eine Evaluation verschiedene Interaktionsmethoden bereitgestellt.

Die erste Interaktionsmethode orientiert sich an der Verwendung von Maus und Tastatur. Die Software wird hiermit normal bedient wie jede klassische Applikation auch.

Für die touch-basierte Interaktion wird ein hochauflösender Touch-Monitor verwendet (Abbildung 4, links), um ein ähnliches Umfeld zu bieten wie dies ein lokaler Arbeitsplatz mit Maus und Tastatur darstellt. Um die Indented-View Darstellung nicht zu benachteiligen wurde eine geringe Auflösung des Touch Monitors verwendet, so

dass das Anklicken von Elementen mit dem Finger besser möglich ist. Aus technischer Sicht verwendet das Programm die Windows 7 Schnittstelle, um die Fingerkontakte zu verarbeiten. Das *Multitouch for Java Framework* (Laufs & Ruff 2012) liefert die dazu notwendigen Funktionalitäten.

Eine Evaluation der Software am Multitouch-Tisch, wie in Abbildung 4 (rechts) dargestellt, ist technisch gesehen möglich, soll aber in diesem Fall für eine spätere Untersuchung angedacht werden, wo auch auf den Multi-User Aspekt eingegangen werden kann. Es wird vermutet, dass die Unterschiede bezüglich des zeitlichen Aufwands den ganzen Arm über den Tisch zu bewegen im Gegensatz zur kurzen Bewegung der Hand am Monitor wenig vergleichbare Daten zur klassischen Interaktion liefern würde.

Methodik

Um die Effizienz und Tauglichkeit der Darstellungsformen vergleichen zu können stellt der Artikel eine Studie mit mehreren Probanden vor, welche an einer vorgegebenen Produktstruktur, jeweils mit verschiedenen Formen der Darstellung und Interaktionstechnik, realitätsgetreue Ingenieurs-Aufgaben zu bewerkstelligen haben.

Als Teststruktur dienen Produktstrukturen unterschiedlicher Komplexität. Die beispielhafte Struktur einer Autotür bestehend aus 73 Bauteilen, gegliedert in 21 Baugruppen über 8 Hierarchieebenen und die eines vollständigen Fahrzeugmodells mit 7109 Bauteilen, gegliedert in 1960 Baugruppen über 12 Hierarchieebenen. Die große Produktstruktur dient dabei primär zur Validierung, dass die Visualisierungen auch für solch große industrierelevante Strukturen verwendet werden können. Für die hier beschriebene Studie soll zunächst die kleinere der beiden Strukturen für eine Evaluation mit mehreren Teilnehmern herangezogen werden. Für die Visualisierung und auch der Untersuchung zur Interaktion können die Produktstrukturen direkt aus einem PLM-System ausgelesen werden, um später auch Möglichkeiten zur Änderung und Neu-Erstellung einer Struktur zu untersuchen. Änderungen würden beispielsweise die Manipulation von Metadaten umfassen sowie

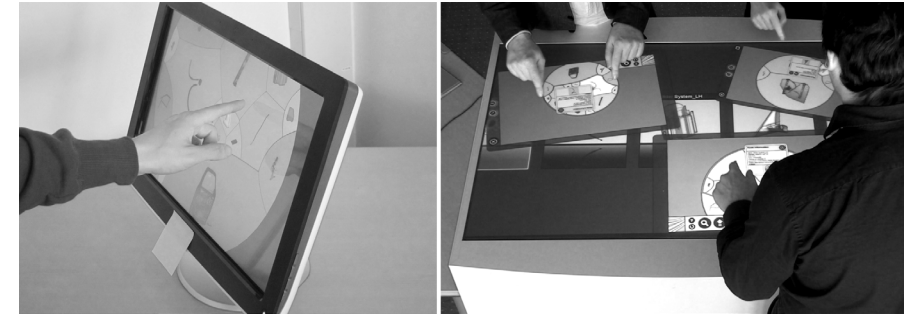


Abbildung 4: Implementierung der Visualisierung auf Multitouch-Geräten

strukturelle Änderungen wie das Entfernen oder umpositionieren eines Knotens. Die Erstellung beschreibt einen eigenen Prozess, in dem eine (Teil)-Struktur von Grund auf neu angelegt wird.

Zur Darstellung der Produktstruktur werden aus der Domäne der *Visual Analytics* in einer Vorabrecherche unterschiedliche Visualisierungsformen ausgewählt. Dabei spielen die Kriterien der Ausnutzung des zur Visualisierung verfügbaren Darstellungsraumes als auch die Möglichkeit, innerhalb der Darstellung ein Verständnis über die Topologie der Struktur aufzubauen, eine zentrale Rolle. Es wurden dadurch die Visualisierungsformen der *Voronoi-Treemap* und des *Force-Directed Node-Link* als geeignete Methode zur Visualisierung von komplexen Produktstrukturdaten ausgewählt und mit der Darstellungsform zum klassischen *Indented-View* verglichen (Abbildung 5).

Die Probandengruppen führen die Aufgaben jeweils mit unterschiedlichen Interaktionstechniken durch. Dabei steht die klassische Bildschirmarbeit mit Maus und Tastatur der neuen Interaktionstechnik an einem Multitouch-Display gegenüber. Jeder Proband hat eine Einführung in die beiden neuen Visualisierungsarten bekommen, dazu wurde den Probanden eine kleinere Teststruktur zur Verfügung gestellt, um von den neuen Visualisierungsarten eine bekannte Baumstruktur abzuleiten. Weiterhin konnte der Proband in diesen Aufgaben den Umgang mit dem Programm üben und sich daran gewöhnen.

Für den eigentlichen Vergleich der Visualisierungsformen wurden jedem Probanden sieben nachfolgend beschriebene und gruppierte Aufgaben gestellt. Die Aufgaben spiegeln nach Ansicht der Autoren realitätsgetreue Grundformen beim ingenieurmäßigen Umgang mit hierarchischen Strukturen dar:

Aufgaben mit suchendem Charakter:

- Aufgabe 1: Finden und selektieren eines Bauteiles
- Aufgabe 5: Alle Vorkommen eines Bauteils anhand von Bild und Namen zu finden

Aufgaben, die ein Verständnis zur Topologie der Struktur verlangen:

- Aufgabe 2: Identifizierung aller Knoten von einem selektierten Element bis zur Wurzel
- Aufgabe 6: Anzahl direkter Kinder eines Knotens

Aufgaben die einen Vergleich zwischen Unterstrukturen verlangen:

- Aufgabe 3: Welcher von zwei Knoten besitzt die meisten untergeordneten Knoten
- Aufgabe 4: Welcher von zwei Knoten besitzt die meisten untergeordneten Knoten inklusive deren genauer Anzahl

Aufgabe die einen Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Strukturen verlangt:

- Aufgabe 7: Zwei komplette Strukturen werden miteinander verglichen und entsprechende Unterschiede müssen identifiziert werden.

Die Aufgaben wurden entsprechend ihrer Nummerierung gestellt. Die Gesamtdauer für die Bearbeitung der Aufgaben liegt bei etwa 20 bis 30 Minuten. Zusätzlich zu den Aufgaben wurden jedem Probanden Fragen zu der Qualität der Darstellung sowie zu vorhandenem Vorwissen und dem Hintergrund der Probanden gestellt.

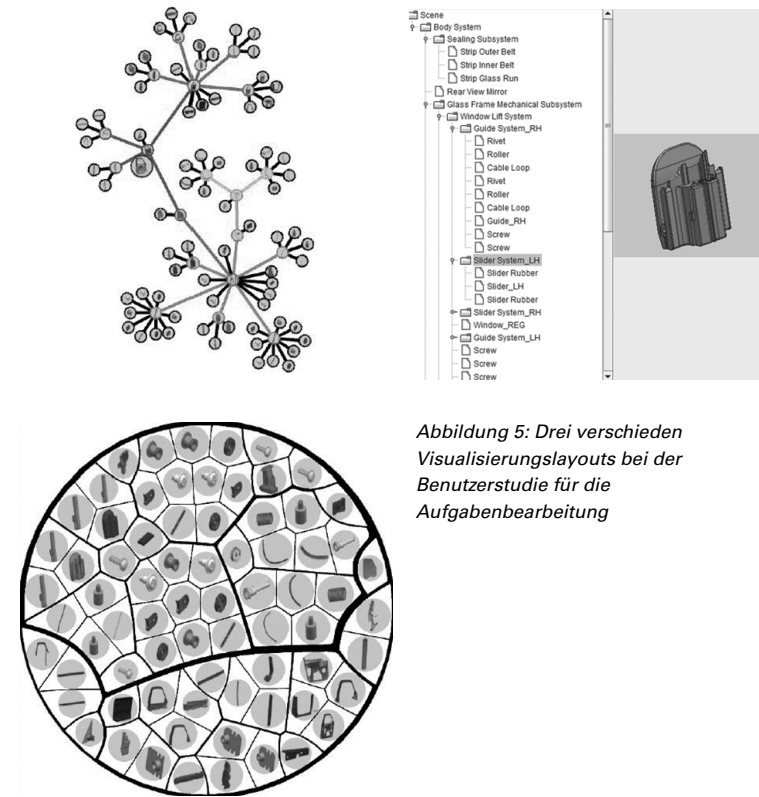


Abbildung 5: Drei verschiedene Visualisierungslayouts bei der Benutzerstudie für die Aufgabenbearbeitung

Ergebnisse

Die bisherigen Erfahrungen zeigen eine positive Resonanz der Probanden bei der Nutzung von Visualisierungsformen basierend auf Darstellungsmethoden der Visual Analytics.

Innerhalb der durchgeführten Benutzerstudie wurden die in diesem Artikel beschriebenen Evaluationsmethoden für realitätsgetreue Arbeitsaufgaben eines Ingenieurs zu einem großen Teil bereits umgesetzt (Abbildung 6). Innerhalb der nächsten Monate sollen weitere Ergebnisse gesammelt werden, um die Ergebnisse der Studie zu präzisieren.

Ergebnisse bezüglich verschiedener Arten der Informationsvisualisierung

Abbildung 7 zeigt die Auswertung der Ergebnisse der ersten Untersuchungen. Durch die geringe Anzahl an Testkandidaten während dieser ersten explorativen Studie fällt die Standardabweichung bei einigen der Aufgaben extrem aus. Nichts desto trotz lassen sich Tendenzen aus den Ergebnissen ableiten, die ein gezieltes vertiefen der Untersuchung erlauben.

Die kurzen Zeiten in Aufgabe 5 bei den neuen Visualisierungsformen zeigen den erheblichen Vorteil einer *permanenten graphischen Darstellung* der Objekte in der Struktur. Wohingegen der Verzicht auf textuelle Informationen keinen so großen Nachteil für die Visualisierungstechniken bedeutet wie aus den Ergebnissen in Aufgabe 2 zu sehen ist. Die zusätzliche Information zur Nennung der Knoten kann bei den neuen Visualisierungsformen schnell genug ermittelt werden.

Vergleicht man die Aufgaben die sich mit dem *Strukturverständnis* befassen mit denen die suchende Tätigkeit beinhalten, so erkennt man den Vorteil des *Indented-View* beim Strukturverständnis. Aufgabe 6 bescheinigt die Probleme, welche die neuen Techniken besitzen in Bezug auf die Identifikation von strukturellen Zusammenhängen, während Aufgabe 1 zeigt, dass das klassische Suchen vor allem in der *Voronoi-Treemap* schneller durchgeführt werden kann

Abbildung 6: Aufbau der Benutzerstudie durch Zusammensetzung der Probandengruppen

| | | Form der Darstellung | | |
|--------------------------|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Klassischer indented-view | Voronoi-Treemap | force-directed node-link |
| Methoden der Interaktion | klassische Tastatur und Maus Interaktion | Probanden- gruppe A | Probanden- gruppe B | Probanden- gruppe C |
| | | 5 Teilnehmer | 6 Teilnehmer | 6 Teilnehmer |
| | Multitouch-interaktion | Probanden- gruppe D | Probanden- gruppe E | Probanden- gruppe F |
| | | 4 Teilnehmer | 0 Teilnehmer | 0 Teilnehmer |

als in einem *Indented-View*. Dieser Vorteil beim Suchen wird, neben der bildlichen Darstellung, ebenfalls ein Grund für die besseren Ergebnisse in Aufgabe 5 sein.

Die Aufgaben 3 und 4 sind beides *vergleichende Aufgaben*, bei denen die Streuung der Ergebnisse dafür sorgt, dass man keine klare Aussage über Tätigkeiten treffen kann, die einen Vergleich erfordern. Diese Problematik trifft auch bei Aufgabe 7 zu, *welche suchende und strukturelevante Aktivitäten* zur Lösung erfordert. Dort kann keine der Darstellungsformen gegenüber den anderen einen Vorteil erzielen.

Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass teilnehmende Probanden an der vergleichenden Untersuchung bezüglich der Strukturdarstellung ein unterschiedliches Vorwissen besitzen. Die Zeit des täglichen Navigierens durch Strukturen des *Indented-View* (z.B. in Dateisystemen) kann nicht mit der Zeit einer kurzen Einführung in neue Visualisierungsformen konkurrieren.

Unterschiedliche Interaktionstechniken

In Abbildung 8 werden die Ergebnisse für den *Indented-View* mit den beiden Interaktionstechniken dargestellt. Auffällige Unterschiede können in den Aufgaben 4, 5 und 7 festgestellt werden. Aufgabe 5 und 7 verlangen vom Nutzer einen Überblick zu erhalten, einmal um eine *Gesamtanzahl zu erfassen* und einmal um die *Strukturen zu vergleichen*. Bei beiden Aktivitäten muss jedes mal nach einer Interaktion, wie dem Aufklappen oder dem markieren eines Knotens, die Hand vom Touch-Monitor entfernt werden, um für das Auge einen freien Blick zu ermöglichen. Bei klassischen Interaktionstechniken kann die Maus in der Nähe der Knoten verweilen ohne die Sicht des Auges zu behindern und im Anschluss sofort wieder mit der Struktur interagieren. Zusätzlich zu den zeitlichen Messungen kann man bei der Multitouch-Interaktion feststellen, dass einfache Aktionen wie das Anklicken eines einzelnen Elementes nicht so präzise funktioniert wie mit der Maus-Interaktion was in der qualitativen Befragung ermittelt wurde. Auf die Geschwindigkeit mit der die Aufgaben bearbeitet wurden scheint dies jedoch keinen Einfluss zu haben, betrachtet man die geringen Unterschiede zwischen Touch- und Mausinteraktion bei einem Großteil der Aufgaben.

Abbildung 7: Bearbeitungszeit der Aufgaben in Sekunden. Darstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung bei Interaktion mit der Maus

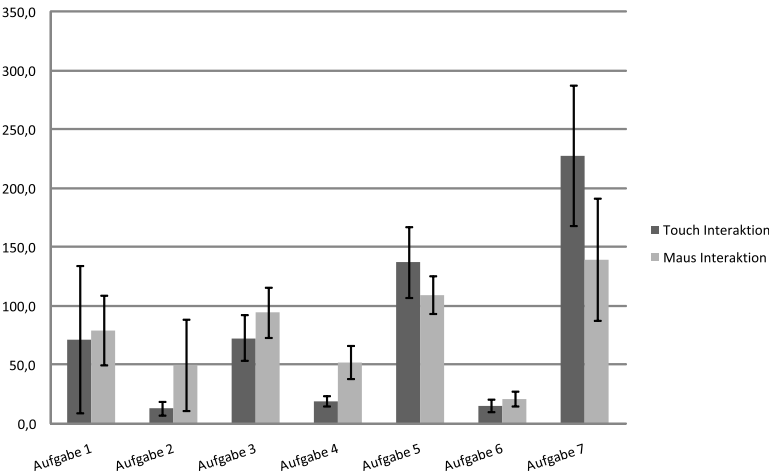
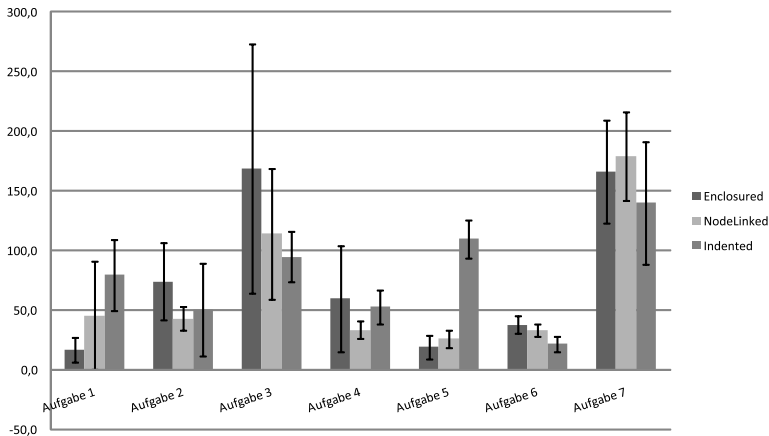


Abbildung 8: Bearbeitungszeit der Aufgaben in Sekunden. Gegenüberstellung der Touch Interaktion mit der Maus Interaktion beim Indented-View

Diskussion und Ausblick

Die oben dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die in diesem Artikel vorgestellten Methoden der Visual Analytics in speziellen Fällen geeignet sind, um die Ingenieurstätigkeit zu unterstützen.

Bei *suchenden Tätigkeiten* scheinen die Visualisierungstechniken der *Voronoi-Treemap* oder der *Node-Linked* Darstellung deutliche Vorteile zu haben. Der Grund ist in der graphischen Repräsentation der Struktur und deren Elemente im Vergleich zu dem eher textbasierten *Indented-View* zu sehen.

Aktivitäten zum *Aufbau eines Verständnisses über den strukturellen Zusammenhang* werden nicht offensichtlich unterstützt. Im Falle der *Voronoi-Treemap* Darstellung ist dies leicht zu nachvollziehbar, da die hierarchische Struktur nur implizit durch die Umrandung der Zellen erkennbar ist. Bei der Navigation durch die Struktur sind obere Strukturelemente (Wurzel oder Elternkomponenten) nicht mehr ersichtlich. Bei der Darstellung als *Node-Linked* Diagramm werden bei der hier vorgestellten Visualisierungsmethode jeweilige Elemente auf gleicher Strukturebene in verschiedenen Längen zu Ihrem Oberknoten dargestellt. Diese unterschiedlichen Längen tragen offenbar nicht zum Strukturverständnis bei.

Die positive Resonanz innerhalb der qualitativen Befragung nach der Verwendung neuer, graphischer Darstellungsformen für hierarchische Strukturen zeigt, dass Methoden der Visual Analytics zur Unterstützung der Ingenieurstätigkeit ein lohnenswerter Ansatz sind. Für den zukünftigen Ausbau für Anwendungen ist es ratsam verschiedene Visualisierungsformen zu kombinieren, um deren jeweiligen Vorteil zu bündeln.

Literaturverzeichnis

- Aigner, W., Miksch, S., Müller, W., Schumann, H. & Tominski, C. 2008: „Visual Methods for Analyzing Time-Oriented Data“, Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 14, No. 1, S. 47–60, IEEE Computer Society Press.
- Balzer M., Deussen, O, Lewerentz C. 2005: Voronoi treemaps for the visualization of software metrics. In: Proceedings of ACM symposium on Software visualization. S. 165–172.
- Carneo, M. 2010: PLM for the world’s largest machine. PLM Forum 2010. Mannheim.
- Forlines, C., Wigdor, D., Shen, C., Balakrishnan, R. 2007: Direct-touch vs. Mouse input for Tabletop Displays. In: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI ,07). ACM, New York, NY, USA, S. 647–656.
- Fruchterman, T. M. J., Reingold E. M. 1991: Graph drawing by force-directed placement. In: Software. Practice and Experience. 21, 11, S. 1129–1164
- Laufs, U., Ruff, Ch. 2012: MT4j – Multitouch for Java. Beitrag im Internet. <http://www.mt4j.org>. abgerufen am 01.04.2012. Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation, Stuttgart
- Röhlig, M. 2011: Visualisierung und intuitive Interaktion für komplexe Produktstrukturen. Diplomarbeit. Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Informationstechnik und Elektrotechnik.
- Shneidermann B. 1992: Tree visualization with tree-maps: 2-D spacefilling approach. ACM Transaction on Graphics 11, 1, S. 92–99
- Thomas, J. J., Cook, K. A. 2006: “A Visual Analytics Agenda,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 26, no. 1, S. 10–13.
- Wigdor, D., Perm, G., Ryall, K., Esenther, A., Chia, S. 2007: Living with a Tabletop: Analysis and Observations of Long Term Office Use of a Multi-Touch Table. Horizontal Interactive Human-Computer Systems. Second Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer System, S. 60–67

Kontakt

Dipl.-Ing. Ernst-Eckart Schulze
 Technische Universität Berlin
 Fachgebiet Industrielle Informationstechnik
 derzeit tätig bei:
 Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
 Zeunerstr. 38
 01069 Dresden
www.ivi.fraunhofer.de

Dipl.-Inf. Lars Wolter
 Technische Universität Berlin
 Fachgebiet Industrielle Informationstechnik
 Pascalstr. 8-9
 10587 Berlin
www.iit.tu-berlin.de

Dr.-Ing. Haygazun Hayka
 Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik
 Pascalstr. 8-9
 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. (FH) Martin Röhlig
 derzeit tätig bei:
 Universität Rostock
 Fachgebiet Visual Computing
 Albert-Einstein-Straße 22
 18059 Rostock
www.informatik.uni-rostock.de

Michael Wegner, Georg Freitag & Markus Wacker

GENIAC – Konfigurieren komplexer Produktsimulationen mit Hilfe von natürlichen Benutzeroberflächen

Mit der zunehmenden Bedeutung von virtuellen Prototypen in den frühen Phasen der Produktentwicklung wachsen ebenso die an die verwendeten Softwarelösungen gestellten Anforderungen. Sollen unterschiedliche Faktoren wie Funktionalität, Design oder auch Ergonomie getestet werden, so muss die verwendete Software Module bereitstellen, welche die Erstellung von ganzheitlichen Produktmodellen ermöglichen. Zu den benötigten Modulen zählen zum Beispiel Simulation, Grafik, Eingabeschnittstellen oder Sound. Mit der steigenden Komplexität der zu erstellenden Prototypen wächst jedoch auch der Aufwand für die Entwickler und Anwender, sich in diese einzuarbeiten, diese zu konfigurieren und zu verwalten. An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt GENIAC an. Sein Ziel ist es, die Konfiguration von hochkomplexen Software-Frameworks mit Hilfe natürlicher Benutzeroberflächen zu vereinfachen. Hierzu werden die zu untersuchenden Konfigurationen als Netzwerke auf großflächigen Multi-Touch Bildschirmen dargestellt und mittels natürlicher Gestensteuerung bearbeitet.

Der folgende Artikel soll eine Einführung in das Konfigurationswerkzeug GENIAC und die dahinter stehenden Ideen liefern. Dazu werden zuerst kurz die Rahmenbedingungen des Projektes umrissen und ein Beispielszenario für die Nutzung von GENIAC vorgestellt, welches in den folgenden Ausführungen zur Veranschaulichung

genutzt werden soll. Als nächstes werden bereits bestehende Ansätze für grafische Konfigurationswerkzeuge vorgestellt und diskutiert. Die daraus hergeleitete Darstellung in GENIAC wird im darauf folgenden Abschnitt erläutert. Abschließend beschreiben wir verschiedene Interaktionsmöglichkeiten, die dem Nutzer von GENIAC zur Verfügung stehen, um mit Konfiguration zu arbeiten.

Rahmenbedingungen und Beispielszenario

Ausgangspunkt für GENIAC bildet das an der Technischen Universität Dresden entwickelte, modulare Simulationsframework SARTURIS (Kunze 2010). Mit seiner umfassenden Modulbibliothek können Modelle verschiedenster mobiler Arbeitsmaschinen erstellt und simuliert werden. Beschrieben werden diese Modelle mit Hilfe von XML-Dateien, welche bisher in einfachen Texteditoren aufwendig von Hand erstellt und gewartet werden. Der hohe Aufwand dieses Ansatzes erklärt sich anhand der großen Anzahl an Konfigurationsdateien sowie ihrer steigenden Komplexität. Alternativ lässt sich die Struktur von SARTURIS-Modellen sehr gut als Netzwerk von sich gegenseitig referenzierenden Knoten abbilden. Diese Form der vorwiegend grafischen Darstellungen von Knoten und Abhängigkeiten bietet sich besonders unter dem Aspekt der natürlichen Manipulation mit Hilfe eines Multi-Touch Gerätes an, weswegen sie als Grundlage für GENIAC gewählt wurde. Da dieser Ansatz auch für andere Frameworks als SARTURIS von hohem Interesse ist, wird bei der Entwicklung auf eine Erweiterbarkeit für weitere, repräsentative Anwendungsfälle geachtet.

Als Orientierungshilfe und Fallbeispiel beim Entwurf von GENIAC wurde ein zuvor ausgearbeitetes Beispielszenario genutzt, welches eine übliche Konfigurationsaufgabe in SARTURIS beschreibt: die Erstellung einer Simulation für eine Baumaschine. Dafür müssen Knoten aus drei verschiedenen Modulen ausgewählt, erstellt und verbunden werden: Eingabe, Simulation und Ausgabe. Die Eingabe erfolgt über mehrere Eingabegeräte (zum Beispiel Lenkrad oder Joystick), welche ihre Daten an einen Simulationsknoten weiterreichen. Dieser kennt das physikalische Modell der Baumaschine und berechnet, wie sich die Maschine unter den aktuellen Bedingungen verhalten würde. Dazu sind weitere Knoten nötig, etwa ein Integrator

zur Lösung der anfallenden Differentialgleichung-en sowie ein Knoten der sich um die Kollisionserkennung für das Modell kümmert. Weiterhin muss für die Darstellung ein Szenegraph definiert werden, welcher die grafische Repräsentation der Baumaschine sowie der Umgebung enthält. Die einzelnen Teile des 3D-Modells erhalten ihre Positionen dabei aus dem Simulationsknoten. Die Konfigurationsaufgabe lässt sich damit in zwei Teilprobleme aufspalten: Die separate Erstellung und Kombination von Knoten aus den drei Modulen sowie die korrekte Verknüpfung der drei Module untereinander. Dabei gewährleistet vor allem der zweite Schritt den notwendigen Informationsfluss innerhalb der Anwendung. In den folgenden Abschnitten werden wir wiederholt auf dieses Szenario und die angesprochenen Aufgaben zurückkommen um unsere Designentscheidungen zu veranschaulichen.

Darstellung in existierenden grafischen Konfigurationswerkzeugen

Auf dem Gebiet der Konfigurationswerkzeuge und der grafischen Programmierung gibt es zahlreiche Vorbilder in den verschiedensten Anwendungsgebieten. Je nach Werkzeug und den zugrunde liegenden Datenmodellen kommen dabei unterschiedliche Ansätze zum Einsatz: Hierarchien, Datenflussdiagramme und objektorientierte Darstellungen (siehe Abb. 1).

Hierarchien zeichnen sich durch ihre klare Struktur und einfache Verständlichkeit aus. Die einzige mögliche Verbindungsart ist in Form einer Eltern-Kind-Beziehung zwischen zwei Knoten, wobei im Allgemeinen die Einschränkung besteht, dass ein Kindknoten nur einen Elternknoten besitzen darf. Die daraus resultierenden Baumdarstellungen sind dementsprechend leicht zu erzeugen und gut erfassbar. Allerdings sind Hierarchien ungeeignet für flexible Konfigurationen, da über die Eltern-Kind-Beziehungen hinausgehende Verknüpfungen fehlen. Deshalb werden sie auch in erster Linie zur Beschreibung von statischen Strukturen genutzt, etwa für Benutzeroberflächen (Microsoft 2008) oder Szenegraphen im 3D-Bereich (Icido 2012). Hierbei sind die Baumdarstellungen meist nur ein zusätzliches Hilfsmittel zur Visualisierung der Datenstruktur und nicht das primäre Werkzeug.

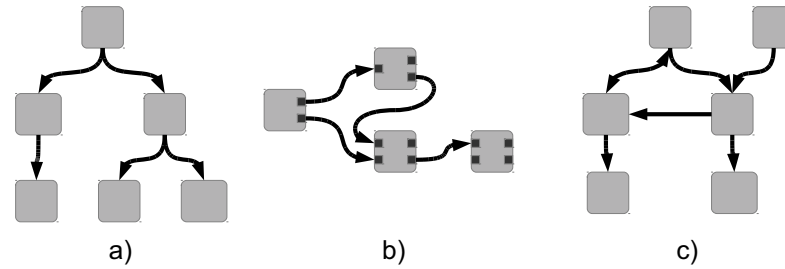


Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen Darstellungsformen in Konfigurationswerkzeugen:
a) Hierarchie, b) Datenflussdiagramm, c) Objektorientiert.

Bei der Datenflussprogrammierung werden für jeden Knoten feste Ein- und Ausgänge definiert, welche im Allgemeinen einen bestimmten Datentyp erwarten oder ausgeben. Dies erlaubt deutlich komplexere Konfigurationen, da ein Knoten Daten aus mehreren Quellen erhalten und weiterverarbeiten kann. Weil nur definierte Datenpakete ausgetauscht werden und zudem die Richtung des Datenflusses streng vorgegeben ist, verfügen so erstellte Modelle über eine sehr lose Kopplung, da alle Knoten unabhängig voneinander arbeiten und nur durch die auf ihren Eingängen ankommenden Informationen beeinflusst werden. Die mit der Nutzung von einfachen Datentypen einhergehende Flexibilität hat allerdings den Nachteil, dass der Nutzer selbst wissen muss, ob eine Verbindung sinnvoll ist oder nicht – Verbindungen haben keine eigene Semantik sondern sind nur Datenkanäle. Zudem werden die erstellten Netzwerke auf Grund der vielen Verbindungen schnell unübersichtlich und schwer erfassbar.

Die grundlegendste Darstellungsform für Datenflussdiagramme sind Netzwerke, wobei die Knoten meistens in Richtung des Datenflusses entweder horizontal (DSP Robotics 2012) oder vertikal (vvvv Group 2011) ausgerichtet werden. Konsequenter lässt sich dieser Ansatz allerdings kaum durchsetzen, da in vielen Konfigurationen Schleifen vorkommen, also Verbindungen die auf frühere Knoten in der Pipeline zurückverweisen. Um dies zu vermeiden

beziehungsweise um sich kreuzende Verbindungen generell zu reduzieren, lassen sich Proxy-Objekte einsetzen (Epic Games 2012), die als Stellvertreter für einen Knoten fungieren und in direkter Nähe zum Zielknoten der Verbindung platziert werden können. Auch das Zusammenfassen von Teilen des Netzwerkes zu Untermodulen ist üblich, um die Darstellungen zu strukturieren und zu ordnen.

Einige Werkzeuge verbinden auch die beiden gerade beschriebenen Sichten. Das EON Studio (EON Reality 2008) etwa organisiert alle Komponenten einer Simulation in einer Baumstruktur, welche gleichzeitig den Szenegraphen der grafischen Komponenten darstellt. Komplexere Interaktionen zwischen Knoten können dann in einer getrennten Ansicht als Datenflussdiagramm erstellt werden. Einen ähnlichen Aufbau benutzt auch das MaggLite Toolkit (Huot et al. 2004) zur Erstellung von User Interfaces. Leider werden Konfigurationen durch diese Trennung schnell unübersichtlich und sind für Außenstehende schwer nachvollziehbar, da die Logik auf unterschiedliche Sichten verteilt ist. Nichtsdestotrotz bietet dieser Ansatz eine hohe Flexibilität für die Arbeit mit komplexen und heterogenen Frameworks, die sich nicht einfach auf eine der beschriebenen Ansichten reduzieren lassen.

Der Aufbau des Simulationsframeworks SARTURIS ist eher objektorientiert. Das bedeutet, dass im Gegensatz zu den bisher diskutierten Ansätzen die Komponenten fester aneinander gekoppelt sind. Die Kommunikation erfolgt hierbei über definierte Schnittstellen und kann sowohl uni- als auch bidirektional sein. Generell lassen sich Verbindungen nicht mehr starr als Hierarchiebeziehung oder Datenkanäle einordnen, sondern sind ganz auf die jeweilige Aufgabe zwischen ihren Knoten ausgerichtet, besitzen also eine eigene Semantik. Das hat den Vorteil, dass die Gefahr, falsche Knoten zu verbinden, sinkt, da die Schnittstellen genauer auf ihren Zweck beschränkt sind als generische Datenleitungen. Allerdings ist es schwieriger eine verständliche, grafische Darstellung für eine solche Konfiguration zu finden, da verschiedene Verbindungen unterschiedliche Bedeutungen besitzen. Erstellt man nur ein generisches Netzwerk ohne einer grundlegenden Struktur (ob Baum oder Datenflussdiagramm) so bürdet man dem Nutzer zusätzliche kognitive

Last auf. Dieser muss, um den Überblick zu behalten, selbst Ordnung in das Geflecht aus Knoten bringen und kann sich weniger auf seine eigentliche (inhaltliche) Aufgabe konzentrieren. Um dieses Problem zu vermeiden übersetzt GENIAC die eigentliche Datenstruktur von SARTURIS in eine leichter verständliche Baumdarstellung.

Darstellung von Konfigurationen in GENIAC

Die Philosophie hinter GENIAC ist, dem Nutzer die Erstellung von Konfigurationen so einfach wie möglich zu machen. Hierzu soll die Komplexität des der Konfiguration zugrunde liegenden Frameworks (in unserem Falle in erster Linie SARTURIS) verborgen werden, ohne dessen Möglichkeiten drastisch zu beschneiden. Für die Darstellung bedeutet dies zum einen, dass eine minimale Anzahl an Anzeigeelementen gefunden werden muss, welche nötig sind um die Datenbasis eindeutig wiederzugeben. Zum anderen müssen diese Anzeigeelemente so strukturiert werden, dass ihre Beziehungen untereinander klar erkennbar und gut nachvollziehbar sind.

Um das erste Problem zu lösen betrachtet man die gegebene Datenbasis. So bestehen SARTURIS Konfigurationsdateien etwa aus Komponenten, die sich gegenseitig referenzieren (siehe Abb. 2). Die Komponenten an sich besitzen alle den gleichen Aufbau, weshalb sie auch einheitlich dargestellt werden können ohne wichtige Informationen zu verlieren. In einer vereinfachten Form werden dabei nur Name, Typ und Namespace beziehungsweise Modul einer Komponente angezeigt, wobei das Modul zusätzlich in der Hintergrundfarbe des Knotens codiert wird. In einer erweiterten Ansicht werden auch die Attribute der Komponente angezeigt und sind manipulierbar. Diese Darstellungsform ist auch in anderen grafischen Programmier- und Konfigurationswerkzeugen (etwa König et al. 2009 oder Microsoft 2007) weit verbreitet und bildet damit auch für weitere Anwendungsfälle neben SARTURIS eine gute Grundlage. Wir denken, dass diese Herangehensweise ein guter Kompromiss zwischen Kohärenz des User Interfaces und leichter Lesbarkeit von Konfigurationen ist. So werden die Komponenten der drei Module unseres Beispielszenarios grundsätzlich gleich dargestellt und ähnliche Informationen auf gleiche Weise präsentiert, darüber hinaus

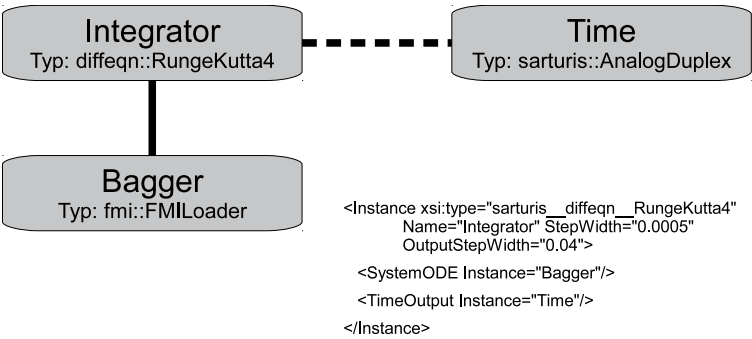


Abbildung 2: Eine Komponente wie sie in SARTURIS definiert wird und wie GENIAC sie darstellt.

sind die Knoten der einzelnen Module aber anhand ihrer zugewiesenen Modulfarbe unterscheidbar.

Die Darstellung von Verbindungen für SARTURIS ist jedoch komplexer. Grundlegend macht das Framework keine Unterscheidung bei Beziehungen zwischen Komponenten; es gibt nur Referenzen von einem zu einem anderen Element. Im Detail lassen sich diese aber weiter separieren. So dienen einige Verbindungen eher der Datenübertragung während andere vorwiegend strukturelle Zusammenhänge verdeutlichen, zum Beispiel Eltern-Kind-Beziehungen. Die Datenverbindungen lassen sich dabei anhand ihrer Schnittstellen einfach filtern und können in ihrer Darstellung angepasst werden. Einige andere Besonderheiten von Referenzen in SARTURIS müssen zusätzlich beachtet werden. So können mehrere Ziele für eine Verbindung definiert werden, weshalb auch in der Visualisierung Ziele gruppiert werden müssen. Des Weiteren verfügen einige Verbindungen in SARTURIS über eigene Attribute und müssen dementsprechend angepasst werden (siehe Abb. 3).

Die eindeutige Strukturierung einer Konfiguration für SARTURIS gestaltet sich schwierig, da wie bereits beschrieben, keine klare Baum- oder Datenflussstruktur vorliegt, auf welcher die Darstellung

aufbauen könnte. Mit der vorgeschlagenen Einteilung der Verbindungen in Struktur- und Datenbeziehungen lässt sich aber eine solche Struktur nachträglich erzeugen. Dazu werden die Komponenten zuerst entlang ihrer Strukturverbindungen in Bäumen angeordnet. Erst danach werden die Datenbeziehungen als Querverbindungen hinzugefügt. GENIAC verfolgt bei der Visualisierung somit einen hybriden Ansatz, wobei Baum- und Datenflussdarstellung nicht getrennt existieren, sondern in einer Anzeige zusammengefasst werden (siehe Abb. 4). Dadurch erspart man dem Nutzer das Umschalten zwischen verschiedenen Sichten und vermeidet die Verteilung der Logik, muss aber zugleich Abstriche bei einigen ursprünglichen Eigenschaften der beiden Darstellungsformen machen.

Das größte Problem, SARTURIS mit Hilfe einer Baumstruktur darzustellen, ist die Tatsache, dass Eltern-Kind-Beziehungen nicht immer eindeutig definiert sind. Ein Kindelement kann mehrere Elternelemente besitzen, so dass eine Entscheidung getroffen werden muss, welchem Elternknoten das Kind zugewiesen werden soll. Dies kann automatisiert geschehen – etwa über den Vergleich der Modulzugehörigkeiten von Kind und Eltern – oder vom Nutzer manuell festgelegt werden. Damit entsteht allerdings ein neues Problem, nämlich das Entstehen neuer Querverbindungen zwischen Kinder und ihren zusätzlichen Elternknoten. Diese Verbindungen müssen sich klar von den ebenfalls quer verlaufenden Datenkanälen abheben. Ein offensichtlicher Nachteil der Integration des Datenflussdiagramms in eine bestehende Baumstruktur ist der potenzielle Verlust der Anordnung der Knoten entlang der Datenflussrichtung. Dem kann teilweise entgegengewirkt werden indem die einzelnen Teilbäume entsprechend Eingabe, Simulation und Ausgabe anordnet werden. Weiterhin ist die Darstellung von Datenverbindungen so zu gestalten, dass ersichtlich ist, welcher Knoten Quelle bzw. Ziel von Datenpaketen ist.

Betrachtet man das Beispielszenario der Baumaschinensimulation, so fallen die Vorteile der beschriebenen Strukturierung schnell auf. Für jedes der drei benötigten Module wird ein eigener Teilbaum angelegt während die Querverbindungen zwischen den Modulen die Kommunikation von Ein- und Ausgabedaten veranschaulichen. Auf

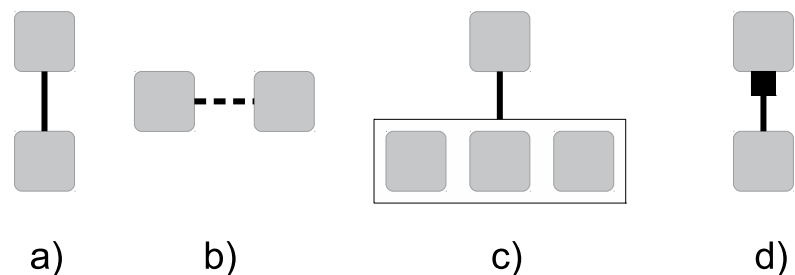


Abbildung 3: Die verschiedenen Verbindungstypen in GENIAC: a) Strukturverbindung, b) Datenverbindung c) Verbindung mit mehreren Zielen, d) Verbindung mit Referenz.

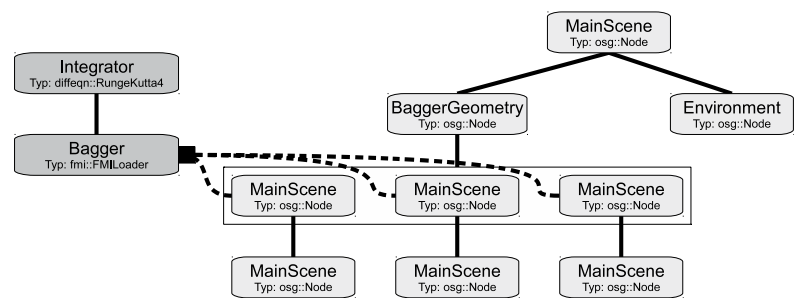


Abbildung 4: Ausschnitt aus der Darstellung einer Konfiguration in GENIAC.

diese Weise ergibt sich eine übersichtliche Arbeitsfläche, welche dem Nutzer die Orientierung stark erleichtert. Sortiert man die Teilbäume in der bereits erläuterten Reihenfolge (Eingabe, Simulation, Ausgabe), so ergibt sich für die Module automatisch die gewünschte Datenflussrichtung von links nach rechts.

Eine weitere Form, wie GENIAC die Darstellung der Knoten vereinfacht, ist die aktive Ausblendung von Knoten, die für das Verständnis der Konfiguration irrelevant sind. So werden SARTURIS-Knoten ausgeblendet, welche einzig der Übermittlung von Daten zwischen anderen Komponenten dienen. Stattdessen werden direkte Verbindungslinien zwischen den betroffenen Komponenten gezogen.

Weiterhin werden einige Knoten automatisch angelegt und sofort ausgeblendet. Sie erfüllen implizite Anforderungen von SARTURIS und können gut im Hintergrund verwaltet werden, sind aber für den Anwender zunächst irrelevant. Damit jederzeit überprüfbar bleibt wie und ob eine Konfiguration funktioniert, können die Vereinfachungen aber jederzeit wieder eingeblendet werden.

Konfiguration einer Simulation in GENIAC

Neben einer leicht nachvollziehbaren Darstellung von Konfigurationen soll es GENIAC seinen Nutzern ebenfalls ermöglichen, Konfigurationen intuitiv zu bearbeiten. Dazu gehören grundlegende Aktionen wie das Hinzufügen, Löschen oder Verändern von Knoten und Verbindungen, aber auch fortgeschrittene Tätigkeiten wie etwa das Gruppieren von mehreren Komponenten oder das Filtern der Anzeige nach einen oder mehreren Kriterien (zum Beispiel Modul, Verbindungstyp oder Informationsfluss). Im Folgenden werden einige dieser Aspekte genauer erläutert, um einen Einblick in die Arbeitsweise mit GENIAC zu geben. Die Verwendung von GENIAC ist wegen der komplexen Datenbasis von SARTURIS speziell für die Arbeit auf großflächigen Displays ausgerichtet. Aufgrund der vorliegenden Aufgaben der Navigation in einer Knotenstruktur sowie deren Manipulation bietet sich dabei die Nutzung von direkter Eingabe mit Hilfe berührungsempfindlicher Bildschirme an. Die dabei auftretenden Aufgaben haben dabei gemeinsam, dass sie überwiegend grafisch bearbeitet werden (z.B. Objekte verbinden, skalieren, etc.) sowie dass der Nutzer eine geringe Präzision bei ihrer Durchführung benötigt. Zusätzlich zur Fingereingabe kann ein solches System um eine Hand-, Objekt- und Stifterkennung erweitert werden. Erstere erlaubt dabei die Unterscheidung zwischen linker und rechter Hand sowie zwischen einzelnen Nutzern. Die beiden letzten bieten Möglichkeiten definierte Aufgaben an konkrete Objekte und Eingabeararten zu binden. Somit soll die Verwendung von GENIAC einfacher und verständlicher gestaltet werden können.

Die grundlegendsten Formen der Manipulation in jedem grafischen Konfigurationswerkzeug sind das Anlegen, Bearbeiten und Löschen von Knoten. Hier sollen kurz die verschiedenen Interaktionen, die

GENIAC für das Anlegen bereitstellt, diskutiert werden. Grundsätzlich kann man dies auf zwei Wegen erreichen. Entweder erstellt man einen leeren Knoten und wählt danach den gewünschten Typ aus oder man zieht sich direkt aus einem Verbindungsanschluss eines anderen Knotens den neuen Knoten heraus (siehe Abb. 5). Will man etwa in unserem Baumaschinenszenario einen neuen Joystick hinzufügen, so kann man dies durch Anlegen eines leeren Knotens bewerkstelligen, bei dem man dann aus einer Liste den Typ «Joystick» wählt. Man kann aber auch den entsprechenden Dateneingang des Simulationsknotens suchen und aus diesem eine Verbindung auf eine freie Stelle der Arbeitsfläche ziehen. GENIAC legt dann automatisch einen neuen Knoten an und versucht dessen Typ anhand der Verbindungsinformationen festzulegen. Es kann allerdings bei manchen Typen der Fall eintreten, dass sich keine eindeutige Zuordnung treffen lässt und der Nutzer auch hier noch über eine Liste auswählen muss. Allerdings kann die Liste so vorgefiltert werden, dass die Auswahl auf einige wenige Typen beschränkt ist. Natürlich lassen sich die beiden Ansätze auch kombinieren indem man zum Beispiel erst einen leeren Knoten zeichnet und diesen dann mit einem anderen verbindet um die Typenauswahl zu vereinfachen. Wichtig ist, dass beide Interaktionen direkt auf der Arbeitsfläche ausgeführt werden können. Bei GENIAC soll vermieden werden die Benutzeroberfläche mit zusätzlichen Fenstern oder anderen von der Konfiguration unabhängigen Elementen zu füllen. Deshalb wurde bewusst auf eine klassische Toolbox, aus welcher neue Knoten herausgezogen werden, verzichtet.

Neben der Arbeit an einzelnen Knoten ist das Ziehen von Verbindungen die zweite grundlegende Aufgabe, die erfüllt werden muss. Wie im Vorfeld erläutert kann dies bereits beim Anlegen neuer Knoten erfolgen. Allerdings wird es immer auch notwendig sein Verbindungen zwischen zwei bereits bestehenden Knoten zu ziehen. GENIAC hilft dabei indem beim Beginn einer Verbindung von einem Knoten aus automatisch alle kompatiblen Knoten markiert werden. Falls es potentielle Partner gibt, die weit entfernt oder sogar außerhalb der Ansicht liegen, werden Stellvertreterobjekte für alle Kandidaten an den Startpunkt der neuen Verbindung herangeholt, damit unmittelbar ein Ziel ausgewählt werden kann

(siehe auch Moscovich et al. 2009). Sollte die direkte Verbindung zweier Knoten nicht eindeutig sein, weil mehrere Anschlüsse in Frage kommen, kann dies in einem weiteren Schritt noch konkretisiert werden, analog zur bereits beschriebenen Typauswahl bei der Knotenerstellung. Will man für einen Knoten sehr viele Verbindungen ziehen, so empfiehlt es sich den Knoten am Rand der Darstellung festzupinnen (vgl. Frisch & Dachzelt 2010). Auf diese Weise kann man in der gesamten Konfiguration navigieren und hat gleichzeitig das relevante Objekt weiterhin im Blick. Im Beispielszenario kann man so den Simulationsknoten festpinnen und dann zuerst mit den Eingabe- und danach mit den Ausgabeknoten verbinden.

Um die Attribute von Knoten zu bearbeiten wird eine Detailansicht genutzt. Zoomt man nah genug an eine Komponente heran, werden sämtliche Einstellungsmöglichkeiten angezeigt. Dies umfasst auch alle verbundenen Knoten sowie alle Anschlüsse die noch frei sind. In dieser Ansicht kann man auch zu den Nachbarknoten springen und sich so entlang der Baumstruktur oder des Datenflusses bewegen.

Insgesamt wird mit diesen Manipulations- und Konfigurationsmethoden ein flüssiges Arbeiten, eine leichte Einarbeitung und eine einfache Erweiterung von komplexen Konfigurationsszenarien unterstützt. In einem weiteren Schritt müssen die vorgeschlagenen Methoden evaluiert und verfeinert werden, damit der Entwickler und Anwender voll auf sein eigentliches Ziel, die Erstellung einer Konfiguration, fokussiert bleiben kann und seine Aufmerksamkeit nicht durch die Art der Darstellung bzw. die Beschränktheit der Manipulationsmöglichkeiten beeinträchtigt wird.

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel gibt einen Überblick über die grafische Konfigurationsumgebung GENIAC. Dabei wurde insbesondere auf die Überlegungen, die im Hintergrund bei der Darstellung von Konfigurationen ablaufen, eingegangen und einige grundlegende Interaktionsmöglichkeiten beschrieben. Allerdings befindet sich GENIAC derzeit in der aktiven Entwicklungsphase. Viele der beschriebenen Ideen und

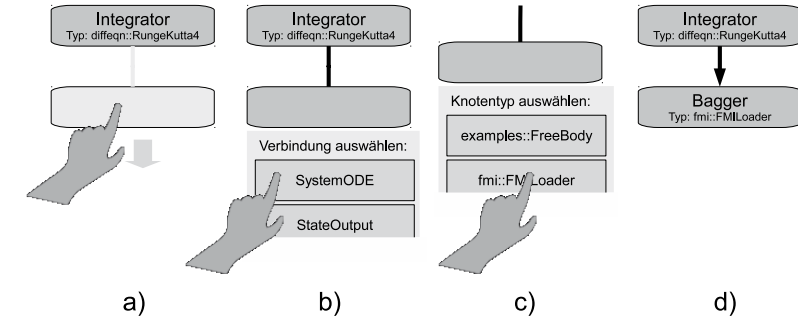


Abbildung 5: Mögliche Schritte beim Anlegen eines neuen Knotens: a) Knoten herausziehen, b) Beziehung zum Elternknoten definieren, c) Typ für neuen Knoten auswählen, d) Anlegen abgeschlossen

Ansätze sind derzeit nur prototypisch implementiert. Daraus ergibt sich, dass in die vorgestellten Ansätze übernommen, umgesetzt und auf eine Verwendbarkeit über das Simulationsframework SATURIS hinaus evaluiert werden müssen. Ebenso wie die reine Verwendbarkeit von GENIAC ist deren Nutzen gegenüber der direkten Konfiguration von XML-Daten zu prüfen. Hierbei steht vor allem die direkte Interaktion des Nutzers durch die Fingereingabe im Mittelpunkt.

Literaturverzeichnis

- DSP Robotics. 2012: FlowStone.
<http://www.dsrobotics.com/flowstone.html>, 12.4.2012
- EON Reality. 2008: EON Studio.
http://www.eonreality.com/brochures/eon_studio_id.pdf, 12.4.2012
- Epic Games. 2012: Kismet Visual Scripting.
<http://udn.epicgames.com/Three/KismetHome.html>, 13.4.2012
- Frisch, M. & Dachzelt, R. 2010: Off-screen visualization techniques for class diagrams. In: Proceedings of the 5th international symposium on Software visualization. New York: ACM

- Huot, S. & Dumas C. & Dragicevic, P. & Fekete, J-D. & Hégron G. 2004: The MaggLite post-WIMP toolkit: draw it, connect it and run it. In: Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology. New York: ACM
- Icido. 2012: The Visual Decision Group. <http://www.icido.de>, 12.4.2012
- König, W. A. & Rädle, R. & Reiterer, H. 2009: Squidy: A Zoomable Design Environment for Natural User Interfaces. In: CHI 2009 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Work-In-Progress Session. New York: ACM.
- Kunze, G. 2010: Sarturis. <http://www.sarturis.de>, 12.4.2012
- Microsoft. 2007: Roboter steuern mit Microsofts Robotics Studio. <http://msdn.microsoft.com/de-de/library/bb483065.aspx#ID0EHLAC>, 12.4.2012
- Microsoft. 2008: Windows Presentation Foundation auf MSDN Online. <http://msdn.microsoft.com/de-de/netframework/aa663326>, 12.4.2012
- Moscovich, T. & Chevalier, F. & Henry, N. & Pietriga, E. & Fekete, J-D. 2009: Topology-aware navigation in large networks. In: Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems (CHI 09). New York: ACM
- vvvv Group. 2011: vvvv – a multipurpose toolkit. <http://vvvv.org>, 12.4.2012

Kontakt

Dipl.-Inf. (FH) Michael Wegner
Dipl.-Inf. (FH) Georg Freitag
Prof. Dr. Markus Wacker

HTW Dresden
Friedrich-List-Platz 1
01069 Dresden
wegner@htw-dresden.de
freitag@htw-dresden.de
wacker@htw-dresden.de
www.drematrix.de

Michael Abramovici & Jens Christian Göbel

Systematisierung und Evaluation von Gestaltungsalternativen für die Harmonisierung firmenspezifischer PLM-Umgebungen

Ausgangssituation

In den beiden vergangenen Jahrzehnten hat die Product Lifecycle Management (PLM)-Durchdringung industrieller Unternehmen stetig zugenommen. Dies betrifft die verschiedenen Engineering-Disziplinen (Mechanik, Elektrik, Software, Hydraulik etc.) und immer stärker auch die der Produktentwicklung nachgelagerten Produktlebenszyklus-Phasen (Produktionsplanung, Service etc.) (Abramovici & Schindler 2010, Rudolph & Dietrich 2003). Als ein Ergebnis der zunehmenden PLM-Durchdringung existieren heute in vielen Unternehmen mehrere PLM-Umgebungen parallel, die in verschiedenen Unternehmensteilbereichen historisch gewachsen sind. Diese PLM-Umgebungen sind meist stark an bereichsspezifischen Anforderungen orientiert, aber nicht oder nur teilweise aufeinander abgestimmt. Zusätzlich zu dieser organischen Entwicklung innerhalb der Unternehmen erhöhen Fusionen und Übernahmen von Unternehmen oder Unternehmensteilbereichen die PLM-Heterogenität sprunghaft. Sichtbar wird die PLM-Heterogenität meist an der hohen Anzahl der eingesetzten PLM-Systeme (Abramovici & Schindler 2010), sie kann jedoch gleichermaßen Strategie-, Prozess- und Methoden-bezogene PLM-Komponenten sowie die PLM-Akteure betreffen (Abramovici & Göbel 2011). Der

ungeplanten Heterogenität industrieller PLM-Landschaften stehen zunehmend global verteilte und sich permanent verändernde Engineering-Organisationsstrukturen gegenüber (Trippner 2002). Vor diesem Hintergrund können nicht aufeinander abgestimmte PLM-Umgebungen drastische Hemmnisse für die Erreichung übergeordneter Unternehmens-Zielsetzungen, wie etwa die Produktivität und Flexibilität bei bereichsübergreifenden Kooperationen oder bei unternehmensinternen Reorganisationsvorhaben, bilden.

Herausforderungen der PLM-Harmonisierung

Mit PLM-Harmonisierungs-Projekten verfolgen Unternehmen das Ziel, durch eine geeignete Abstimmung, Anpassung und Vereinheitlichung ihrer bestehenden PLM-Umgebungen die heutige Situation zu verbessern. Dabei können vielfältige Teilbereiche bestehender PLM-Umgebungen in unterschiedlichen Umfängen adressiert werden. Grundsätzlich können dabei die fünf PLM-Harmonisierungs-Dimensionen PLM-Strategien, -Prozesse, -Methoden, -IT-Systeme und -Akteure unterschieden werden. Je nach Zielfokus des Projektes können verschiedene Bereiche dieser PLM-Dimensionen Gegenstand eines PLM-Harmonisierungs-Projektes sein. Beispielsweise können heterogene Begriffs- oder Nummernsysteme ebenso wie heterogene Freigabeprozesse oder heterogene PLM-Systemstrategien verschiedener Unternehmensteilbereiche im Fokus eines PLM-Harmonisierungsprojektes stehen. Unabhängig von dem projektindividuellen Fokus geht mit PLM-Harmonisierungsprojekten die simultane Erarbeitung und Umsetzung neuer, aufeinander abgestimmter PLM-Konzepte für mehrere bestehende PLM-Umgebungen und somit deren Veränderung einher. Dabei kommen oftmals verschiedene Harmonisierungskonzepte in Betracht, die unterschiedliche Homogenitätsgrade und -ausprägungen für die beteiligten PLM-Umgebungen aufweisen. PLM-Projektteams und -Entscheider obliegt es, aus der Menge theoretisch möglicher Gestaltungsalternativen die projektspezifisch optimale und daher zu verfolgende Gestaltungsalternative zu bestimmen. Die hierzu erforderlichen Entscheidungen können drastische Auswirkungen auf den Gesamtprojekterfolg haben und determinieren unmittelbar das Ausmaß an Änderungen der bestehenden PLM-

Umgebungen. Diese Entscheidungen sind gekennzeichnet durch:

- eine hohe Komplexität, die sich aus dem Umfang und der Verschiedenartigkeit der bestehenden PLM-Umgebungen hinsichtlich ihrer inneren Strukturen und Randbedingungen ergibt,
- divergierende Einzelinteressen und Zielsetzungen formeller und informeller Akteure mit unterschiedlichen persönlichen Erfahrungen und Domänenwissen, die meist zu lokal optimierten und nicht zu unternehmensweit gesamtoptimierten Lösungen tendieren,
- weit reichende und schwer vorhersagbare Konsequenzen für den Projekt- und Unternehmenserfolg (z. B. wird der Blick oftmals zu stark auf eine Betrachtung der IT-Lizenzkosten begrenzt),
- unklare Entscheidungskompetenzen und -strukturen in Unternehmen auf Grund der Seltenheit und der mangelnden Wahrnehmung des Auftretens solcher Entscheidungsprobleme.

Die Vorbereitung und Lösung dieser Entscheidungsprobleme stellt PLM-Anwender, -Planer und -Entscheidungsträger vor schwer überwindbare Herausforderungen. Eine unzureichende Bewältigung dieser Herausforderungen führt zu wenig fundierten, subjektiv oder politisch geprägten Entscheidungen, die primär durch das informelle Machtgefüge und die Durchsetzungsfähigkeit einzelner Akteure determiniert werden. Die Folge sind PLM-Harmonisierungsmaßnahmen, deren Auswirkungen (z. B. Kosten oder Risiken) den Entscheidungsträgern nur teilweise bewusst sind und die von vielen PLM-Akteuren nicht akzeptiert und unterstützt werden.

Anforderungen

Die methodische Vorbereitung und Umsetzung solcher PLM-Harmonisierungs-Entscheidungen stellen Schlüsselerfolgsfaktoren für das Gesamtprojekt dar. Eine methodische Unterstützung dieser Entscheidungen erfordert wiederum ein Framework, das eine Systematisierung gestaltungsrelevanter PLM-Komponenten sowie eine ganzheitliche Evaluation von Harmonisierungs-Gestaltungs-

alternativen für diese PLM-Komponenten erlaubt. Dieses Entscheidungs-Framework zur PLM-Harmonisierung (EFH) muss PLM-Projektteams und -Entscheider bei einer systematischen und zielführenden Entscheidungsfindung unterstützen, indem es die folgenden Anforderungen erfüllt:

- simultane Betrachtung der Gestaltung aller zu harmonisierenden PLM-Umgebungen
- ganzheitliche Betrachtung der einzelnen PLM-Umgebungen, d.h. der Dimensionen PLM-Strategie, PLM-Prozesse, PLM-Methoden, PLM-IT-Systeme (incl. Daten) und PLM-Akteure
- Identifizierung und Abgrenzung entscheidungsrelevanter Komponenten aller betrachteten PLM-Umgebungen
- systematische Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen aktiv zu harmonisierenden und dadurch beeinflussten PLM-Komponenten
- prospektive, ganzheitliche Bewertung monetärer und nicht-monetärer Auswirkungen von Gestaltungsalternativen in allen PLM-Dimensionen
- objektive Ausrichtung der Entscheidungsproblem-Lösung an übergreifenden und domänenspezifischen Zielsetzungen und Randbedingungen des Unternehmens
- Berücksichtigung verschiedener Entscheider-Perspektiven und -Präferenzen
- Generik hinsichtlich der Teilbereiche von PLM-Umgebungen, die projektspezifisch adressierbar sind
- Skalierbarkeit und Anpassbarkeit in Bezug auf unternehmensspezifische Harmonisierungs-Entscheidungsprobleme
- Praxistauglichkeit hinsichtlich der für die Anwendung benötigten Ressourcen (Mitarbeiter-Qualifikationen, -Erfahrungen, Anwendungsaufwand etc.)
- Bestehende Methoden und Modelle zur Unterstützung von PLM-Projekten

Im Zuge der Etablierung des PLM und seiner vorhergehenden Evolutionsstufen — besonders des Produktdaten Managements (PDM) — wurde auch eine Vielzahl an Vorgehensmodellen für die

methodische Unterstützung der Planung und Umsetzung von PLM-Projekten entwickelt. Im Folgenden werden die in Bezug auf diesen Beitrag wichtigsten Arbeiten aufgezeigt und kurz diskutiert.

Die VDI-Richtlinie 2219 adressiert die Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen (VDI 2002). Sie kann als Referenz hinsichtlich des Umfangs der im Rahmen einer klassischen EDM/PDM-System-Neueinführung abzudeckenden Projektphasen gesehen werden. Dabei werden EDM/PDM-Systemauswahl-Entscheidungen methodisch unterstützt. Die VDI-Richtlinie 2219 adressiert keine Entscheidungsprobleme, die im Rahmen der simultanen Gestaltung mehrerer bestehender PLM-Umgebungen auftreten und ist zudem stark IT-System-fokussiert. PDM- und PLM-Systemauswahlentscheidungen werden auch in den Arbeiten von Bitzer (2008), Kahlert (2000) und Krause (2002) adressiert.

Gebhardt befasst sich mit der Frage der unternehmensspezifischen Eignung für eine PDM-System-Einführung und den hierfür erforderlichen Voraussetzungen. Mit Hilfe einer Capability Scorecard wird die PDM-Systemfähigkeit bewertet. Aus dieser Bewertung werden Handlungsbedarfe für eine PDM-Systemeinführung abgeleitet, die ebenfalls durch die entwickelte Methodik unterstützt wird (Gebhardt 2007).

Im Rahmen des Projektes PLM4KMU wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, das eine kontinuierliche PLM-Umsetzung und -Anpassung in kleinen und mittleren Unternehmen unterstützt (Arnold et al. 2005). Es beinhaltet ein Maturity-Modell mit dessen Hilfe der Entwicklungsstand einzelner PLM-Komponenten eines Unternehmens erfasst werden kann. Eine Unterstützung der bedarfsorientierten Harmonisierung mehrerer bestehender PLM-Umgebungen wird jedoch nicht explizit adressiert.

Der VDMA-Leitfaden zur Erstellung eines unternehmensspezifischen PLM-Konzepts fokussiert die PLM-Neueinführung und -Erweiterung unter Berücksichtigung der bestehenden PLM-Komponenten (VDMA 2008). Aus dem erarbeiteten PLM-Konzept wird eine Entscheidungsvorlage abgeleitet, deren Lösungsraum sich

lediglich auf die Umsetzung bzw. nicht Umsetzung des Konzepts beschränkt.

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Transferbereichs 57 wurde ein Leitfaden zur Bewertung und Auswahl Systemunabhängiger PLM-Referenzprozesse entwickelt (Schuh et al. 2008). Die hierfür erarbeitete Reifegrad-basierte Bewertungsmethode fokussiert die Bewertung des Verbesserungspotenzials unternehmensspezifischer Ist-Prozesse durch die entwickelten PLM-Referenzprozesse. Die Bewertungsmethode ist primär auf PLM-Prozesse ausgerichtet.

Ausgehend von der empirischen Untersuchung »Do IT Smart« entwickelte Höfener eine Methode zur Bewertung des strategischen Nutzens von integriertem Produktdaten-Management (Höfener 1999). Ziel dieser Methode ist die Unterstützung der Entscheidung für oder gegen PLM-Investitionen durch die prospektive Bewertung des PLM-System-Nutzens unter Berücksichtigung der Typologie des betreffenden Unternehmens. Die Methode ist stark IT-System-orientiert und berücksichtigt auch schwer quantifizierbare Auswirkungen auf prozessuale und strategische Zielsetzungen. Sie unterstützt jedoch keine Gestaltungsentscheidungen für heterogene PLM-Umgebungen.

Das von Trippner entwickelte Vorgehensmodell zielt auf die Schaffung der Voraussetzungen für eine kontinuierliche Beherrschung des Produktdatenmanagements in komplexen und dynamischen Produktentwicklungsprozessen (Trippner 2002). Der PDM-System-zentrierte Ansatz basiert auf der dauerhaften organisatorischen Strukturierung von Unternehmen in PDM-Fraktale und PDM-Zentralbereiche. Hierbei werden lediglich Eskalationsoptionen erwähnt, methodische Harmonisierungs-Entscheidungen bleiben weitgehend unberücksichtigt.

Schabacker beschreibt eine Methode zur Bewertung des unternehmensspezifischen PLM-Nutzens, die auf einem Modell der Finanz-Portfolio-Theorie basiert. Diese Methode berücksichtigt direkt und indirekt monetär quantifizierbare PLM-Nutzenaspekte (Schabacker

2002). Die Verfügbarkeit von mathematisch beschreibbaren Erfahrungsfunktionen stellt jedoch eine notwendige Bedingung für die Anwendbarkeit der Methode dar. Die beschriebenen Anforderungen werden besonders hinsichtlich der Flexibilität und der Praxistauglichkeit nur partiell erfüllt.

Der Schwerpunkt bestehender Methoden und Modelle zur Unterstützung von PLM-Projekten liegt im Bereich der Einführung und Optimierung singulärer PLM-Umgebungen sowie in der in diesem Zusammenhang oftmals zentralen Entscheidung über das einzusetzende PLM-System. Die von PLM-Harmonisierungs-Projekten ausgehenden Anforderungen an eine ganzheitliche methodische Unterstützung von Harmonisierungs-Gestaltungsentscheidungen werden nicht oder nur in Teilbereichen adressiert.

Entscheidungs-Framework für die PLM-Harmonisierung (EFH)

In diesem Kapitel wird mit dem Entscheidungs-Framework für die PLM-Harmonisierung (EFH) ein methodischer Ansatz zur unternehmensspezifischen Systematisierung und Evaluation von Gestaltungsalternativen vorgestellt. Das EFH stellt ein anwendungsfall-spezifisch ausprägbares Hilfsmittel bereit, das es ermöglicht, den Lösungsraum eines Harmonisierungs-Entscheidungsproblems unter Berücksichtigung projektspezifisch relevanter Randbedingungen und Zielsetzungen schrittweise einzugrenzen. Abbildung 1 zeigt die Gesamtstruktur des EFH, das in vier aufeinander folgende Stufen gegliedert ist und im Folgenden detailliert beschrieben wird.

Stufe 1: Systematisierung firmenspezifischer PLM-Umgebungen

PLM-Ansätze können grundsätzlich Komponenten der fünf Dimensionen PLM-Strategie, PLM-Prozesse, PLM-Methoden, PLM-Systeme und -Daten sowie PLM-Akteure umfassen. Diese PLM-Dimensionen bilden die Grundlage für eine ganzheitliche Erfassung und Strukturierung der betrachteten PLM-Umgebungen (Abb. 2).

Jede PLM-Dimension umfasst konkrete PLM-Komponenten. Entsprechend der Verschiedenartigkeit der PLM-Dimensionen ist auch das Spektrum an möglichen PLM-Komponenten sehr breit. Während

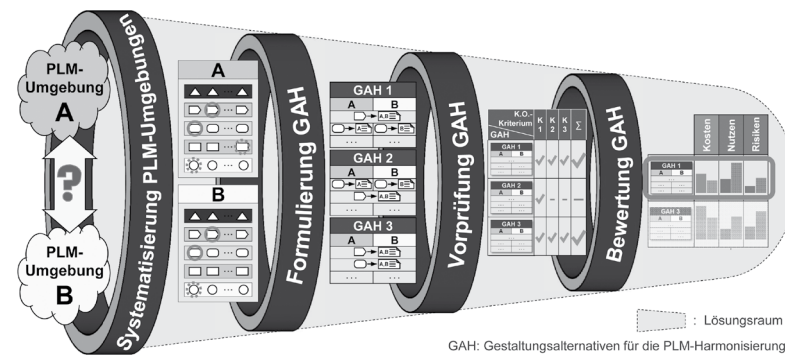


Abbildung 1: Übersicht über das Entscheidungs-Framework zur PLM-Harmonisierung

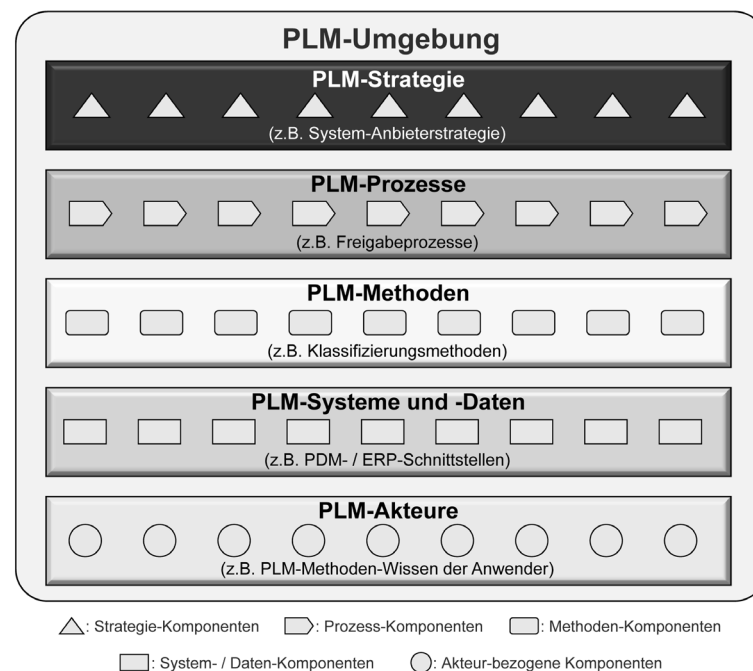


Abbildung 2: Strukturierung von firmenspezifischen PLM-Umgebungen

die PLM-System-Anbieterstrategie beispielsweise eine Komponente der PLM-Strategie darstellt, beinhaltet die Dimension der PLM-Prozesse Lebenszyklusphasen-übergreifende Prozesse (z.B. Freigabe- oder Änderungsprozesse) sowie zahlreiche Einzelprozesse. Zu den PLM-Methoden zählen etwa Organisationsmethoden wie das Stamm- und Strukturdatenmanagement (z.B. Stücklisten-, Nummernsysteme oder Klassifizierungsmethoden); die PLM-System-bezogenen Komponenten umfassen die PLM-Software, -Hardware und -Datenbestände. Beispiele für PLM-Akteur-bezogene Komponenten sind das Wissen und die Akzeptanz der Anwender in Bezug auf eine PLM-Organisationsmethode.

Mit Hilfe projektneutraler Vorlagen (Templates) können der Umfang und die Schwerpunkte der zu betrachtenden Komponenten aller zu harmonisierenden PLM-Umgebungen in einheitlicher Weise beschrieben, abgegrenzt und strukturiert werden. Dabei werden die Komponenten einer PLM-Umgebung im Hinblick auf ein Harmonisierungs-Entscheidungsproblem klassifiziert in PLM-Komponenten,

- die relevante, nicht veränderbare Randbedingungen beschreiben,
- die aktiv durch die Harmonisierungsaktivitäten fokussiert werden,
- die passiv betroffen sind, d.h. aufgrund ihrer Abhängigkeiten zu aktiv fokussierten Komponenten möglicherweise angepasst werden müssen,
- die für die Harmonisierungsentscheidung nicht betrachtungsrelevant sind.

Dies bildet die Grundlage für eine strukturierte, transparente Übersicht der in der Ausgangssituation eingesetzten und für die Harmonisierungs-Entscheidung zu berücksichtigenden PLM-Komponenten in allen betrachteten PLM-Umgebungen. Darüber hinaus können Wechselwirkungen, insbesondere zwischen Komponenten unterschiedlicher PLM-Dimensionen, systematisch erfasst und abgebildet werden.

Stufe 2: Formulierung von Gestaltungsalternativen für die PLM-Harmonisierung

Als Gestaltungsalternativen für die PLM-Harmonisierung (GAH) werden Kombinationen von Ausprägungen der aktiv fokussierten PLM-Komponenten bezeichnet, die jeweils eine Gesamtalternative für das vorliegende Harmonisierungs-Entscheidungsproblem beschreiben. Sofern es angesichts der Wechselwirkungen der PLM-Komponenten zulässig ist, erfolgt eine Dekomposition der Gesamtentcheidung in mehrere voneinander unabhängige Teilentscheidungen. Dabei werden drei Grundstrategien unterschieden, die unterschiedliche Harmonisierungsgrade aufweisen (Abb. 3).

Mit Hilfe dieser Grundstrategien werden zunächst projektübergreifende Zielvorgaben für die aktiv fokussierten PLM-Komponenten beschrieben. Zulässige Harmonisierungs-Grundstrategien können auf drei verschiedenen Aggregationsebenen definiert werden: für gesamte PLM-Dimensionen (und alle hierin eingeschlossenen PLM-Komponenten), für Gruppen von PLM-Komponenten oder für einzelne PLM-Komponenten (Abb. 3). Dies sollte unter Einbeziehung der Vertreter aller involvierten Fachbereiche des Unternehmens erfolgen und erfordert die Zustimmung der PLM-Umgebungs-übergreifend verantwortlichen Entscheidungsträger. In Abhängigkeit von dem Detaillierungsgrad der projektübergreifenden Zielvorgaben und von der Konsensfähigkeit der Akteure hinsichtlich der zulässigen Grundstrategien kann es erforderlich sein, für einzelne PLM-Komponenten mehrere alternativ mögliche Grundstrategien zu berücksichtigen. Ausgehend von einer vollständigen Formulierung aller zulässigen Grundstrategien für jede aktiv fokussierte PLM-Komponente wird für jede beschriebene Kombination von PLM-Komponente und der für diese zulässigen Grundstrategie mindestens eine Gestaltungsalternative modelliert. Die Modellierung der jeweiligen PLMKomponenten sollte durch geeignete Methoden und Werkzeuge unterstützt werden. Die Auswahl und Anwendung dieser Modellierungsmethoden und -werkzeuge (z.B. Prozess- und Datenmodellierungsmethoden) ist PLM-Komponenten-spezifisch. Sie steht nicht im Fokus des EFH, sondern sollte durch das verwendete Projekt-Vorgehensmodell abgedeckt werden (Abramovici & Göbel 2011). GAH

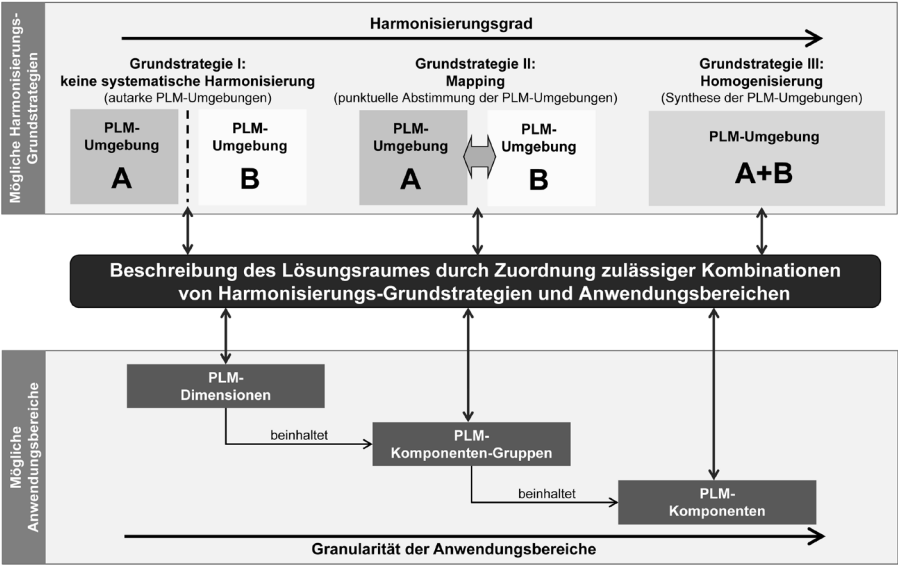


Abbildung 3: Harmonisierungs-Grundstrategien zur Abgrenzung des Lösungsraums

beschreiben jeweils eine Kombination von Ausprägungen aller aktiv fokussierten PLM-Komponenten in formal einheitlicher Struktur.

Stufe 3: Vorprüfung der Gestaltungsalternativen für die PLM-Harmonisierung

Durch diese Vorprüfung werden GAH, die mit grundlegenden Projektzielsetzungen und Restriktionen nicht konform sind, bereits im Vorfeld der detaillierten Bewertung ausgeschlossen (vgl. Abb.1). Die Grundlage hierfür bildet ein Katalog von K.O.-Kriterien, die jede PLM-Dimension betreffen können. K.O.-Kriterien beschreiben grundlegende Anforderungen an die zu verfolgende GAH, deren Erfüllung unbedingt gewährleistet werden muss. Diese Ausschlusskriterien müssen eindeutig definiert und für jede Gestaltungsalternative auf einer nominalen Skala mit den beiden Merkmalen »voraussichtlich erfüllt« oder »nicht erfüllt« bewertbar sein. Für die möglichst

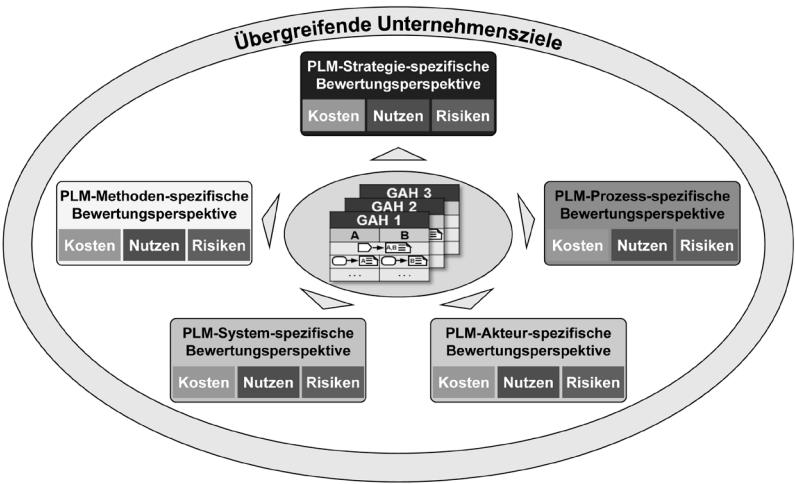


Abbildung 4: Perspektiven und Zielsystem-Bereiche für die GAH-Bewertung

| Bewertungs-Perspektive: PLM-Akteure | | | | | | | | | |
|---|---|--|--------|---|--------|---|---------|---|-----------------------|
| Bewertungs-Perspektive: PLM-Systeme | | | | | | | | | |
| Bewertungs-Perspektive: PLM-Methoden | | | | | | | | | |
| Bewertungs-Perspektive: PLM-Prozesse | | | | | | | | | |
| Bewertungs-Perspektive: PLM-Strategie | | | | | | | | | |
| Generisches Template | | | | | | | | | |
| Kriterium | Key Performance Indicator (KPI) | Bestimmungs-Vorschrift | Kosten | | Nutzen | | Risiken | | Relevanz ja / nein |
| | | | d | n | d | n | d | n | |
| Systemkosten-Flexibilität in Abhängigkeit von der Anzahl der Anwender | Flexibilität der Software-Lizenzmodelle | Anteil variabler Kosten / Anteil fixer Kosten im Betrachtungszeitraum | | x | | | | | |
| | Flexibilität der Hardware-Lizenzmodelle | Anteil variabler Kosten / Anteil fixer Kosten im Betrachtungszeitraum | | x | | | | | |
| Personal-Ressourcen-Flexibilität | ... | ... | | | | | | | |
| | Unternehmensteilbereichsübergreifende Substituierbarkeit der PLM-Anwender | Anteil der hinsichtlich ihres Wissens substituierbaren PLM-Anwender / alle betrachteten PLM-Anwender | | | | x | | | |
| | Verfügbarkeit zusätzlicher externer Ressourcen für Customizing | Experteneinschätzung in Maturity Levels | | | | | x | | |

d: direkt monetär quantifizierbar, n: nicht direkt monetär quantifizierbar

Abbildung 5: Beispielhafter Auszug des Templates der Bewertungs-Perspektive „PLM-Strategie“

umfassende Definition aller als K.O.-Kriterien definierbaren Randbedingungen und Zielvorgaben kommen meist mehrere Quellen in Betracht. K.O.-Kriterien können aus den bereits vorliegenden Projektzielsetzungen und -randbedingungen, aus den übergeordneten oder angrenzenden Unternehmensteilstrategien oder aus weiteren unternehmensspezifischen Quellen abgeleitet werden. Falls eine GAH eines oder mehrere der K.O.-Kriterien nicht erfüllt, wird diese nicht weiter betrachtet. Durch die Vorprüfung wird einerseits die Einhaltung wichtiger Vorgaben und Restriktionen sichergestellt und andererseits der Gesamtaufwand für die Entscheidungsfindung reduziert, ohne dass die Entscheidungsqualität beeinträchtigt wird.

Stufe 4: Bewertung der Gestaltungsalternativen für die PLM-Harmonisierung

Ziel der holistischen Detailbewertungsmethode ist es, eine quantitative, vergleichende Bewertung der zu erwartenden Auswirkungen der verbleibenden GAH zu unterstützen. Die Grundlage hierfür bildet ein multikriterielles Zielsystem, das in Anlehnung an den methodischen Ansatz der Balanced Scorecard nach Kaplan und Norton (Kaplan & Norton 1997) entwickelt wurde. Es ist strukturiert in die projektübergreifenden Zielsystem-Bereiche Kosten, Nutzen und Risiken. Die fünf PLM-Harmonisierungsdimensionen »PLM-Strategie«, »PLM-Prozesse«, »PLM-Methoden«, »PLM-Systeme« und »PLM-Akteure« spiegeln sich in den Bewertungsperspektiven wieder. Die Projektion der Zielsystem-Bereiche auf diese Bewertungsperspektiven erlaubt die ganzheitliche Abbildung des Spektrums möglicher Auswirkungen einer GAH unter Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen zwischen den PLM-Komponenten. Dadurch werden für jede GAH die unmittelbaren und potenziellen Auswirkungen der erforderlichen Veränderungen aktiv fokussierter und passiv betroffener Komponenten in allen betrachteten PLM-Umgebungen im Hinblick auf die übergreifenden Zielsystembereiche simultan berücksichtigt (Abb. 4).

Für jede Bewertungsperspektive wurde ein generisches Set an Bewertungskriterien entwickelt, das anwendungsfallspezifisch konfigurierbar ist. Dabei werden neben monetär quantifizierbaren Kriterien auch nicht direkt monetär quantifizierbare und teilweise subjektiv

geprägte Kriterien berücksichtigt.

Als direkt monetär quantifizierbar werden Kriterien bezeichnet, deren Ausprägungen auf der Basis objektiv dokumentierter Informationen unmittelbar analytisch beschrieben und monetär prognostiziert werden können. In diesem Fall können durch die Abbildung einfacher, mathematisch beschreibbarer Zusammenhänge zu erwartende Auswirkungen einer GAH mit relativ hoher Genauigkeit bewertet werden (z.B. Software-Lizenzmodelle und erforderliche Mengengerüste zur Bestimmung der erwarteten Lizenzkosten).

Nichtdirektmonetär bewertbare Kriterien werden, sofern es möglich ist, auf der Basis von unumstrittenen Annahmen indirekt monetär bewertet (z.B. kann der Nutzen einer schnelleren Teilesuche teilweise über die Prozesszeit und den Kostensatz des suchenden Mitarbeiters bewertet werden). Aufgrund komplexer, multikausaler und langfristiger Auswirkungen sind für viele Kriterien, die gravierende Einflüsse auf den PLM-Erfolg eines Unternehmens haben, sowohl direkt als auch indirekt monetäre Bewertungen nicht oder nur mit extrem hohem Aufwand möglich. Dies gilt besonders für Kriterien der Zielsystem-Bereiche Nutzen und Risiken (Höfener 1999) (z.B. strategische Flexibilität mit der ausgewählten Lösungsanbieter-Konstellation). Die Berücksichtigung solcher nicht monetär quantifizierbarer Kriterien stellt daher einen integralen Bestandteil der holistischen Bewertungsmethode dar. Die Quantifizierung der Ausprägungen dieser Kriterien erfolgt mit Hilfe diskreter Maturity Levels (Ausprägungsniveaus) oder durch kontinuierliche Werte auf Verhältnisskalen. Hierfür werden auch Einschätzungen qualifizierter Experten und Expertenkollektive als Repräsentanten von Kriterien-spezifischen, personengebundenen Wissen und Erfahrungen als Informationsquellengennutzt. Dadurch können wertvolle, nicht formal dokumentierte Informationen zugänglich gemacht und in die Gesamtbewertung eingebracht werden (Gigerenzer 2007). Insgesamt wurden etwa 100 allgemeine Bewertungskriterien entwickelt, die durch Key Performance Indicators (KPI) spezifiziert sind. Diese dienen für die Quantifizierung der Ausprägung der Kriterien und können projektspezifisch angepasst werden (Abb.5). Monetär quantifizierbare Kriterien werden als absolute KPI bezogen auf einen definierten

Betrachtungszeitraum auf Intervallskalen beschrieben.

Für die Bewertungsperspektive »PLM-Strategie« stellen beispielsweise die Flexibilität von Lizenzmodellen und Ressourcen, die Erschließung verschiedener Synergiepotenziale durch Homogenisierung oder die Umsetzungsrisiken wichtige Einzelziele dar. Bei der Bewertungsperspektive »PLM-Prozesse« sind etwa die Prozessgeschwindigkeit, -kosten, -qualität und -komplexität wichtige Einzelziele. Zu den Einzelzielen im Bereich der »PLM-Methoden« zählen die Abdeckung fachbereichsspezifischer Methodenanforderungen, Kosten für die Methodeneinführung und den Betrieb sowie die Homogenisierung der eingesetzten Methoden. Die Anzahl der eingesetzten IT-Systeme und -Schnittstellen, die IT-Betriebskosten, die Homogenität der Datenformate und die Abbildbarkeit der definierten Prozess- und Methoden-Anforderungen mit den bestehenden IT-Systemen sind nur einige Beispiele für Einzelziele der Bewertungsperspektive »PLM-Systeme«. Aus der Bewertungsperspektive »PLM-Akteure« ergeben sich verschiedene Akzeptanz-bezogene Ziele der PLM-Anwender, der IT-Planer und -Administratoren sowie Einzelziele hinsichtlich der konsequenten Berücksichtigung der Anforderungen und Vorgaben des projektübergreifend verantwortlichen Top-Managements.

Das für einen konkreten Anwendungsfall vollständig konfigurierte Zielsystem dient als Input für die inhaltliche Befüllung der Bewertungsvorlagen (Abb. 5). Basierend auf diesen Vorlagen erfolgt die Bewertung der Auswirkungen jeder GAH aus Sicht der Vertreter aller betroffenen Unternehmensteilbereiche unterstützt durch weitere unternehmensinterne und -externe PLM-Experten.

Anwendungsfall

Das entwickelte EFH wurde im Rahmen verschiedener industrieller PLM-Harmonisierungsprojekte angewendet, validiert und erweitert. Der im Folgenden beispielhaft vorgestellte Anwendungsfall behandelt die Harmonisierung der Sprachvarianten eines PLM-Begriffssystems, das in verschiedensprachigen Teilbereichen eines multinationalen Konzerns des Maschinen- und Anlagenbaus eingesetzt wird. Dieser Anwendungsfall war Teil eines

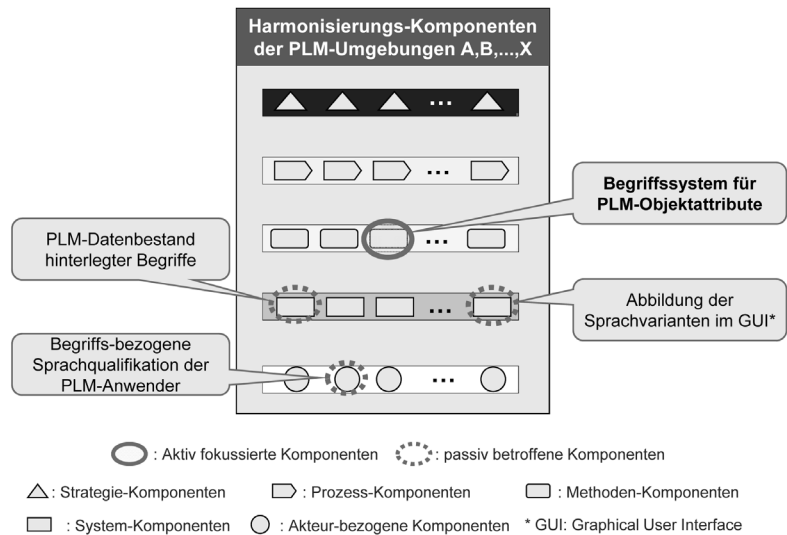


Abbildung 6: Harmonisierungs-Entscheidungs-relevante PLM-Komponenten

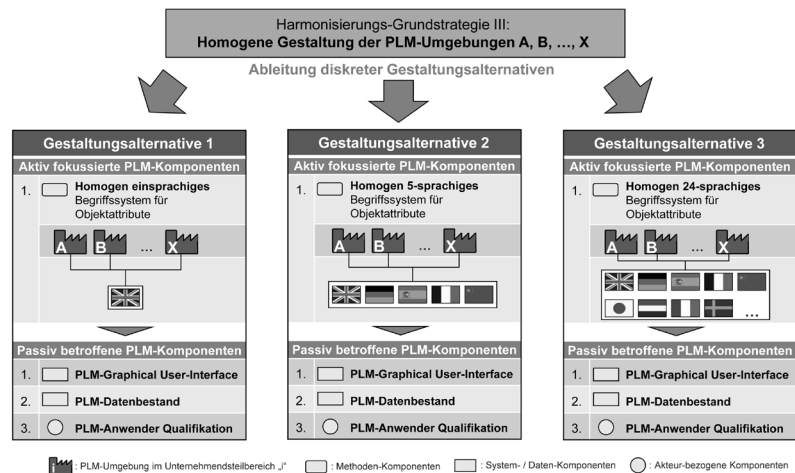


Abbildung 7: Übersicht über die Harmonisierungs-Gestaltungsalternativen des Anwendungsfalls

konzernweiten PLM-Harmonisierungsprojektes, das mehr als 60 Unternehmensteilbereiche betraf und dessen Projektteam mehr als 100 Akteure umfasste. Im Ausgangszustand wurden 24 zu berücksichtigende PLM-Umgebungen unterschieden, die unterschiedliche Sprachen und heterogene Übersetzungsumfänge für Objektattribute, z.B. Teilennamen, beinhalteten. Insgesamt handelte es sich um etwa 400.000 Objekt-Attribute, die berücksichtigt werden mussten. Als Ergebnis der »Strukturierung der PLM-Umgebungen« wurden die in Abbildung 6 dargestellten Harmonisierungs-Entscheidungs-relevanten PLM-Komponenten identifiziert.

Im Rahmen der »Formulierung der Harmonisierungs-Gestaltungsalternativen« bestand ausschließlich für die Harmonisierungs-Grundstrategie III (Homogenisierung) Konformität mit PLM-übergeordneten Strategien. Da lediglich eine PLM-Komponente aktiv fokussiert wurde, entsprechen deren Ausprägungen zugleich den Harmonisierungs-Gestaltungsalternativen (Abb. 7).

Die formulierten Gestaltungsalternativen unterscheiden sich durch unterschiedliche Umfänge der aus Anwendersicht parallel verfügbaren Sprachvarianten für Teilennamen. Für alle drei gemeinsam durch das Projektteam erarbeiteten Gestaltungsalternativen müssen die drei in Abbildung 7 dargestellten, passiv betroffenen PLM-Komponenten berücksichtigt werden.

Durch die »Vorprüfung der Gestaltungsalternativen« konnten keine Gestaltungsalternativen ausgeschlossen werden, sodass im nächsten Schritt eine holistische Bewertung aller formulierten Gestaltungsalternativen erfolgte. Das Ergebnis der holistischen Bewertung kann entsprechend der Zielsystemstruktur (vgl. Abbildung 4) in je einer Harmonisierungs-Scorecard pro Gestaltungsalternative dargestellt und für die übergreifenden Zielsystem-Bereiche Kosten, Nutzen und Risiken aggregiert werden (Abb. 8).

Die Harmonisierungs-Scorecards der Gestaltungsalternativen weisen stark unterschiedliche Charakteristika auf. Bei GAH 1 dominieren sehr hohe Akteur-bezogenen Kosten (insbesondere Sprach-Qualifizierungsaufwand für PLM-Anwender), sowie hohe

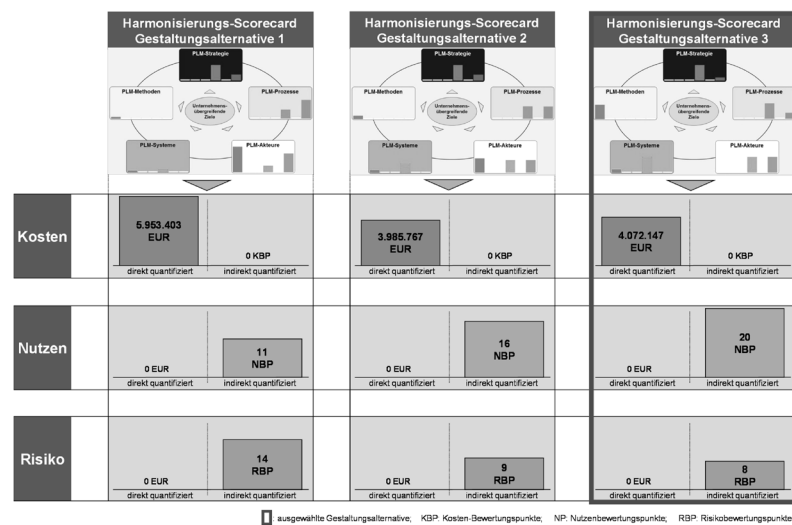


Abbildung 8: Gesamtbewertungsübersicht der Harmonisierungs-Gestaltungsalternativen

Prozess-Risiken (z.B. aufgrund geringer Prozessqualität) und Akteur-bezogene Risiken (z.B. Akzeptanzprobleme aufgrund von Sprachbarrieren). Die Kosten für GAH 2 bestehen ebenfalls vorwiegend aus Akteur-bezogenen Kosten, liegen jedoch insgesamt erheblich niedriger als für GAH 1 und leicht niedriger als für GAH 3. Die Kosten für GAH 3 entstehen im Gegensatz zu denen für GAH 2 hauptsächlich im Bereich der PLM-Methoden zur Abbildung des 24-sprachigen Begriffssystems. Zudem ist GAH 3 gekennzeichnet durch das höchste Nutzen-Niveau (hohe Prozessqualität und -geschwindigkeit, hohe und flexible Verfügbarkeit aller Objekt-Attribute) und das geringste Risiko-Niveau aller GAH. Das Entscheiderkollektiv entschied in diesem Anwendungsfall einstimmig und unterstützt durch unternehmensinterne und -externe PLM-Experten, dass das insgesamt hohe Nutzen- und geringe Risiko-Niveau der GAH 3 die gegenüber GAH 2 höheren Kosten klar überwiegen und daher GAH 3 zu verfolgen ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der meist großen Menge theoretisch möglicher Gestaltungsalternativen, muss im Rahmen von PLM-Harmonisierungsprojekten entschieden werden, welche der möglichen Gestaltungsalternativen umgesetzt werden soll. Projektteam-Mitglieder und -Entscheider müssen hierbei alle relevanten Randbedingungen aller involvierten Unternehmensteilbereiche, sowie übergreifende Unternehmenszielsetzungen berücksichtigen und verfolgen gleichzeitig individuelle, bereichsspezifische Zielsetzungen. Das in diesem Beitrag vorgestellte Harmonisierungs-Entscheidungs-Framework stellt eine methodische Unterstützung für die unternehmensspezifische Strukturierung und Evaluation von Gestaltungsalternativen bereit.

Das EFH wurde im Rahmen mehrerer PLM-Harmonisierungs-Projekte in Unternehmen der Automobilindustrie und des Maschinen- und Anlagenbaus entwickelt und erfolgreich angewendet. Einer dieser Anwendungsfälle wurde in dem vorliegenden Beitrag exemplarisch vorgestellt. Weiterführende Forschungsaktivitäten befassen sich aktuell mit der Integration des EFH in ein Vorgehensmodell, das die Gesamtplanung und -durchführung von PLM-Harmonisierungsprojekten unterstützt.

Literaturverzeichnis

- Abramovici, M. & Schindler, T. 2010: Benefits of PLM in the Automotive Industry: results of a Benchmark Study. In: Proceedings of PLM10, The 7th International Conference on Product Lifecycle Management, CD-ROM, Bremen: BIBA
- Abramovici, M. & Göbel, J. 2011: Methodischer Ansatz zur PLM-Harmonisierung in industriellen Unternehmen. In: ProduktDaten Journal, 2, 50–54
- Arnold, V., Dettmering, H., Engel, T. & Karcher, A. 2005: Product Lifecycle Management beherrschen, Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Bitzer, M. 2008: Entwicklung einer Methode zur Prozessorientierten Planung und Optimierung von Product Lifecycle Management Lösungen. Dissertation. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern
- Gebhardt, B. 2007: Abschätzung der Produktdatenmanagement-Systemfähigkeit produzierender Unternehmen. Dissertation. Aachen: Technische Hochschule Aachen

- Gigerenzer, G. 2007: Bauch-Entscheidungen, Die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition. München: Bertelsmann
- Höfener, C. 1999: Methode zur Bewertung des strategischen Nutzens von integriertem Produktdaten-Management (PDM). Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt
- Kahlert, T. 2000: Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin
- Kaplan, S. & Norton, D. 1997: Balanced Scorecard, Strategien erfolgreich umsetzen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel
- Krause, L. 2002: Methode zur Implementierung von integriertem Produktdatenmanagement (PDM). Dissertation. Bremen: Universität Bremen
- Rudolph, F. & Dietrich, J. 2003: Praktischer Einsatz von CAD- und EDM/PDM-Systemen. In: CAD-CAM Report, 5, 58–61
- Schabacker, M. 2002: Benefit Evaluation of EDM/PDM Systems. In: Proceedings of ICE, 8th International Conference of Concurrent Enterprising, CD-ROM, Nottingham: Univ. of Nottingham
- Schuh, G., Schlick, C., Schmitt, R., Lenders, M., Bender, D., Bohl, A., Gärtner, T., Hatfield, S., Müller, J. & Mütze-Niewöhner, S. 2008: Systemunabhängige Referenzprozesse für das PLM, Aachen: Open Space Seminar
- Trippner, D. 2002: Vorgehensmodell zum Management von Produktdaten in komplexen und dynamischen Produktentwicklungsprozessen. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe
- VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb 2002: VDI 2219: Informationsverarbeitung in der Produkt-entwicklung, Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM-Systemen. Berlin: Beuth
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) 2008: Leitfaden zur Erstellung eines unternehmensspezifischen PLM-Konzepts. Frankfurt: VDMA

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici
 Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Christian Göbel
 Ruhr-Universität Bochum
 Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
 44801 Bochum
<http://www.itm.rub.de>

Christiane Kamusella

Digitale Ergonomie-Tools zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte im Produktentstehungsprozess

Gesetzliche Vorschriften verlangen bei Konstruktion und Inverkehrbringen von Maschinen die Beachtung einer wachsenden Anzahl von Normen und Richtlinien. Zunehmend spielt ebenso die Einhaltung ergonomischer Standards sowohl für den Gesetzgeber als auch für die Kunden eine immer wichtigere Rolle. Die Umsetzung dieser Forderungen gestaltet sich für Konstrukteure durch die Vielzahl von Vorschriften in unterschiedlichsten Quellen schwierig, insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen.

Die ergonomiegerechte Konstruktion von Maschinen wird in Zukunft, unabhängig von der Unternehmens- und Auftragsgröße, ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Wettbewerbsfähigkeit jedes Unternehmens im Maschinenbau sein. Konstrukteure stehen insbesondere vor der Aufgabe, Gesundheitsrisiken für das Bedienpersonal frühzeitig zu erkennen, Belastungssituationen abzuschätzen, ergonomische Problembereiche zu identifizieren und mit geeigneten konzeptuellen Lösungen zu begegnen. Dafür spielen Ergonomiebewertungen innerhalb von Risikoanalysen eine entscheidende Rolle. Ergonomiegerecht konstruierte Maschinen bieten marktrelevante Vorteile für den Hersteller. Neben der Reduzierung von Folgekosten durch Nachrüsten, Service und Support spielt die erhöhte Kundenzufriedenheit eine wichtige Rolle.

Die Verwendung digitaler Ergonomietools in der Konstruktion erlaubt Unternehmen eine einfache, effiziente und umfassende Be-

rücksichtigung ergonomischer Grundsätze und Anforderungen aus harmonisierten Normen und weiteren Quellen im Produktentstehungsprozess. Die Maschinengestaltung kann unter Beachtung der Eigenschaften der künftigen Zielgruppe (demographischer Wandel) erfolgen. So können auch Konstrukteure ohne vertiefte Vorkenntnisse relevante Aspekte erfassen und ergonomiegerechte Maschinen unter Berücksichtigung aller Lebensphasen sowie Nutzungs- und Einsatzbedingungen entwerfen.

In jüngster Zeit wurden an der Professur für Arbeitswissenschaft Ergotyping®-Tools entwickelt. Ergotyping® umfasst die ergonomische Komponente im Digital Prototyping und ist eine geschützte Marke der TU Dresden. Momentan sind die Tools »Körperkräfte«, »Sichtbewertung« sowie »Körperhaltungsbewertung« entstanden. Die Tools sind mit einem digitalen anthropometrisch-kinematischen Menschmodell (CharAT Ergonomics) verknüpft. Die rechentechnische Umsetzung und Einbindung in das digitale Menschmodell erfolgte im Rahmen eines Kooperationsvertrages zusammen mit der Firma Virtual Human Engineering GmbH Stuttgart. In die Tools floss ergonomisches Wissen aus unterschiedlichen Regelwerken und weiteren gesicherten Quellen nach einem entwickelten Stufenmodell ein (s. Abbildung 1).

Das Menschmodell selbst enthält anthropometrische Datensätze zu körperbaulichen Eigenschaften aus verschiedenen Datenbanken. So sind z. B. normative nationale, europäische, internationale und berufsgruppenspezifische Datensätze integriert. Damit lassen sich verschiedenste Testkollektive besonders unter Beachtung demographischer Entwicklungen der künftigen Nutzergruppe zusammensetzen (siehe Abbildung 2) und differenzierte Untersuchungen durchführen.

Ergotyping®-Tool „Sichtbewertung“

An der Mensch-Maschine-Schnittstelle gelten für die geometrischen Sichtbedingungen und für Elemente der Informationsaufnahme eine Reihe ergonomischer Einzelanforderungen. Das betrifft z. B. die menschliche Bewegungsmotorik bei Ausrichtung auf ein Sehob-

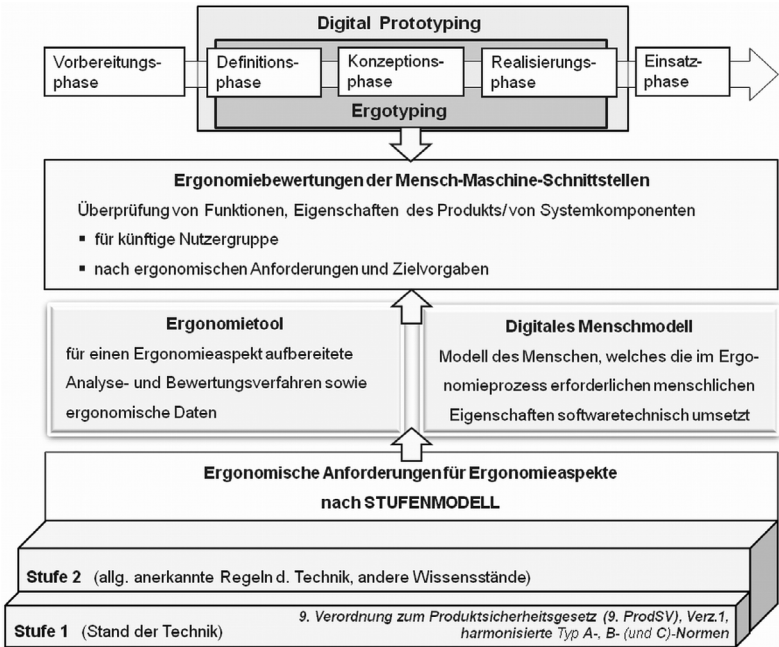


Abbildung 1: Ergotyping-Struktur und -zuordnung im Produktentstehungsprozess

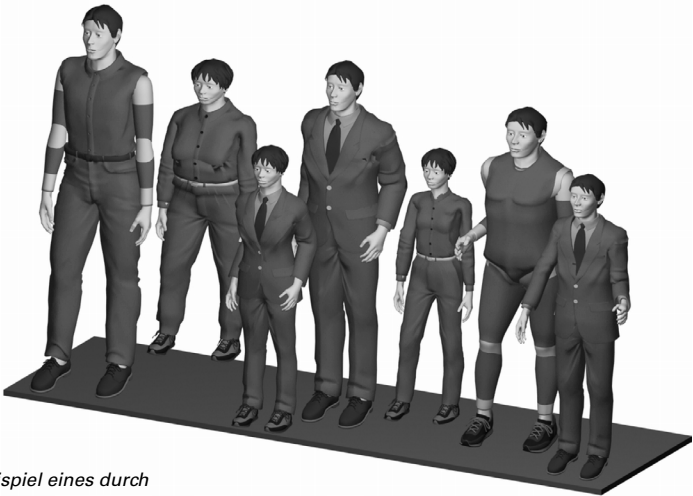


Abbildung 2: Beispiel eines durch digitale Menschmodelle repräsentierten Nutzerkollektivs

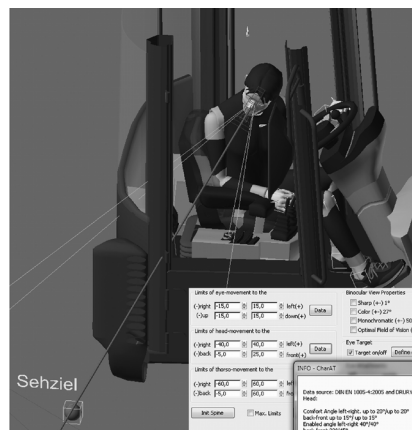


Abbildung 3 (links): Serielle Auge-Kopf-Körper-Motorik bei Ausrichtung auf ein Sehobjekt



Abbildung 4 (Mitte): Fixierung des Sehstrahls am Sehziel während einer Bewegung des Menschmodells

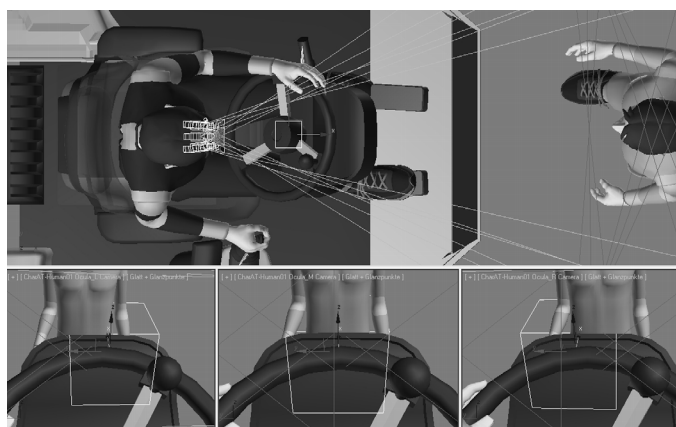


Abbildung 5: Augenkamerasicht durch fusionale Vergenzen - unten links: linkes Auge, rechts: rechtes Auge, Mitte: Binokularsicht

jekt sowie Sichtparameter in Verbindung mit optischen Anzeigeeinrichtungen, die u. a. in Maschinen, Anlagen, Mess- und Bildschirmgeräten, Instrumententafeln, Steuer- und Überwachungskonsolen eingesetzt werden.

Das entwickelte Ergotyping®-Tool berücksichtigt nutzer- und produktorientierte Parameter und hinterlegt sie jeweils mit ergonomischen Merkmalen nach Stufe 1 und 2 des Stufenmodells.

Das Menschmodell besitzt Steuerelemente, die mit dem Sehstrahl verbunden sind und eine serielle Auge-Kopf-Körper-Motorik ermöglichen. Bei Ausrichtung des Blicks auf ein Sehobjekt setzt das Menschmodell zuerst innerhalb von Bewegungslimits die Augen, gefolgt von Kopf und Rumpf ein. Komfort- und zulässige Bewegungswinkel für diese sequentielle Abfolge beteiligter Körperglieder können vom Nutzer je nach Problemstellung interaktiv voreingestellt werden. Der Nutzer erhält dazu Datenempfehlungen aus Fachliteratur und Normen.

Damit wird die Bearbeitung unterschiedlicher Aufgabenstellungen unterstützt. So können an die Steuerelemente Displays oder andere Sehobjekte angehängt und innerhalb physiologischer Bewegungsgrenzen platziert werden. Umgekehrt ist eine Prüfung möglich, ob ein vorhandenes Sehobjekt fixiert werden kann, ob Sichtkollisionen bestehen oder unkomfortable Bewegungen daraus resultieren. Ebenso bleibt eine Augenkamera im Mittenaugen des Menschmodells (binokulare Sicht) bei Bewegungen auf das Sehobjekt ausgerichtet und fixiert (s. Abbildung 4).

Ebenso können mit dem Ergotyping®-Tool fusionale und akkommodative Vergenzen abgebildet werden. Die sonst parallelen Augenachsen der Monokularkameras drehen sich bei Unterschreitung des Fernpunktes eines fixierten Sehobjektes gegensinnig ein. Die Sicht aus linkem, rechtem bzw. Mittenaugen ergibt jeweils einen anderen Bildausschnitt (s. Abbildung 5) und spielt z. B. in normativen Anforderungen von Baumaschinen eine Rolle.

Das Scharfstellen des Bildes auf der Netzhaut bei veränderter Objektweite (Akkommodation) wird ergonomisch kontrolliert und bewertet. Der Nutzer erhält eine Unterstützung bei entfernungsabhängiger Platzierung von Displays zum Mittenauge. Bewertet wird die maximale und Gebrauchsakkommodation. Die minimale Gegenstandsweite oder Sehweite hängt von der altersabhängigen maximal möglichen Brechkraftänderung, der Akkommodationsbreite ab. Der altersabhängige Akkommodationsnahpunkt, bei dem der Mensch temporär und gerade noch scharf sieht, wird im Sicht-Tool für drei Altersgruppen bewertet (s. Abbildung 6). Das geschieht:

- für junge Nutzer der Altersgruppe 18 bis 25 Jahre (kürzeste Sehdistanzen),
- für 40- bis 50-Jährige, die eine schleichende und zunehmende Presbyopie ohne Nahkorrektur über Brille aufweisen und deren Nahpunkt sich vergrößert und
- für Ältere (>50 Jahre) mit ausgeprägter Alterssichtigkeit, die über eine Nahsichtbrille i. allg. durchschnittlich auf Nahpunkte 40-Jähriger korrigiert werden. Auf diese Weise wird die Gruppe der ca. 40-Jährigen in der Bewertung ebenfalls mit erfasst.

Während einer dynamischen Positionsveränderung des Sehobjekts zum Auge des Menschmodells wird der Nahpunkt laufend kontrolliert und dem Nutzer eine synchrone Rückmeldung zur zulässigen Sehweite gegeben. Bei Unterschreitung des Nahpunktes wird das Netzhautbild wegen mangelnder Akkommodationsfähigkeit unscharf. Diese verminderte Sehschärfe wird im Tool zusätzlich berechnet und permanent angezeigt. Die Gebrauchsakkommodation beträgt etwa zwei Drittel der maximalen Akkommodationsbreite und vergrößert den zulässigen Sehabstand. Unterschreitet ein Sehobjekt die Sehdistanz für diese Gebrauchsakkommodation, bei der ermüdungsfrei, bequem und über längere Zeit scharf gesehen wird, erhält der Nutzer ebenfalls in Echtzeit eine Rückmeldung in einem Monitor-Dialog.

Zusätzlich können die Sehfelder Blickfeld (Fixation von Sehobjekten mit den Augen) und Gesichtsfeld für Hell-Dunkel- und Farbwahrnehmung in einer Szene eingeblendet werden. Da die

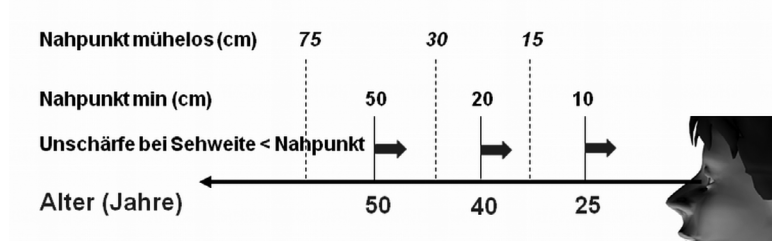


Abbildung 6: Altersabhängige maximale Akkommodation, Gebrauchsakkommodation und Sehschärfe

Farbwahrnehmung für verschiedene Farben Unterschiede aufweist (blau>rot>grün), wird ein mittlerer Bereich zugrunde gelegt, in dem eine farbgetreue Wahrnehmung möglich ist. Bei eingeschalteter Augenkamera zeigt diese eine perspektivische Sicht aus dem Auge des Menschmodells auf einen Umgebungsausschnitt entsprechend Kameralinse, wobei Sehfelder als Bereiche markiert sind (s. Abbildung 4). Der Anwender kann über die Gesamtheit dieser Funktionalitäten Sehobjekte im richtigen Abstand zum altersabhängigen Nutzerauge platzieren.

Anzeigeflächen sollten zum Auge idealerweise im rechten Winkel zur Sehachse ausgerichtet sein, d. h. der Sehstrahl sollte dem Verlauf der Flächennormalen folgen. Abweichungen können zu Parallaxenfehlern und Verzerrungen abgebildeter Zeichen führen. Normative ergonomische Anforderungen beschreiben in Abhängigkeit visueller Ansprüche der Sehaufgabe bestimmte zulässige Grenzabweichungen für Sehflächenorientierungen. Diese sind im Ergotyping®-Tool berücksichtigt und umgesetzt.

Der Nutzer erhält insgesamt während der interaktiven Platzierung und Ausrichtung der Sehfläche ergonomische Empfehlungen über eine synchrone permanente Bewertung seines Gestaltungsentwurfs (s. Abbildung 7).

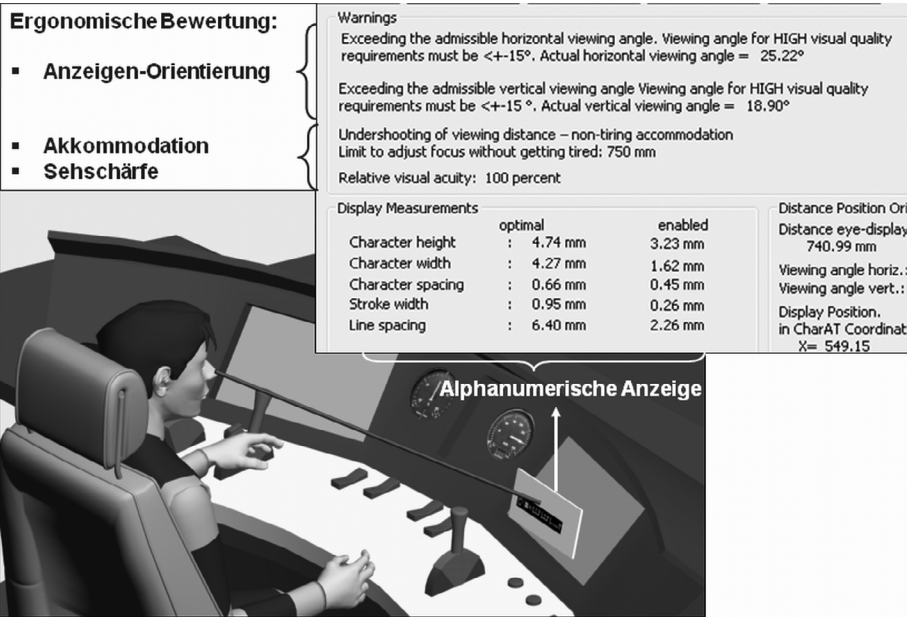


Abbildung 7: Bewertung von maximaler Akkommodation, Gebrauchsakkommodation und Sehschärfe

Das Ergotyping®-Tool lässt weiterhin eine Berechnung und Darstellung optischer Anzeigeeinrichtungen auf einer Displayfläche zu. Zugrunde gelegt sind ergonomische Anforderungen aus Datenquellen vorwiegend der Stufe 1 nach Stufenmodell (harmonisierte Normen). Nach Art der Sehzeichen werden dabei digitale und analoge Anzeigen unterschieden, wobei digitale Anzeigen in Form von Bild- und alphanumerischen Zeichen sowie analoge Skalen mit Einer-, Fünfer- und Zehnerteilung typisch sind. Bildzeichen werden durch eine quadratische Form verkörpert, da das Auge in vertikaler und horizontaler Richtung ein gleiches Auflösungsvermögen besitzt. Als alphanumerisches Element wird der Buchstabe »L« verwendet, da das Breiten-Höhen-Verhältnis entscheidend für die Identifikation des Zeichens und zur Vermeidung von Fehlinterpretationen ist. Die Zeichengröße hängt vom Sehwinkel und der Sehentfernung des Zeichens vom Auge ab. Diese Zeichen werden in Abhängigkeit vom Sehabstand des Menschmodellauges mit optimalen und zulässigen Parametern quantifiziert hinterlegt und visuell erzeugt (s. Abbildung 8). Alle berechneten Größen sind in einem Monitor-Dialog abrufbar.

In einem Report werden alle Daten des Ergotyping®-Tools und ihre Quellen ausgewiesen.

Ergotyping®-Tool „Körperkräfte“

Kraftbetonte Tätigkeiten sind durch unterschiedliche Körperhaltungen, -bewegungen, Gliedmaßenstellungen und Kraftrichtungen charakterisiert. Eine potentielle Nutzergruppe, die Aktionskräfte an der Mensch-Maschine-Schnittstelle aufbringen soll, besitzt alters- und geschlechtsabhängig ein unterschiedliches Kraftvermögen. Kraftausübungsfälle sind während der Planung entsprechend frühzeitig über ergonomische Bewertungskenngrößen zu dimensionieren.

Das entwickelte Tool ist zur Planung und Beurteilung von Körperkräften an digitalen Prototypen geeignet. Es dient der qualitativen Abschätzung sowie quantitativen Bestimmung isometrischer Aktionskräfte des Arm-Schulter- und Ganzkörpersystems. Die Datenaufbereitung orientierte sich auch hier wieder am Stufenmodell.

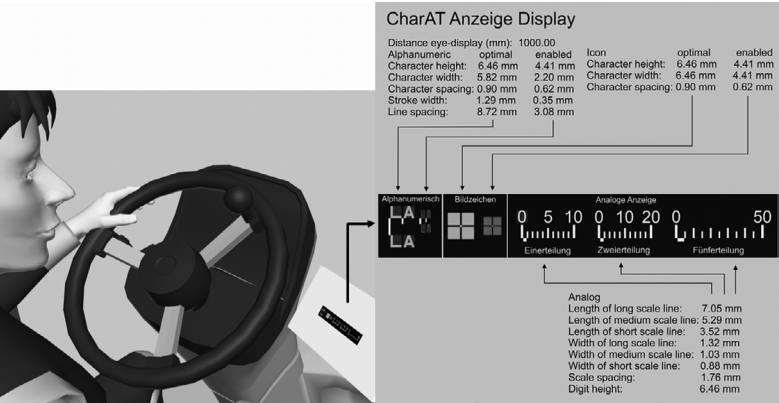


Abbildung 8: Dimensionierung von Sehzeichen für optische Anzeigeeinrichtungen

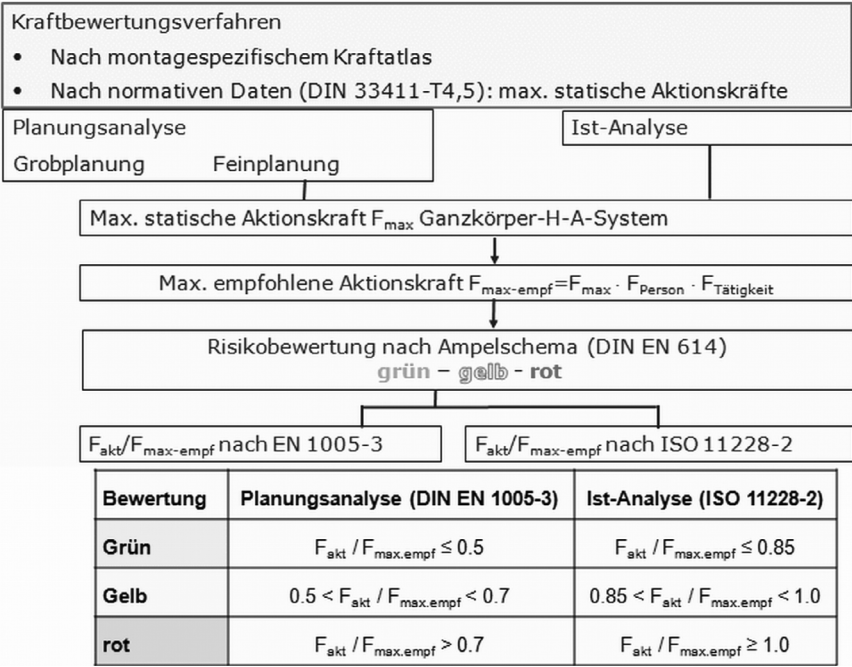
Insgesamt zeigte eine Recherche, dass verfügbare Daten besonders aus harmonisierten Normen begrenzt sind bzw. ungenügende Hintergrundinformationen für eine umfassende Umsetzung bieten. Daher wurden einerseits existierende nationale Kraftnormwerte und andererseits Erkenntnisse gemäß dem Stand der Wissenschaft verwendet.

Folgende Kraftbewertungsverfahren wurden für das Tool aufbereitet:

1. Montagespezifischer Kraftatlas, welcher dem Stand der Wissenschaft entspricht
2. Der Montagespezifische Kraftatlas weist neueste Kraftwerte auf, die den Erfordernissen der Industrie gerecht werden.
3. Kraftbewertung unter Nutzung nationaler Kraftnormdaten der DIN 33411-4:1987-05, DIN 33411-05:1999-11, die allgemein anerkannte Regeln der Technik entsprechen sowie unter Verwendung von Reduktionsfaktoren nach Grenzkraftverfahren von Buhrandt und Schultetus (Bullinger 1994), was dem Stand industrieller Anwendung zugeordnet werden kann.

Im Ergotyping®-Tool wird nach Planungsanalyse mit den Stufen Grob- und Feinplanung und nach Ist-Zustandsanalysen unterschieden (s. Abbildung 9).

Der Verfahrensablauf ist für die beiden umgesetzten Kraftbewertungsverfahren nahezu identisch. Ein zu planender oder gegebener Kraftangriffspunkt an einem Prototypen stellt den Referenzpunkt für eine anthropometrisch determinierte Nutzergruppe dar und führt für diese zu ungleichen Ausführungsbedingungen. Diese Beschränkungen bestimmen die Maximalkraft, die durch eine repräsentative Gruppe von Arbeitspersonen kurzzeitig bei maximaler Kraftanspannung aufgebracht werden kann. Um empfohlene Kraftgrenzen für eine vorgesehene Benutzerpopulation und eine aktuelle Tätigkeit ableiten zu können, ist eine Reduktion dieser Maximalkraftwerte erforderlich. Daher werden im Tool auf Grundlage maximal statischer Aktionskräfte F_{max} , die entweder aus Normdaten oder aus



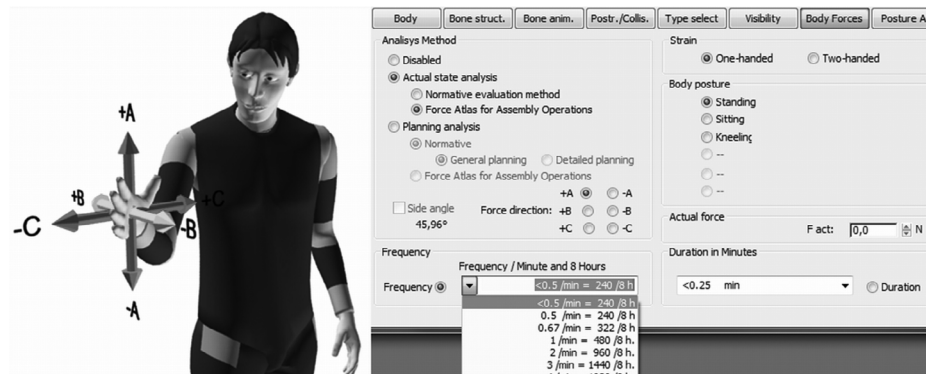


Abbildung 10: Control-Dialog zur Auswahl des Kraftbewertungsverfahrens

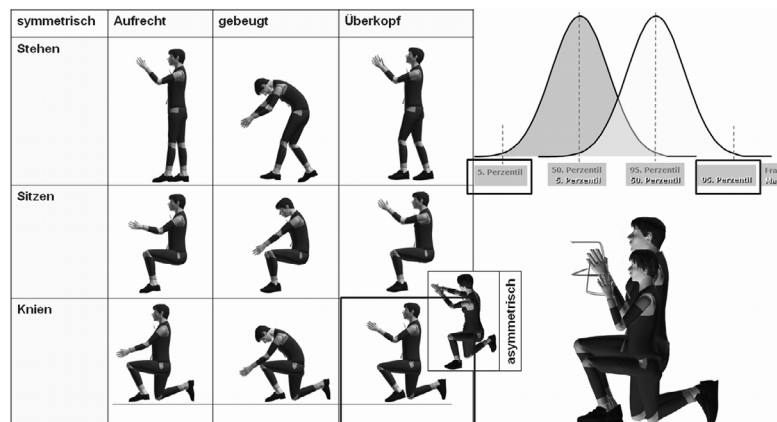


Abbildung 11: Perzentil-, geschlechts- und haltungsabhängiger Wertebereich der Kraftangriffspunkte

Ist-Zustandsanalyse und darin jeweils das Kraftbewertungsverfahren wählen (s. Abbildung 10).

Das Verfahren des Montagespezifischen Kraftatlas wendet sich an Konstrukteure, Fertigungsplaner und Ergonomen. Die im Atlas enthaltenen maximalen statischen Aktionskräfte wurden für real-typische Haltungen in der Industrie und im Labor ermittelt und in (Wakula et. al. 2009) veröffentlicht.

Zur Anwendung dieses Verfahrens im Ergotyping®-Tool sind folgende Kraftfälle und Einflussfaktoren auf die Kraftausübung berücksichtigt und umgesetzt worden:

- Geschlecht, Alter, Nationalität deutsch, Körpermaßperzentil 5, 50, 95;
- Diese Parameter werden durch Konfiguration des Menschmodells als entsprechende Referenzperson mit anthropometrischen Eigenschaften repräsentiert und automatisch erkannt.
- Körperhaltung: symmetrisch, asymmetrisch, Sitzen, Stehen, Knien jeweils aufrecht, gebeugt, über Kopf;
- Ein räumlicher Kraftangriffspunkt, repräsentiert durch die Handmitte des Menschmodells, muss programmtechnisch automatisch einer der 18 Körperhaltungsvariationen zugeordnet werden können und darüber ist unter Beachtung weiterer Einflüsse der richtige Datenbankeintrag zu finden. Zur Datenaufbereitung für eine entsprechend konzipierte Datenbank wurden daher Kraftangriffspunkte perzentilierten Bewegungsräumen zugeordnet (Beispiel für Knien Überkopf s. Abbildung 11).
- Ein-, Beidhändigkeit;
- Kraftrichtung;
- Häufigkeit, Dauer der Kraftausübung;
- Kraftperzentil: P15 für Planung und P50 für Ist-Analysen.
- Das Kraftperzentil beschreibt das Kraftvermögen einer gemessenen Referenzgruppe, d. h. bei der Kraftgrenze P15 (die »Schwachen«) wird mit den genutzten Kraftwerten nur bei 15% der Nutzergruppe die körperliche Fähigkeit überschritten.

Das Menschmodell ist in eine die Mensch-Maschine-Umgebung repräsentierende Umgebung eingebunden. Über Körper- und Extremitätenanimation wird eine der Kraftausübung und Arbeits- und Produktgeometrie angepasste Körperhaltung eingestellt. Die Hand des Menschmodells wird an den Kraftangriffspunkt herangeführt. Der Nutzer trifft zuvor eine Vorauswahl der Grundhaltung Stehen, Sit-

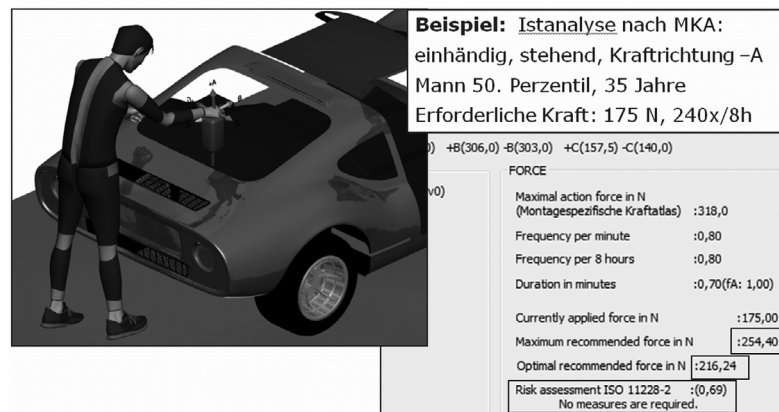


Abbildung 12: Beispiel einer Ist-Analyse nach Montagespezifischem Kraftatlas

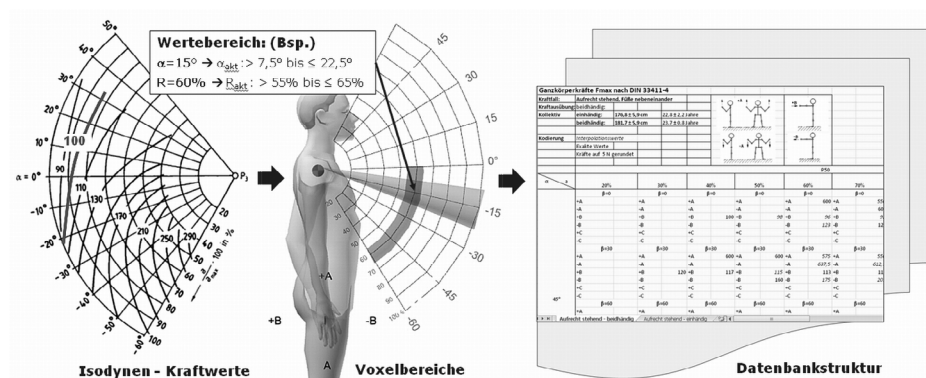


Abbildung 13: Datenaufbereitung von Kraftwerten aus Isodynern und Überführung in Datenbanken

zen, Knien, legt Häufigkeit, Kraftrichtung und den Kraftausübungsfall (ein-, beidhändig) fest. Alle weiteren Einflussparameter werden programmintern automatisch erkannt und dafür ein passender Datenbankeintrag ausgelesen. Im Monitor-Dialog werden alle Bewertungsgrößen angezeigt (s. Abbildung 12). Mit dynamischer Veränderung des Kraftangriffspunktes, ausgelöst durch Handbewegung des Menschmodells, werden alle Aktionskräfte und das Ergebnis des Gesundheitsrisikos in Echtzeit aktualisiert ausgegeben.

Für eine Kraftbewertung unter Nutzung normativer Daten sind im Tool maximale statische Aktionskräfte der DIN 33411-Teil 4:1987-05 und Teil 5:1999-11 hinterlegt, die für verschiedene Körperhaltungen und Bezugssysteme (Polar-, kartesische Koordinaten) definiert sind und für die deutsche Wohnbevölkerung gelten. In den Normenteilen liegen Daten von insgesamt 43 Kraftausübungsfällen vor, von denen 23 in Polarkoordinaten existierende umgesetzt wurden. Um zur Datenaufbereitung beliebige Handpositionen des Menschmodells in Polarkoordinaten zu beschreiben, mussten Kraftangriffspunkte eindeutigen Wertebereichen für Höhen-, Seitenwinkel und Armreichweiten zugewiesen und entsprechende Datenbankstrukturen entwickelt werden (s. Abbildung 13). Da das Koordinatensystem dafür im Schulterdrehpunkt liegt, ist die durch das Menschmodell repräsentierte Nutzergruppe beliebig anthropometrisch konfigurierbar. In entwickelten mehrdimensionalen Datenbanken sind alle Kraftwerte und Einflussgrößen hinterlegt.

Bei Planungsanalyse werden dem Nutzer in erster Stufe für eine Grobabschätzung Krafttendenzen in perzentil- und geschlechtsdifferenzierten Greifräumen in Abhängigkeit von Körperhaltung und Kraftausübungsfall angeboten. Der Nutzer wählt den Seitenwinkel in einem eingeblendeten Koordinatensystem aus. In diesem werden Richtungsachsen ausgegraut, für die keine Kraftdaten vorliegen. Gleichzeitig wird ein Kraftrichtungssymbol mit allen Kraftkomponenten in Handmitte des Menschmodells eingeblendet und eine ggf. auftretende Auswahlbeschränkung angezeigt. Im gewählten Seitenwinkel, durch Handbewegung des Menschmodells ausgelöst, werden Kraftebenen eingeblendet, die farbgestufte Kraftpunkte enthalten. Die 7-stufige Farbskala reicht von grün (hohe Krafttendenz) bis

rot (geringe Kraft). Der Nutzer erhält darüber allgemein eine orientierende Information, an welchen Kraftangriffspunkten höhere bzw. niedrigere Körperkräfte zu erwarten sind. Die Datenbankquelle wird dokumentiert. Die Farbstufung erfolgte einheitlich anhand der Minimal- und Maximalwerte aller Kräfte an festgelegten Knotenpunkten eines Gitternetzes. Zur Aufbereitung der Daten wurden Kräfte aus Isodynern der Normen ausgelesen und den Netzpunkten zugeordnet (s. Abbildung 14).

Entscheidet sich der Nutzer für einen konkreten Kraftangriffspunkt (Feinplanung), werden ihm konkrete maximale und empfohlene Aktionskräfte unter Beachtung personen- und tätigkeitsbedingter Faktoren berechnet und im Monitor-Dialog angezeigt. Die Risikobewertung erfolgt nach den oben beschriebenen Risikobereichen gemäß Ampelverfahren.

Bei Ist-Analyse werden dynamische Lageveränderungen der Handmitte des Menschmodells fortlaufend für alle Kraftrichtungen ausgewertet. Durch entsprechende Indexierung erkennt das Programm Treffer in der Datenbank, berechnet daraus zulässige Aktionskräfte und Risikostufen für Gesundheitsgefährdungen der Nutzergruppe und dokumentiert diese.

Ergotyping®-Tool „Körperhaltungsbewertung“

Physische Belastungen in Form erzwungener Körperhaltungen und –bewegungen sollten frühzeitig prospektiv an digitalen Prototypen von Maschinen und Arbeitsplätzen abgeschätzt werden können. Identifizierten Problembereichen kann so durch entsprechende ergonomische Auslegung begegnet werden.

Das Ergotyping®-Tool dient ganz allgemein einer Risikoermittlung arbeitsbezogener Muskel-Skelett-Erkrankungen. Mit dem entwickelten Tool ist eine Einschätzung beliebig animierter Körperhaltungen und –bewegungen des Menschmodells an digitalen Prototypen nach den Screening-Verfahren RULA (Rapid Upper Limb Assessment) und OWAS (Ovako Working Posture Analysing System) möglich.

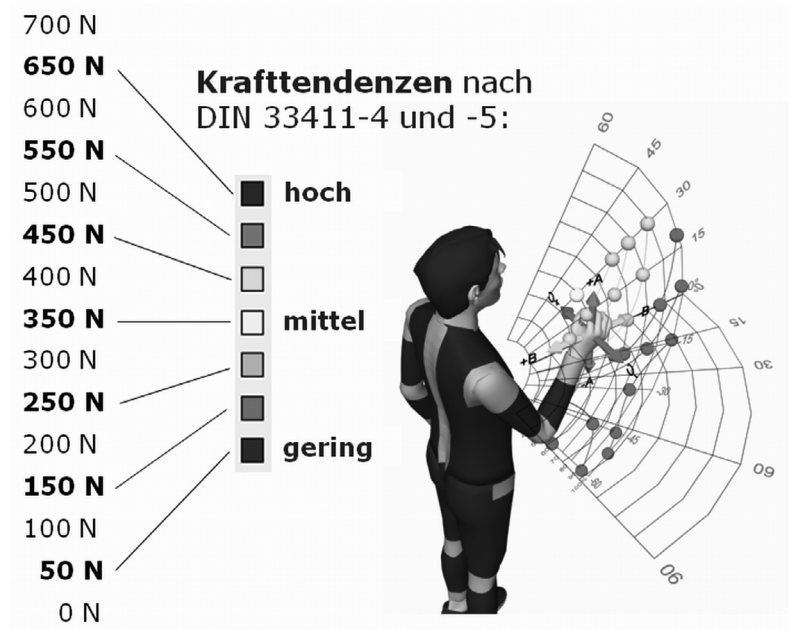


Abbildung 14: Farbstufung der Krafttendenzen innerhalb der Grobplanung

Das RULA-Verfahren als schnelles Bewertungsverfahren beurteilt vorausgewählte einzelne Haltungen ohne Einbeziehung von deren Dauer und Häufigkeit und schätzt das Änderungserfordernis ein. Betrachtet werden Körperhaltungen von Ober-, Unterarm, Handgelenkstellung, Kopf, Rumpf, unteren Extremitäten, ergänzt um Aspekte von Muskelarbeit. Die originale Papier- und Bleistift-Methode umfasst Arbeitsbögen mit Piktogrammen, anhand derer über Beobachtungen für jedes einzelne Körperteil Haltungswerte eingeschätzt und Bewertungsmatrizen zuzuordnen sind. Die sehr aufwändige händische Einschätzung erfolgt für rechte und linke Körperseite getrennt. Eine Gesamtpunktzahl wird einem Risikowert zwischen grün: akzeptabel bis rot: sofortiger Handlungsbedarf zugeordnet.

Für eine systematische Beschreibung von Körperhaltungen wurde der Körper des Menschmodells zunächst segmentiert betrachtet. Die Lage eines Segments im Raum gemäß seiner Gelenkfreiheits-

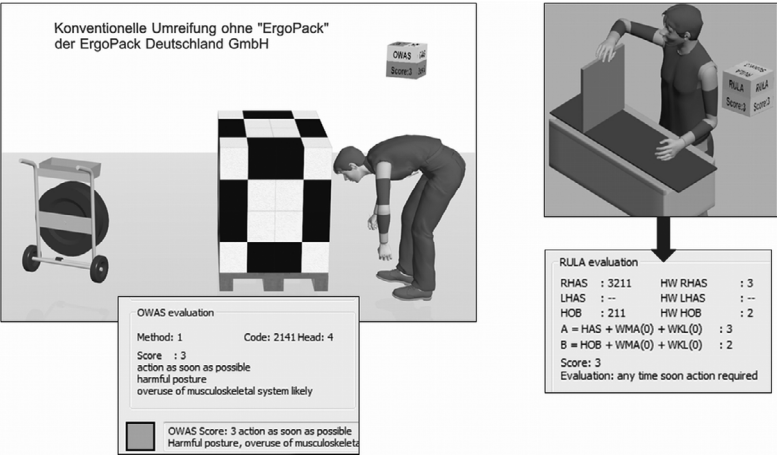


Abbildung 15: Körperhaltungsbewertung mit OWAS (links) und nach RULA (rechts)

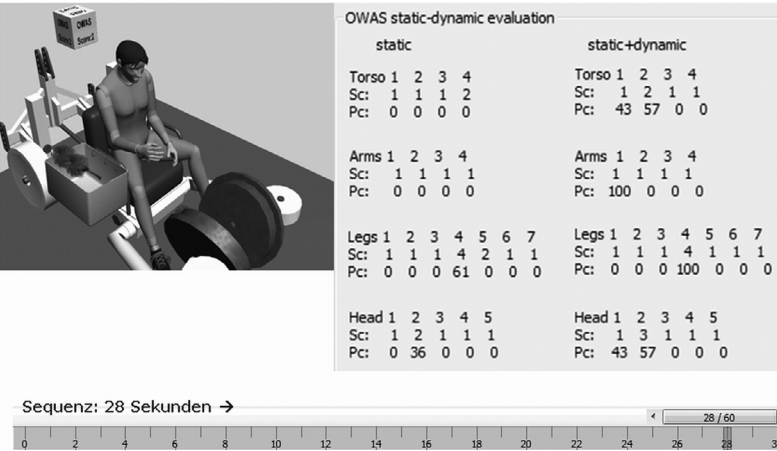


Abbildung 16: Körperhaltungsanteile statisch und statisch/dynamisch nach OWAS

grade musste in abgestufte, den Haltungs-klassifikationen entsprechende Definitionsbereiche gefasst und korrespondierenden Haltungswerten zugeordnet werden. Zur programmtechnischen Umsetzung des RULA-Verfahrens wurden Winkeldefinitionen für betreffende Körpersegmente aus den Verfahrensvorschriften selbst und unter Hinzuziehung von Fachliteratur (Gröllich 2011) in einer Datenbank hinterlegt.

OWAS überprüft Körperhaltungen in Verbindung mit Lastenhandhabung. Möglich ist die Beachtung einer einzelnen Gesamtkörperhaltung ohne Zeitbezug. Die Kombination aus Arm-, Bein-, Rumpfhaltung sowie dreier Lastgewichtsklassen führt zu Belastungsstufen und Maßnahmeklassen. Darüber hinaus können statische und statisch/dynamische Körperteilhaltungen von Rumpf, Kopf, Beinen und Armen zeitbasiert untersucht werden. Die Häufigkeit des Vorkommens einzelner Körperteilhaltungen führt zu entsprechenden Risikostufen und begründet einen Handlungsbedarf. Die ebenfalls originale OWAS-Papier- und Bleistift-Methode enthält ausschließlich qualitativ beschreibende Kriterien. Daher waren zur programmtechnischen Umsetzung von Einzelcodierungen vollständig eigene Festlegungen zur Quantifizierung lokaler Gelenkwinkelklassen zu treffen, die unter Einbeziehung arbeitswissenschaftlicher Fachliteratur vorgenommen wurde.

Die Ankopplung beider Verfahren an das digitale Menschmodell verfolgt das Ziel, zeitgleich zur Bewegung des Menschmodells eine automatische Bewertung nach OWAS und RULA zu generieren und das mögliche Gesundheitsrisiko sofort abzulesen. Einschränkend können z. Zeit noch keine Laufbewegungen, die im OWAS-Verfahren Belastungscodierungen erfahren, berücksichtigt werden.

Der Nutzer bindet ein Menschmodell als repräsentativen Vertreter einer potentiellen Nutzergruppe in eine virtuelle Szene ein. Er erzeugt eine Einzelkörperhaltung oder Abfolge von Einzelhaltungen des Menschmodells, die sich aus der Arbeitsplatz- oder Produktnutzung ergeben würden. Dialogbasiert hat er folgende Voreinstellungen in einem Control-Dialogfenster vorzunehmen:

- Wahl des Verfahrens;

- Aktivierung/Deaktivierung der Abstützung des Rückens;
- Angaben zur Muskelarbeit (Lastmasse etc.).

Durch die entwickelten Funktionalitäten des Ergotyping®-Tools entsteht für die Einzelhaltung oder während der Animation eine synchrone Auswertung der Körperhaltung nach dem aktivierten Beurteilungsverfahren. Veränderungen in der Körperhaltung des Menschmodells können sofort in Echtzeit abgelesen werden. In einem Monitor-Dialog werden die Belastungsstufe und Maßnahmeklasse sowie nachvollziehbar die Einzelcodierungen, die zu diesem Ergebnis geführt haben, ausgegeben.

Zusätzlich werden die Bewertungsergebnisse farblich nach Ampelverfahren codiert, um sie optisch hervorzuheben. Das geschieht zum einen im Monitor-Dialog und darüber hinaus direkt in der Szene, zugeordnet zum Menschmodell in einem Signalwürfel (s. Abbildung 15). Dieser kann am Menschmodell frei platziert werden, bewegt sich aber mit ihm mit. Dadurch kann das Einschätzungsergebnis des Gesundheitsrisikos zusammen mit der Szene gerendert werden.

Innerhalb der OWAS-Bewertung können für eine Bewegungssequenz ihre statischen und dynamischen Anteile ermittelt und angezeigt werden (s. Abbildung 16).

Zusätzlich zur Visualisierung der Szenen können in einem Report wichtige Bewertungsparameter und nutzerbezogene Daten gespeichert werden.

Literaturverzeichnis

- Wakula, J.; Berg, K.; Schaub, Kh.; Bruder, R.; Glitsch, U. 2009; Ellegast, R.: Der Monta-gespezifische Kraftatlas. BGIA-Report 3/2009, Hrsg.: Deutsche gesetzliche Unfallversicherung Berlin.
- Bullinger, H.-J. 1994: Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. Stuttgart: Teubner.

Gröllich, Daniel 2011: Zwischenbericht zum AIF–ZIM-Kooperationsprojekt „PointCloud-4D – Entwicklung von Verfahren der automatischen 3D-Bewegungsanalyse auf Basis von 3D-Kameras; Parameterfestlegung aus Ergonomieverfahren zur Bewertung von Körperhaltungen und Verifikation der neuen Technologie“. 30.05.2011 – TU Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft

Kontakt

Dr.-Ing. Christiane Kamusella
 TU Dresden
 Fakultät Maschinenwesen,
 Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
 Professur für Arbeitswissenschaft
 01062 Dresden
 christiane.kamusella@tu-dresden.de

Ingolf Rehfeld & Jan Wunderlich

Virtual Reality und Product Lifecycle Management – Entwicklung eines durchgängigen Prozesses für die BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH

Weltweit führende Hersteller von Markenprodukten sind ihrem Anspruch verpflichtet, Benchmark der Branche für Qualität, Design, Innovation und Gebrauchswert ihrer Produkte zu sein.

Dieses Ziel zu wettbewerbsfähigen Preisen und in immer kürzeren Innovationszyklen zu erreichen, ist kein zufälliges Ergebnis, sondern das Resultat visionärer Unternehmensstrategien, die schon früh auf standardisierte Produktentstehungsprozesse und durchgängige, unterstützende IT-Systeme im Rahmen eines konsequenten Product Lifecycle Management (PLM) setzen.

Für ein global aufgestelltes Unternehmen wie die BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH, die weltweit Produkte an mehr als 40 Standorten für 13 unterschiedliche Marken entwickelt, produziert und vertreibt, ist die Standardisierung der Prozesse vom Design über die Entwicklung und Fertigung bis hin zu Marketing, Service und Vertrieb sowie die Integration der IT-Systeme gleichermaßen zwingend notwendig und herausfordernd. Für neue Bausteine in einer PLM Strategie - wie Virtual Reality (VR) – sind die Anforderungen hoch gesteckt. Insellösungen und abteilungsspezifische Anwendungen sollen vermieden werden.

Eine gute Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung von VR ist ein durchgängiges Konzept für die High-end Visualisierung entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses, beginnend bei Designreviews – basierend auf digitalen Prototypen an Powerwalls – über Akzeptanztests und Engineering Anwendungen bis hin zur automatisierten Erstellung von Sachaufnahmen für das Marketing.

Letztendlich entscheidend ist eine detaillierte Return-on-Investment (ROI) Betrachtung. Beträchtliche Einsparpotenziale können im Designbereich aufgezeigt werden. Durch digitale Designreviews an Powerwalls kann der Musterbau reduziert werden. Aber entscheidend für den ROI ist die Weiterverwendung der Virtual Reality Modelle aus dem Design entlang des Produktentstehungsprozesses. Vor allem die Automatisierungsmöglichkeiten bei der Erstellung von Sachaufnahmen für Kataloge, Marketingunterlagen und Webpublishing versprechen erhebliche Einsparpotenziale.

Führende Fertigungsunternehmen nutzen bereits PLM-Systeme und verwalten dort heute im Wesentlichen die Engineering Daten. CAD-Assemblies liegen im PLM System für die Verwendung im VR-Tool bereits vor. Zusätzlich zur Geometriebeschreibung sind jedoch fotorealistische Materialshader und VR-Szenen mit Hintergrund und Ausleuchtung für die Virtual Reality Modelle erforderlich. Um diese ebenfalls im PLM-Backbone verwalten und VR-Prozesse automatisieren zu können, entwickeln nVIZ und ASCAD erweiterte Datenmodelle für das PLM-System. Die Verwaltung aller relevanten Daten für die fotorealistische Visualisierung – Geometrie, Erzeugnisstruktur und Materialshader – im PLM-System stellt sicher, dass reproduzierbare VR-Modelle erstellt werden und dass das Erscheinungsbild der digitalen Prototypen nicht von den persönlichen Fähigkeiten eines CG-Artist abhängig ist.

Mit der vollständigen Integration ins PLM-System werden Fehler vermieden, wiederkehrende Aufgaben automatisiert und Freiräume für die kreative Arbeit geschaffen.

Die wesentlichen Komponenten des vPLM Prozesses sind:

- Erweiterte Datenmodelle in Teamcenter, die eine Verwaltung aller VR-spezifischen Daten in Teamcenter ermöglichen mit Zugang zur Teamcenter-Technologie für Workflows, Änderungsmanagement, Zugriffsrechtekontrolle, Conferencing und Collaboration.

- Ein innovatives und offenes VR-Tool, das sich in den beschriebenen Prozess integrieren lässt und das alle Möglichkeiten für automatisierte Workflows zur Erstellung virtueller Szenen bietet, sowohl für Designreviews als auch für die Produktion von Bild- und Filmmaterial für Kataloge, Webauftritte etc.

Das VR-Tool wird so zu einem weiteren Authoring-Tool auf dem PLM-Backbone neben den eingesetzten CAD-Tools. Alle Anwender greifen auf die gleichen Produktdaten im PLM-Backbone zu. Im CAD-Tool wird die Geometrie erstellt und alle Flächen erhalten ihre Material-ID. Beim Laden der Produktdaten im VR-Tool werden die VR-Szenen, basierend auf den Geometriedaten, den Material-IDs, den zugehörigen VR-Shadern und der gewählten Umgebung automatisch erstellt und stehen in den frühen Stadien des Produktentwicklungsprozesses für Designreviews, in den späteren Phasen für das Rendern von Sachaufnahmen, für Sales- und Servicetrainings sowie für die Filmproduktion für Marketing Kampagnen und Webauftritte zur Verfügung.

Der zusätzliche Aufwand, der hierfür in den frühen Phasen in die digitalen Prototypen investiert wird (Frontloading), ist ein kritischer Erfolgsfaktor für den Gesamtprozess. Je früher nutzbare VR-Szenen zur Verfügung stehen, desto größer ist der Nutzen der digitalen Prototypen für den gesamten Produktentstehungsprozess und damit der Return-on-Investment.

In den Anfangszeiten von Virtual Reality haben Unternehmen schon wegen der rosigen Zukunftsaussichten in VR-Technologie investiert. Inzwischen können Kosten und Nutzen von VR sehr

viel realistischer bewertet werden, und vor der Einführung von VR steht i.d.R. die Hürde einer systematischen ROI-Analyse. Referenzen aus der Automobil- oder Luftfahrtindustrie, wo VR seit einigen Jahren eingesetzt wird, sind in der Hausgeräteindustrie nur begrenzt verwertbar. Physische Prototypen sind in der Automobilindustrie extrem teuer, sie stehen erst sehr spät in hinreichend guter Qualität und Vollständigkeit für Marketingkampagnen zur Verfügung und sind dann nicht in ausreichender Stückzahl bzw. zu den richtigen Terminen verfügbar. Etwas anders stellt sich die Situation für einen Hausgerätehersteller dar. Der Musterbau ist weniger aufwendig, entsprechend günstiger und schneller. Dennoch liegen die Investitionen in die erforderliche VR-Software, IT-Infrastruktur und Projektionstechnik in der gleichen Größenordnung. Dies stellt eine größere Herausforderung an die ROI-Betrachtungen. Sie sind kaum positiv zu entscheiden, wenn die Unternehmensbereiche getrennt als VR-Inseln analysiert werden. Sehr viel besser stellt sich die ROI-Betrachtung für einen durchgängigen vPLM-Prozess dar, der den Nutzen der visuellen Simulation entlang des gesamten Produktlebenszyklus einbezieht

vPLM – Virtual Product Lifecycle Management

Die Anforderungen:

- High-end Visualisierung entlang des gesamten Produktlebenszyklus
- direkter Zugriff auf alle Daten aus dem Produktentstehungsprozess
- Einbindung in bestehende Prozesse (Workflows, Change Management)
- Dokumentation des Produktentstehungsprozesses in einem System

Der Produktentstehungsprozess bei zahlreichen Unternehmen wird durch das PLM-System Teamcenter von Siemens Industry Software unterstützt. Der PLM-Backbone integriert dabei verschiedene Standorte, die gemeinsam an neuen Produktideen forschen und diese zu einem fertigen Produkt entwickeln. Alle Informationen und

Prozesse über den gesamten Produktlebenszyklus laufen zentral zusammen. Das vPLM-Konzept besteht darin, frühzeitig und zu jedem Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses auf Design- und Engineering-Daten zuzugreifen, diese Daten für Virtual Reality Anwendungen automatisiert aufzubereiten und für verschiedene nachgelagerte Prozesse (z.B. Marketing, Vertrieb und Service) bereitzustellen. Alle entscheidenden Komponenten für die korrekte, fotorealistische Visualisierung eines Produktes, wie die Umgebung, die Beleuchtungssituationen und fotorealistische Materialshader werden hierfür in Teamcenter verwaltet und in bestehende Prozesse eingebunden. Idealerweise erfolgt bereits während der Design- oder Engineeringphase im CAD-System die Zuweisung von Materialien auf einzelne Flächen eines Bauteils oder das gesamte Bauteil. Durch das visuelle Feedback kann der Anwender jederzeit prüfen, wie sich die Verwendung eines Materials auf das Design auswirkt. Beim Speichern der CAD-Daten werden sämtliche Informationen (Materialinformationen, PMI-Daten) in das neutrale JT-Datenformat übertragen und parallel zu den CAD-Modellen in Teamcenter hinterlegt. Für den vPLM-Prozess liegt die Priorität in der Verwaltung der benötigten VR-Daten wie Umgebungen, Materialshader, Lichter, Kameras u.v.m. Diese werden mit Teamcenter über eine Klassifizierung strukturiert verwaltet. Das VR-Tool ist über eine Direktschnittstelle in den PLM-Backbone vollständig integriert.

Bei der Entwicklung der Schnittstelle wird sehr großer Wert darauf gelegt, dass sich das VR-Tool über die Schnittstelle vollkommen in den PLM-Backbone integriert und die funktionellen Möglichkeiten von Teamcenter nutzt. Einzelteile und Baugruppen werden direkt aus Teamcenter geladen und lagerichtig positioniert. Methoden zur automatischen Aktualisierung von Komponenten werden dabei ebenso unterstützt wie das Variantenmanagement oder der Zugriff auf verschiedene Sichten eines Produktes. Während des Ladevorgangs der CAD-Daten werden die Materialinformationen aus den JT-Daten ausgewertet. Über ein entsprechendes Mapping wird der fotorealistische Materialshader aus Teamcenter ermittelt und automatisch auf die Geometrie appliziert. Angereichert mit einer



Abbildung 1:
Integration des
VR-Tools in den
Teamcenter
Backbone

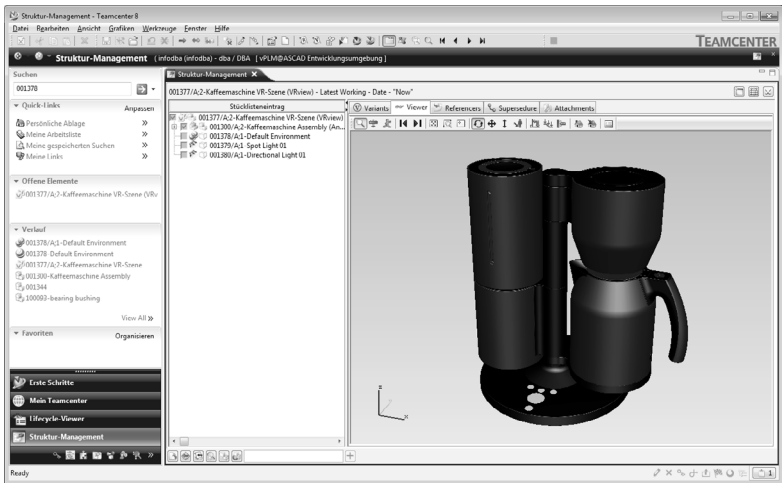


Abbildung 2 (mitte):
Ablage der VR-Szene
als strukturiertes Daten-
objekt in Teamcenter

Abbildung 3 (unten):
Ergebnis des vPLM-
Prozesses, z.B.: auto-
matisierte Erstellung
von Sachaufnahmen



Umgebung, diversen Lichtquellen, Kameras u.v.m. ergibt sich eine virtuelle Szene des Produktes, die wiederum in den PLM-Backbone zurückgespeichert werden kann. Durch die Verwaltung aller Daten in Teamcenter lassen sich Sachaufnahmen für Kataloge, Marketingunterlagen und Webpublishing automatisiert erzeugen.

Alle verwendeten Bestandteile (Baugruppen, VR-Environements, Lichtquellen, etc.) einer VR-Szene werden registriert und im PLM-Backbone synchronisiert. Die VR-Anwendungen sind damit vollständig in Teamcenter integriert und unterliegen den Änderungs- und Freigabeprozessen des Unternehmens. So werden aktuelle VR-Modelle zu jedem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus sichergestellt.

Fazit

Zu jedem Zeitpunkt, von der Entwicklung einer Designidee bis hin zum fertigen Produkt, stehen zusätzlich zu den 3D-Daten auch alle relevanten Daten für die High-end Visualisierung im zentralen PLM-Backbone zur Verfügung und können im Design, Engineering, Marketing, Vertrieb und im Service genutzt werden.

Kontakt

Ingolf Rehfeld
nVIZ GmbH
Händlerstraße 32
71711 Steinheim
<http://www.nviz.de>

Dipl.-Inf. Jan Wunderlich
ComputerKomplett ASCAD GmbH
Annaberger Straße 240
09125 Chemnitz
<http://www.computerkomplett.de>

Virtual Reality als zentrale Komponente einer PLM-Strategie – Herausforderungen und Umsetzungskonzepte

Motivation

PLM-Strategien stehen heute vor der Herausforderung, immer größere und vor allem auch immer komplexer vernetzte Informationen über Produkte nicht nur, wie im Rahmen von klassischen PDM-Lösungen üblich, weitgehend auf mechanische Komponenten beschränkt für die Produktentwicklung zu verwalten, sondern Lösungen für den gesamten Produktlebenszyklus bereitzustellen. Dabei müssen zum einen vielfältige mechatronische Komponenten (Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software), große Komponentenzahlen, tiefe Strukturen, große Variantenvielfalt sowie z.B. auch servicebezogene Informationen abgebildet werden. Zum anderen sind diese Informationen im Kontext einer verteilten Nutzung (collaborative engineering) von der Anforderungsdefinition über die frühen Entwicklungsphasen (front loading) bis zur Wartungsunterstützung bereitzustellen.

Diese Situation konfrontiert Administratoren wie Nutzer mit zwei Folgeerscheinungen. So führt die zunehmende Vernetzung der Unternehmensbereiche zu einer wachsenden Zahl von Schnittstellen zwischen unterschiedlichen (in ihrer Anzahl eher zunehmenden) Verwaltungssystemen. Man denke hier nur an die Koexistenz von lokalen CAD-Verwaltungssystemen (TDM), Enterprise-Systemen (PDM) und ERP-Systemen. Dies erschwert es dem Nutzer unheimlich, zum Beispiel aus Anlass einer erforderlichen Änderung auf die korrekten und vollständigen Daten zuzugreifen. Verteilte Entwicklungen führen darüber hinaus dazu, dass auch die Abstimmung

zwischen den Partnern sowie die Zusammenführung von Entwicklungsständen immer schwieriger wird.

Andererseits sind mit den umfangreichen Produktmodellen die Voraussetzungen gegeben, bereits in sehr frühen Phasen das zu erwartende Produktverhalten (Funktionalität) sowie die Erscheinung (Design) sehr exakt zu simulieren. Dadurch wird es zunehmend realistisch, das virtuelle Produkt so zu präsentieren, dass Rückschlüsse auf das spätere reale Produkt zuverlässig getroffen werden können. Derartige Auswertungen besitzen ein sehr hohes Nutzenspotential bei der Validierung von Entwicklungsständen und bieten sich andererseits auch für die Unterstützung beim Zugriff auf die komplexen Informationsstrukturen im PLM an.

In diesem Umfeld stehen die Werkzeuge und Methoden der Virtual Reality (VR) zur Verfügung. VR ist geeignet, eine weitgehend realistische Präsentation von Form, Aussehen, Bewegung oder Funktion des künftigen Produkts zu vermitteln. Im Unterschied zu CAD-Systemen oder Simulations-Tools sind VR-Systeme bisher jedoch nur wenig in die unternehmensweite Informationsstruktur eingebunden. Die Vorbereitung einer VR-Präsentation bleibt in den meisten Fällen Spezialisten vorbehalten, ist fehleranfällig und aufwendig. VR wird deshalb von den Produktentwicklern nur sehr zögerlich genutzt und heute besonders am Ende von Entwicklungsetappen zur Ergebnisvalidierung eingesetzt. Dabei sind gerade VR-Techniken wegen der anschaulichen, schnellen Produktpräsentation besonders geeignet, aus PDM-Systemen entnommene Produktmodelle zu validieren sowie Entwicklungsarbeiten zu koordinieren, zu beurteilen und die Aufgabenverteilung in iterativen Abläufen zu unterstützen.

Der Artikel beschreibt eine Lösung zur Prozessintegration, in der die VR-Anwendung ihre Position von einem reinen Visualisierungswerkzeug zu einem Interface auf die Produktdaten in einer PLM-Umgebung verändert. Betrachtet man dabei VR als Kern einer zentralen Kollaborationsplattform, die alle am Entwicklungsprozess Beteiligten mit dem virtuellen Produkt zusammenführt, ergibt sich eine neue Position im Prozess der Produktentwicklung. VR wird zum hochqualitativen Interface zu den komplexen Produktinforma-

tionen und steht als einfach zu handhabendes Visualisierungswerkzeug im Entwicklungsprozess permanent zur Verfügung. Grundlage ist die enge Verbindung zwischen VR und PDM. Alle Produkt- und Metadaten stehen im VR-System zur Verfügung. So können beispielsweise nach einer Produktbewertung im VR direkt Entwicklungsaufgaben an CAD-Arbeitsplätze verteilt oder Modelländerungen synchron ins VR-System übernommen werden. Die unmittelbare Bewertung kann in einer großenechten, immersiven VR-Lösung stattfinden, die den aktuellen Status des Projekts präsentiert.

Die umrissene Integrationslösung muss die folgenden Minimalanforderungen erfüllen:

1. Konsistente Verknüpfung der am Projekt beteiligten Anwendungsprogramme. Dies soll durch die Produktstruktur, die im PDM abgelegt ist, erfolgen. Alle Einzelteile und Baugruppen, die im CAD-System bearbeitet und im VR-System präsentiert werden, müssen jederzeit zur Produktstruktur referenziert sein.
2. Korrekte Visualisierung der Modelle mit Materialeigenschaften und in der festgelegten Umgebung, direkt durch den Produktentwickler.
3. Präsentation von Produktkomponenten mit ihren PDM-Metadaten wie Freigabestatus, Bearbeiter, Verknüpfungen zu weiteren Dokumenten und zum Geschäftsprozess des Unternehmens. Neben CAD-Systemen sollen sich auch weitere entwicklungsrelevante Anwendungsprogramme anbinden lassen.
4. Bereitstellung von Interaktions- und Kommunikationsfunktionen zwischen VR und Anwendungsprogrammen. Diese sollen insbesondere den einfachen Wechsel zwischen den Anwendungsprogrammen sowie das gegenseitige Aktualisieren der Komponenten im VR oder z.B. im CAD ermöglichen. Weiterhin müssen Änderungen an Komponenten, die für mehrere Bearbeiter relevant sind, entsprechend kommuniziert werden.

In den folgenden Abschnitten wird eine Softwareplattform dargestellt, die diesen Anforderungen gerecht wird.

Aktueller Stand in Forschung und Entwicklung

Die moderne Produktentwicklung ist gekennzeichnet durch die Kollaboration von Entwicklerteams und die Nutzung digitaler Produktmodelle. Diese werden mit verschiedenen Softwarewerkzeugen erstellt. Im ständigen Wechselspiel mit der Gestaltentwicklung werden funktionale, produktionstechnische und ergonomische Parameter des künftigen Produkts ausgestaltet und beurteilt (Krüger et al. 2010). Für Bewertung oder Beurteilung von Entwicklungsständen im Rahmen der Produktentwicklung wird nachfolgend der Begriff Design Review verwendet. Dieser wird in der Normung in Europa und Australien verwendet (IEC 2005).

Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist die Einbeziehung moderner Visualisierungs- und Evaluierungstools auf Basis von VR für Ergonomie-, Einbau- und Designuntersuchungen. Veröffentlichungen betreffen die Kombination verschiedener Sinneseindrücke zur realitätsnäheren Erlebbarkeit teils virtueller und teils realer Modelle (Stark et al. 2010) oder die immer realistischere Erlebbarkeit von VR-Szenen durch Integration korrekter funktionaler Modelle und echtzeitfähiger Simulationen (Stork et al. 2010, Rossmann et al. 2010).

Vorrangig in größeren Unternehmen wird VR zunehmend eingesetzt, jedoch gleichzeitig in der praktischen Anwendung als ein elitäres und kostenintensives Werkzeug gesehen, das isoliert am Ende von Entwicklungsschritten zur Beurteilung der Ergebnisse angewendet wird. Meist basieren VR-Szenen auf konvertierten Daten aus unterschiedlichen Quellen und werden am Ende von Entwicklungsstadien erarbeitet. Wenn Produktgestalt oder -struktur im Ergebnis von Produktbeurteilungen geändert werden müssen, entstehen Probleme, da die Daten der VR-Szene keine Verbindungen mehr zu den Erzeugersystemen haben. Dieses Problem ist bekannt und eine Anzahl publizierter Forschungs- und Entwicklungsprojekte widmet sich der engeren Verbindung von CAD, Simulation, Arbeitsplanung und VR-Werkzeugen, wie (Katzenbach, Haasis 2008) oder (Neugebauer et al. 2010). Dies geschieht meist über bilaterale Schnittstellen, spezielle Konvertierungs- und Aufbereitungsprozesse und damit proprietäre Integrationslösungen.

Eine zentrale Aufgabe innerhalb der Produktentwicklung ist das Erstellen und Bewerten der Produktgestalt. Dabei wird iterativ die Gestalt im Detail an CAD-Arbeitsplätzen erarbeitet und in VR-basierten Beurteilungen im Kontext des Gesamtprodukts beurteilt. Essenziell ist in diesem Prozess die wechselseitige Nutzung von CAD- und VR-System mit jeweils aktuellem Datenbestand.

Die Tatsache, dass dies in der Praxis bisher kaum gegeben ist, resultiert aus der ungenügenden Integration von VR-Werkzeugen in das übergeordnete, unternehmensweite Informations- und Prozessmodell. Während andere Softwarewerkzeuge und die mit ihnen erzeugten Datenbestände in einer PDM-Lösung vereint sind und damit effiziente Abläufe im Entwicklungsprozess unterstützen, wird VR oftmals als ein ausschließlich zur Validierung geeignetes Werkzeug am Entwicklungsabschluss verstanden. Damit können Informationen, die aus der Erprobung und Beurteilung des virtuellen Produkts in VR resultieren, nur unter Schwierigkeiten in einen iterativen Entwicklungsablauf eingebracht werden. Die grundlegende Idee der Verknüpfung von Produktstrukturen des PDM mit VR taucht erstmals in (Graf et al. 2002) auf. Weiterführend wird in (Wang et al. 2010) eine Produktstrukturbeschreibung benutzt, um VR-Szenen mit CAD-Komponenten so zu koppeln, dass sofortige punktuelle Aktualisierungen in VR nach CAD-Änderungen möglich sind. In den zuletzt angeführten Arbeiten wird die Strukturbeschreibung allerdings nur unabhängig vom PDM verwendet.

(Kim, Weissmann 2006) stellen die Middleware MEMPHIS vor, die mehrere CAD- PDM- und VR-Systeme auf Basis der OMG PLM Services und web service technology verbindet. Für jedes CAD-Modell wird automatisch eine Konvertierung der CAD-Geometrie zu VR-Files vorgenommen. Zu jeder Konvertierung werden verwendete Einstellungen und Metadaten gespeichert, um nach Änderungen in Echtzeit wieder VR-Modelle aus konvertierten CAD-Daten und PDM-Metadaten aufbauen zu können. Materialdaten (Farbe, Textur,...) werden den Komponenten im VR zugewiesen, so dass Modelle in CAD und VR unterschiedliches Aussehen aufweisen. Es existiert keine bidirektionale Kopplung, mit der aus dem VR die vorgelagerten Anwendungen ansprechbar sind.

Speziell für den digital mockup stellen (Song et al. 2006) ein System zur Visualisierung und Prüfung von Produkten vor, die in unterschiedlichen CAD-Systemen modelliert wurden. So können Produktprüfungen stattfinden, ohne dass das komplette Produkt zuvor im CAD modelliert werden muss. Es gibt allerdings keine bidirektionale Kopplung, mit der nach abgeschlossenem digital mockup bestimmte Teile wieder im CAD geladen werden können, um festgestellte Mängel zu beseitigen.

Neben den bisher vorrangig betrachteten Aspekten der Modellintegration müssen auch Randbedingungen diskutiert werden, unter denen Produktmodellierung und Design Reviews stattfinden. Beide sind stark arbeitsteilige Prozesse, beziehen vielfältige Kooperationsbeziehungen ein und benötigen bedeutende Ressourcen zur Modellierung, Berechnung und Datenverwaltung. Die Gestaltung der Kollaboration spielt damit für die verbesserte Integration und Ausnutzung von VR bei Design Reviews eine bedeutende Rolle (Stelzer 2010a).

Mit der Entwicklung von VR-Systemen durch Computergrafiker und Hardwarespezialisten entstand die Idee, beispielsweise zwei CAVes per Datennetz zu koppeln um die Rechenleistung mehrerer Computer und Standorte zu bündeln (Leigh et al. 1997). Technisch ist es inzwischen möglich, hochauflösende Multi-Display-Visualisierungen an mehreren Standorten zu berechnen und zu präsentieren (Jeong et al. 2010), so dass alle technischen Voraussetzungen gegeben sind, VR-Szenen zu verteilen bzw. an verteilten Standorten zu nutzen. Kommerziell angebotene Lösungen wie Conduit® (Mechdyne Corporate Marshalltown, USA) oder TechViz XL® (TechViz Paris, Frankreich) verarbeiten die von CAD-Systemen generierten OpenGL-Streams weiter. Die Tools bieten Viewer für beliebige Displaykonfigurationen, positionieren und skalieren mehrere OpenGL-Streams relativ zueinander und bieten Navigations- und Interaktions-tools. Damit verfügen die namhaften CAD-Lösungen von Autodesk, Dassault, PTC und Siemens PLM auf sehr einfache Weise über die Möglichkeit einer VR-Anbindung. Allerdings begrenzen die nativen CAD-Daten und die Leistungsfähigkeit der notwendigerweise parallel arbeitenden CAD-Systeme die Performanz der Visualisierung.

Im Designprozess treten neben die Visualisierung zusätzlich Planungs-, Koordinations- und Beurteilungsaufgaben, die nur im Team bearbeitet werden können (Jin et al. 2007). Damit wird die genauere Betrachtung der Kollaboration in virtuellen Umgebungen wichtig und Aspekte der Organisation und Handhabung erweitern die informationstechnischen Anforderungen an VR-Plattformen.

Es gibt in diesem Zusammenhang auch Vorschläge, existierende virtuelle Welten wie »second life«, die erfolgreich für Projektsteuerung (Erenli 2009) oder e-learning (Attwell 2008) genutzt wurden, für die Produktpräsentation und -bewertung anzuwenden (Paul, Anand 2010). Dem stehen die extremen Anforderungen an hochgenaue und umfangreiche Geometrierepräsentationen entgegen, die momentan in virtuellen Welten nicht erfüllbar sind. Interessant sind jedoch die sozialen Aspekte der Kommunikation und Rollenmodelle sowie die Präsentation der Beteiligten an Design Reviews durch mehr oder weniger realitätsnahe Avatare mit bestimmten sozialen und kommunikativen Fähigkeiten, was auch in (Peinado et al. 2009) diskutiert wird.

Die bekannten kommerziellen Tools für kollaborative Design Reviews bieten heute die Darstellung des relevanten Produktmodells auf verteilten Displaysystemen an. Bei mehreren am Review beteiligten Standorten wird eine Verteilung der Daten und eine Synchronisation von Bildausschnitt und Blickrichtung vorgenommen. Das ist allerdings bei differierenden Arbeitsplatzausstattungen der Standorte nicht zweckmäßig. Beispielsweise muss die Navigation die verfügbaren Eingabegeräte (Maus, Flystick, ...), die Art des Displaysystems und ein eventuell vorhandenes Trackingsystem für Positionen, Gesten, Bewegungen etc. berücksichtigen. So nennen (Kticić et al. 2009) auch die gleiche Ansichtseinstellung für Teilnehmer an Desktop oder CAVE sowie undifferenzierte Interaktionsrechte als wesentliche Probleme in der Handhabung verfügbarer Lösungen für mehrere Benutzer.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass verfügbare VR-Werkzeuge den technischen Anforderungen an die Benutzung innerhalb von Produktentwicklungsprozessen hinsichtlich Darstellungsqualität und

Rechenleistung entsprechen. Unzureichend ist dagegen die Integration aus Prozesssicht, wofür die enge Anbindung an die Produktstruktur über das PDM Voraussetzung ist. Der Einsatz der VR-Werkzeuge erreicht eine neue Qualität, wenn Kooperations- und Organisationsstrukturen der Produktentwicklung auf die Funktionen der VR-Werkzeuge übertragen werden. Solche speziellen Funktionen, die beispielsweise Freigabeprozesse unterstützen oder den schnellen Wechsel zwischen CAD und VR erlauben, existieren bis heute nicht in VR-Systemen.

VRplm – Eine Kollaborationsplattform für Virtual Reality

Die effiziente Nutzung von virtuellen Prototypen in der Produktentwicklung sowie für Marketing, Vertrieb und Training setzt neben hochleistungsfähigen Visualisierungslösungen vor allem die Integration in die Unternehmensprozesse voraus. Die entwickelte Kollaborationsplattform VRplm ermöglicht die vollständige Integration von VR-Systemen in PLM-Umgebungen mit CAD-Systemen, CAE-Anwendungen und PDM-Backbone.

Die Produktstruktur im PDM sichert die persistente und konsistente Verknüpfung der Modelle im CAD und im VR. So können beispielsweise simultan zur VR-Session CAD-Modelle geladen, geändert und anschließend sofort wieder kontextgerecht im VR-System dargestellt werden. Andererseits können im VR-System Produkte zusammengestellt und bewertet werden, deren Teilmodelle aus unterschiedlichen CAD-Systemen stammen bzw. die nur in vereinfachten Austauschformaten wie JT oder VRML vorliegen (Stelzer et al. 2010b). Neben CAD-Modellen können jedoch auch Berechnungsergebnisse, Bewegungssimulationen oder Werkzeugbahnen dargestellt werden. Voraussetzung ist deren Speicherung im PDM und die Verknüpfung mit der Produktstruktur.

CAD-Baugruppen werden beim Einchecken analysiert und mit dem Stammsatz der Baugruppe in der PDM-Lösung abgelegt. Die Speicherung der Geometrie erfolgt als natives Format und gleichzeitig als VR-konformes Austauschformat (z.B. JT, STL oder VRML). Zusammen mit den Strukturinformationen werden Position

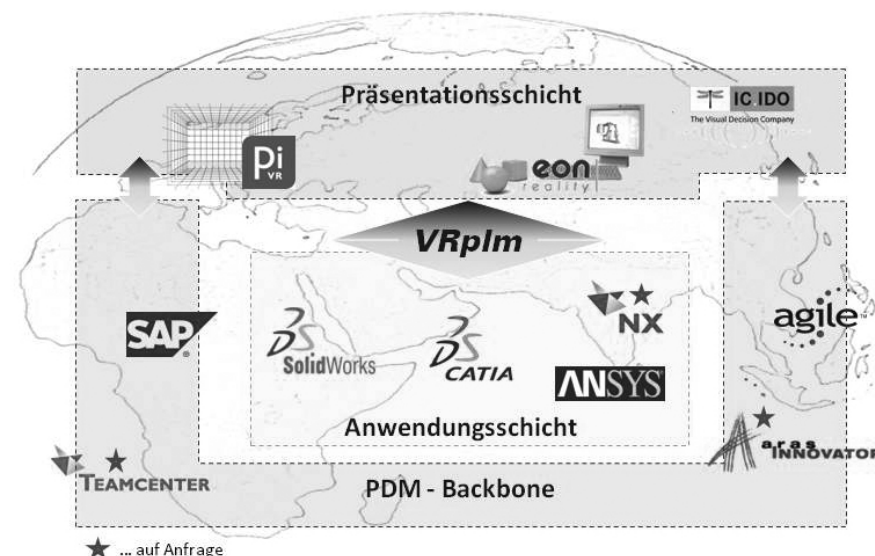


Abbildung 1: Struktur der Kollaborationsplattform

und Orientierung aller Teile und Baugruppen als Transformationsmatrizen gespeichert. Diese Vorgehensweise ermöglicht später die exakte Platzierung der Modelle im VR-System auch ohne die CAD-typischen Constraints. Indem die Visualisierungsdaten parallel zur fortschreitenden CAD-Modellierung entstehen, entfällt die zeitaufwendige Konvertierung von CAD-Daten vor einer VR-Session, wie sie noch in vielen Unternehmen üblich ist. Es ist praktisch jederzeit ohne Vorbereitung möglich, die VR-Visualisierung des aktuellen Produktentwicklungsstandes durchzuführen.

Ein Grundgedanke der Kollaborationsplattform ist, Entwicklungswerkzeuge und VR-Systeme nur in ihren jeweiligen Anwendungsfeldern wirken zu lassen. So steht CAD für die Erstellung exakter parametrischer 3D-Geometriemodelle. VR nutzt diese Informationen, um anhand von Darstellungen in hoher Wahrnehmungsqualität die Beurteilung großer und heterogener Modelle zu verbessern. CAD und VR werden nicht durch Funktionen erweitert, über die das jeweils andere System ohnehin verfügt.

Softwarearchitektur der VRplm-Kollaborationsplattform

Das Konzept der Kollaborationsplattform erlaubt die flexible Verknüpfung von mehreren CAD- und VR-Systemen mit einer PDM-Lösung. In Abbildung 2 ist das Integrationskonzept der Kollaborationsplattform anhand einer beispielhaften minimalen Konfiguration dargestellt. Sie besteht aus jeweils einer CAD- und VR-Anwendung und einem PDM-System.

Jede Anwendung wird mit einem Plug-In ergänzt. Diese Plug-Ins enthalten Funktionen zum Auslesen oder zum Setzen von Daten in den Anwendungen. Zur Implementierung der Plug-Ins werden die anwendungsspezifischen application programming interfaces (API) genutzt. Zwischen den Anwendungen werden die Befehle und Daten in einem anwendungsunabhängigen Format übertragen. Soll ein weiteres Anwendungsprogramm in die Kollaborationsplattform integriert werden, ist lediglich ein neues Plug-In zu entwickeln.

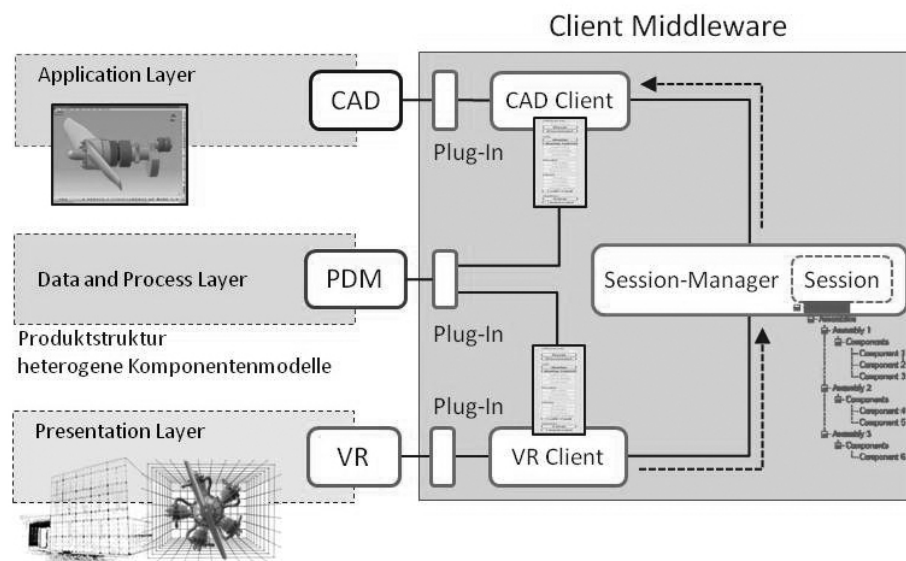


Abbildung 2: Das VRplm-Integrationskonzept

Weiterhin existieren auf CAD- und VR-Seite Clientanwendungen. Diese besitzen eine Benutzeroberfläche, um die in der Kollaborationsplattform möglichen Funktionen zu starten. So sind im CAD-Client beispielsweise Funktionen enthalten, die Daten im PDM ermitteln und Funktionen im VR auslösen:

- Übernahme der aktuell geladenen CAD-Datei.
- Abgleich vorgenommener Änderungen zwischen den Systemen (vgl. Abb. 3).
- Laden beliebiger Baugruppenkontexte ins VR; Dies betrifft Verwendungen in übergeordneten Strukturen sowie Umgebungselemente. Dabei können die Komponenten auch aus anderen CAD-Systemen stammen.
- Servicefunktionen: Einblenden/Ausblenden von Komponenten, Transparenz setzen, Änderung der Farbe.

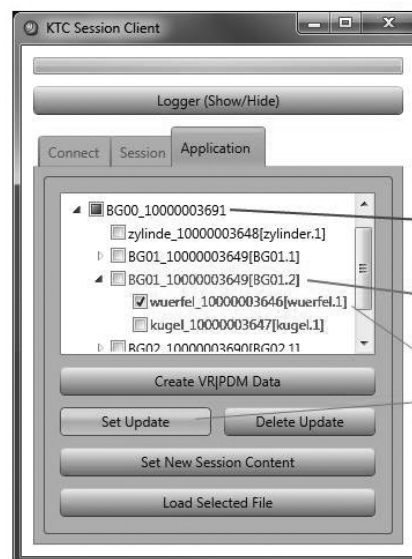
Der VR-Client bietet beispielsweise folgende Funktionen:

- Laden einer selektierten Komponente in ein CAD-System.
- Ermitteln und Laden von Simulationsdaten zur Geometrie.
- Ermitteln von Metainformationen aus dem PDM und Einfärben der Komponenten nach Freigabestatus, Ursprungssystem oder Bearbeiter.

Die vorhergehende Aufzählung deutet an, dass bei der Ausführung einiger Funktionen zusätzliche administrative Informationen und Funktionen erforderlich sind, um die Kollaboration der beteiligten Anwendungen zu organisieren. Diese Aufgabe übernimmt der Session Manager.

Der Session Manager

Jedes Design Review als Kollaborationsprozess wird durch den Session Manager initiiert und koordiniert. Eine Session entspricht einem Produktentwicklungsschritt mit einem iterativen Wechsel aus Bewertung im VR und Änderung im CAD. Die Session wird durch einen Bearbeiter mit entsprechenden Zugriffsrechten im Session Manager initialisiert und konfiguriert. Dabei wird per Replikation der relevante Datenbestand aus dem PDM kopiert und für das Laden



Produktstruktur der Session

In CAD geladene
Produktkomponenten

Änderung der selektierten
Komponente in VR

Abbildung 3: Übergabe einer
Änderung über den CAD-Client

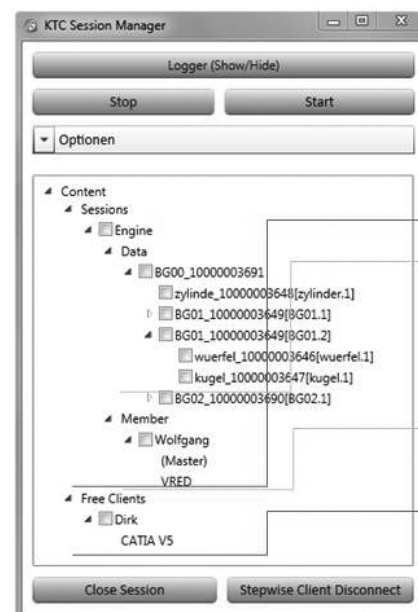


Abbildung 4: Verwaltung
mehrerer Beteiligter an einem
Design Review im Session-
Manager

Aktuelle Session

Produktstruktur

VR-System mit dem
ersten Teilnehmer
(gleichzeitiger Eigentümer)

CAD Workstation, die
ggw. nicht an Session
beteiligt ist

im VR vorbereitet. Diese Vorbereitung kann erfolgen, bevor sich alle beteiligten Mitarbeiter versammeln bzw. sich an ihren Arbeitsplätzen befinden. Das spätere Laden umfangreicher Produkte ins VR lässt sich dadurch stark beschleunigen.

Im weiteren Verlauf der Session können nun im VR diverse Prüfungen an den Modellen vorgenommen werden oder Teilmodelle geladen und untersucht werden. Dabei können sich erforderliche Gestaltsänderungen ergeben, die durch Bearbeitung der Modelle im CAD realisiert werden müssen. Aufgabe des Session Managers ist nun, die an der Session Beteiligten zu verwalten. CAD- und VR-Arbeitsplätze melden sich über das Netzwerk an. Der Session Manager registriert für alle Beteiligten die Benutzernamen und die Art des Arbeitsplatzes. Weiterhin registriert der Session Manager die an den Arbeitsplätzen in Bearbeitung befindlichen Modelle (Abb. 4).

Folgende Funktionen werden im Verlauf der Arbeit vom Session Manager ausgeführt:

- Prüfung der Zugriffsberechtigung bei allen Dokumenten, die durch die CAD- oder VR-Clients der Arbeitsplätze angefordert werden.
- Verwaltung der Änderungszustände, wenn die Bearbeitung von CAD-Modellen abgeschlossen ist. Die veränderten Modelle werden an Stelle der zu überarbeitenden Modelle visualisiert.
- Verwaltung von Änderungen der Produktstruktur, die durch Hinzufügen, Löschen oder Verschieben von Komponenten entstehen.
- Aufbau von temporären Geometriemodellen, wenn für das Arbeiten in einem CAD-System zur Orientierung Modelle aus einem anderen System nötig sind.
- Verteilung von Benachrichtigungen, wenn Modelländerungen erfolgt sind und diese Modelle auch an anderen Arbeitsplätzen geladen sind.

Am Ende einer Session checkt der Session Manager alle geänderten Modelle und Strukturen wieder ins PDM ein und schließt damit die iterative Bewertung und Anpassung der Produktmodelle ab.

Visualisierung von Materialien

Wesentlich für die Beurteilung von Entwicklungsarbeiten ist in vielen Fällen das Aussehen des späteren Produkts. Demzufolge wird viel Aufwand in die Modelle investiert, damit sie möglichst realitätsgetreu erscheinen. Beim Konvertieren in andere Formate oder bei neuen Modellversionen sollte dieser Aufwand nicht wiederholt anfallen. Wegen der hohen Relevanz für die Modellierung wird auf dieses Problem hier gesondert eingegangen.

Das Aussehen eines Modells oder auch einzelner Oberflächen in CAD oder VR wird durch die Zuweisung eines Materials erzeugt. Ein Material wird durch mehrere Parameter beschrieben. Art und Anzahl der Parameter hängen von den Möglichkeiten und Ansprüchen des Anwendungsprogramms ab, mit dem die Visualisierung erfolgt. Meist sind die Materialmodelle in den VR-Systemen komplexer als in den CAD-Systemen. Während im CAD oftmals nur Farben und Texturen benutzt werden, kommen im VR Reflexionseigenschaften und weitere Modifikationen durch Beleuchtung (environment mapping) oder Rauheit (bump mapping) hinzu.

Bisher gibt es keine einheitlichen Beschreibungsmöglichkeiten für das Erscheinungsbild von Materialien. Selbst gleiche Farbwerte und Texturdateien erzeugen unter Umständen stark voneinander abweichende Darstellungen. Das wird durch die unterschiedliche Verarbeitung von Materialparametern durch die eingesetzten Renderprogramme verursacht. Für die mit VRplm verbundenen Anwendungen wird eine gemeinsame Materialbibliothek in Form einer XML-Beschreibung angeboten. Die Zuweisung der Materialien erfolgt über logische Namen, die in allen Anwendungen bekannt sind. Diese Namen werden den Produktkomponenten als Materialkennung zugewiesen und im PDM gespeichert. VRplm bietet dabei zwei unterschiedliche Arbeitsweisen an. So ist es möglich, die Materialangaben direkt auf den für das entsprechende VR-System benötigten Shader zu mappen. Dieser wird dann direkt im PDM-System verwaltet. Alternativ ist es jedoch auch möglich, die für das Rendern relevanten Parameter im XML-Format abzubilden.

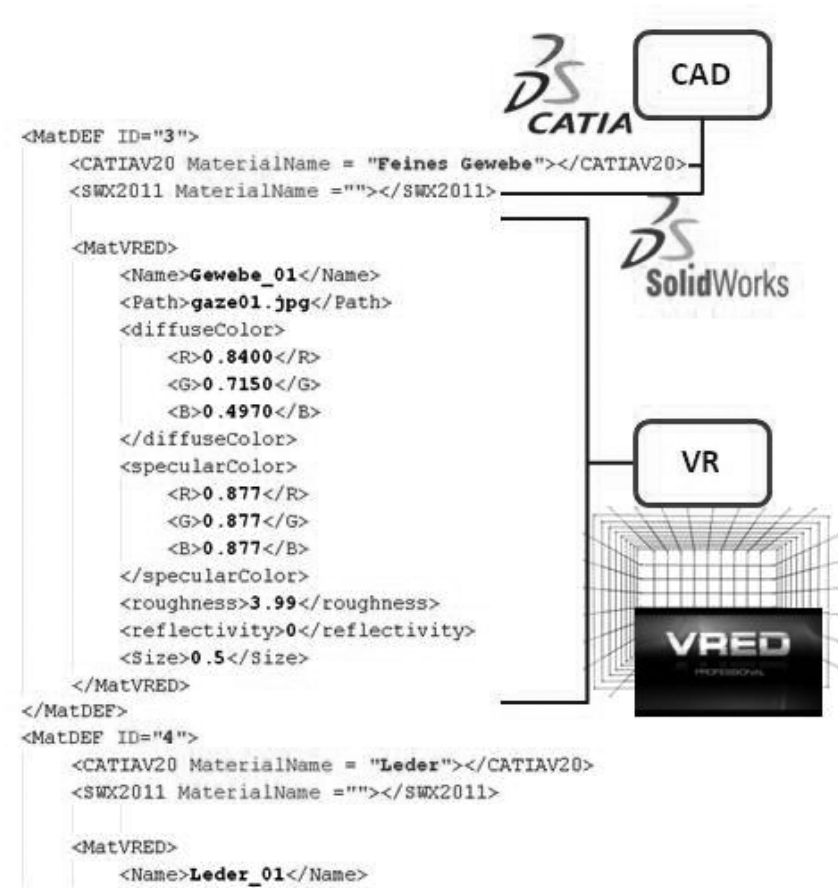


Abbildung 5: XML-Materialdefinition

Dabei werden in einer übergreifend verfügbaren XML-Beschreibung für jede Anwendung die Parameter gespeichert, aus denen das API der Anwendung die Materialdarstellung aufbauen kann. Der einmalige Aufwand für die Festlegung und Erstellung der Materialbeschreibungen vereinfacht und verbessert alle folgenden Modelltransformationen. Zusätzlich ist die projektinterne Reduzierung der verfügbaren Materialien auf eine vereinbarte Auswahl vorteilhaft.

Durch diesen Mapping-Mechanismus ist es möglich, bei der Materialverwendung alternative Szenarien zu bedienen:

1. In allen Anwendungen sind zumindest weitgehend gleiche Materialdarstellungen zu sehen. In der XML-Beschreibung werden Parameterkombinationen abgelegt, die in jedem Anwendungsprogramm zum gleichen Erscheinungsbild führen.
2. In CAD und VR werden unterschiedliche Materialdarstellungen verwendet. Damit kann im VR-System die Priorität auf der realistischen, hochwertigen Visualisierung liegen und im CAD das gleiche Material mit funktional oder technologisch bedeutsamen Farben versehen werden.

Materialdefinitionen stehen auf diese Weise in allen Anwendungen zur Verfügung und können sowohl innerhalb eines CAD-Systems als auch innerhalb eines VR-Systems gewählten Produktkomponenten zugewiesen werden. Sie müssen nicht mühsam neu erzeugt werden. Im VR erarbeitete und für gut befundene Materialien können im CAD zumindest nachempfunden werden.

Durchführung eines Design Review mit VRplm

Am Beispiel eines Sternmotors für Modellflugzeuge soll die Leistungsfähigkeit der VRplm-Integrationslösung demonstriert werden. Der Fokus liegt dabei auf der verteilt stattfindenden Produktentwicklung einer heterogenen Baugruppe (Abb. 6).

Der Motorhersteller (OEM) lässt die Komponenten Kurbeltrieb und Motorgehäuse durch zwei Zulieferer konstruieren. Die Zulieferer arbeiten zum einen mit dem CAD-System CATIA (Motorgehäuse) und zum anderen mit SolidWorks (Kurbeltrieb). Eine komplette CAD-Baugruppe, bestehend aus Kurbeltrieb und Motorgehäuse, existiert somit nicht. Zur Validierung der Passfähigkeit aller Produktkomponenten erfolgt das Design Review beim OEM auf Grundlage der im PDM hinterlegten Strukturinformationen und der Austauschgeometrie.

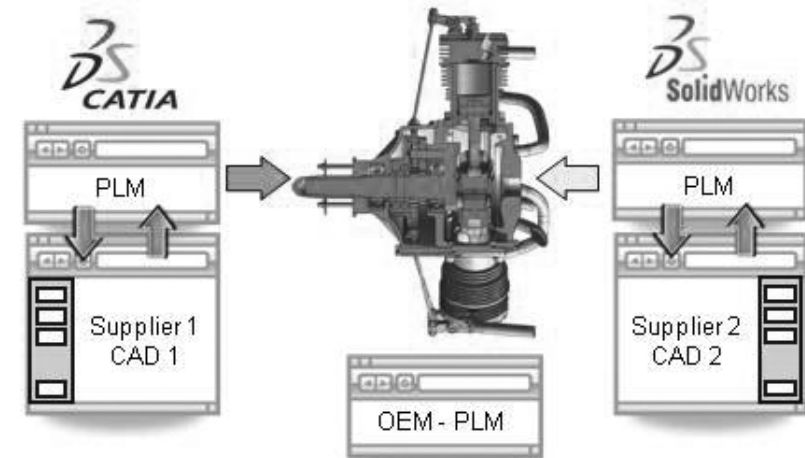


Abbildung 6: Aufbau einer beispielhaften, heterogenen Assembly

Gegenstand des Design Reviews in der Kollaborationsplattform ist eine Änderung an der CATIA-Baugruppe Kurbeltrieb. Es soll eine neuentwickelte Zylinderkopfdichtung eingebaut werden, die andere Abmessungen als die bisher verwendete aufweist. Nach erfolgter Konstruktionsänderung muss geprüft werden, welche Komponenten im Produkt Sternmotor angepasst werden müssen, damit es infolge der neuen Dichtung nicht zu Lücken oder Überschneidungen kommt. Insbesondere die Prüfung gegen die SolidWorks-Baugruppe ist nicht ohne weiteres möglich, da die Baugruppen nicht gemeinsam in einem CAD-System geladen werden können. Die Prüfung erfolgt also unter Regie des Session Managers im VR-System. Zur Durchführung des Design Reviews startet der OEM den VRplm-Session Manager (Abb. 7). In diesem wird eine Session angelegt, die den zu untersuchenden Motor betrifft. Das Informationsmodell für die Untersuchung besteht aus der Produktstruktur und PDM-Metainformationen, Positionen, Orientierungen, Materialien und Sichtbarkeiten der einzelnen Komponenten.

Anschließend startet der OEM sein VR-System und koppelt es mit Hilfe des lokal installierten Session-Clients an den Session Manager.



Abbildung 7: Beginn eines Design Reviews mit VRplm

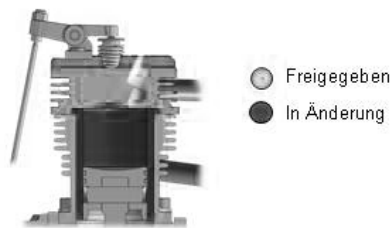


Abbildung 8: Visualisierung von PDM-Metadaten in VR

Der OEM eröffnet eine Session und lädt die in seinem PDM vorliegenden Baugruppen Kurbeltrieb und Motorgehäuse ins VR-System. Die Positionierung beider Baugruppen erfolgt entweder manuell oder durch ein vordefiniertes dreiteiliges Referenzset aus Linien, Punkten und Ebenen. Als nächstes bittet der OEM die Zulieferer, sich am Design Review zu beteiligen. Diese starten ihr VR-System (Powerwall, Cave, 3D-Desktop usw.) und verbinden ihre Session-Clients mit dem Session Manager. Die Clients werden über die aktive Session informiert und treten ihr bei. Daraufhin werden, den Zugriffsrechten der Teilnehmer entsprechend, die relevanten Bestandteile des Informationsmodells an die Clients gesendet und das Laden der VR-Szene initiiert. Nun erfolgt die gemeinsame Entwick-

lungsbewertung. Der OEM bestimmt die Lage des VR-Modells, setzt Teile transparent und überträgt diesen Visualisierungszustand anschließend an die beteiligten Systeme. Jedem Teilnehmer ist es weiterhin selbst überlassen, seine Sicht (Kameraposition) auf das Modell einzustellen. Dies erfolgt über die Verwendung der systemeigenen Funktionen zum Zoomen oder Drehen und nicht durch vorgegebene Kamerapositionen. Im Ergebnis der Prüfung ergibt sich, dass entweder am Zylinderkopf oder am Motorgehäuse Änderungen der Gestalt notwendig sind. Die im PDM gespeicherten Metainformationen zum Freigabestatus der einzelnen Komponenten bilden die Grundlage für die Entscheidung, welche Komponente geändert werden soll. Mittels Fehlfarbandarstellung ist im VR die Möglichkeit gegeben, PDM-Metainformationen zu visualisieren (Abb. 8).

Der Session Manager aktiviert die Änderung der Darstellung in den angeschlossenen VR-Clients. Die Fehlfarbandarstellung zeigt, dass der Zylinderkopf bereits freigegeben ist. Um eine neue Version und den damit verbundenen Freigabedurchlauf zu vermeiden, wird die Entscheidung getroffen, dass das in Arbeit befindliche Motorgehäuse geändert wird. Für die Initiierung des Änderungsauftrages werden wiederum mittels Fehlfarbandarstellung PDM-Metainformationen angezeigt, um den verantwortlichen Bearbeiter zu identifizieren. Dieser schließt sich mit seinem CAD-Arbeitsplatz der Session an, indem er sein CAD-System startet und seinen CAD-Client mit dem Session-Manager verbindet (Abb. 9).

Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau selektiert der Projektleiter in seinem VR-System das zu ändernde Motorgehäuse. Die Weitergabe des Änderungsauftrages erfolgt durch den Session Manager, der eine Dokumentnummer überträgt. Anhand der übermittelten Dokumentnummer ermittelt der CAD-Client das zugehörige CAD-Dokument im PDM, checkt diese Datei aus und lädt sie ins CAD-System. Das Kurbelgehäuse kann nun bearbeitet werden. Nach dem Anpassen des Kurbelgehäuses wird nur die geänderte Geometrie in der Kollaborationsplattform aktualisiert, ohne die komplette VR-Szene neu zu erstellen. Nach Abschluss aller Änderungen werden diese permanent im PDM gespeichert und die Session wird im Session Manager beendet.

Struktur der VRplm-Plattform

VRplm stellt eine stabile und gleichzeitig flexibel erweiterbare Architektur dar. Um den sehr unterschiedlichen Anforderungen an den VR-Einsatz gerecht werden zu können, steht VRplm in drei Ausbaustufen zur Verfügung.

VRplm-Visual als Kernmodul bietet den konsistenten Zugriff vom VR-System auf die PLM-Lösung und ermöglicht das einfache Laden von Parts und Assemblies in VR-Präsentationen. Produktmodelle mit mehreren tausend Komponenten können mit guter Performanz bearbeitet und visualisiert werden. Die Austauschformate werden automatisiert in einem batch-Prozess bereitgestellt. Die Echtzeit-Änderung von Komponenten ist möglich. Durch die Verwaltung und Nutzung von Materialshadern bietet sich die Lösung vor allem für Design Reviews sowie den Einsatz bei der Erstellung von Marketing- und Vertriebsunterlagen an.

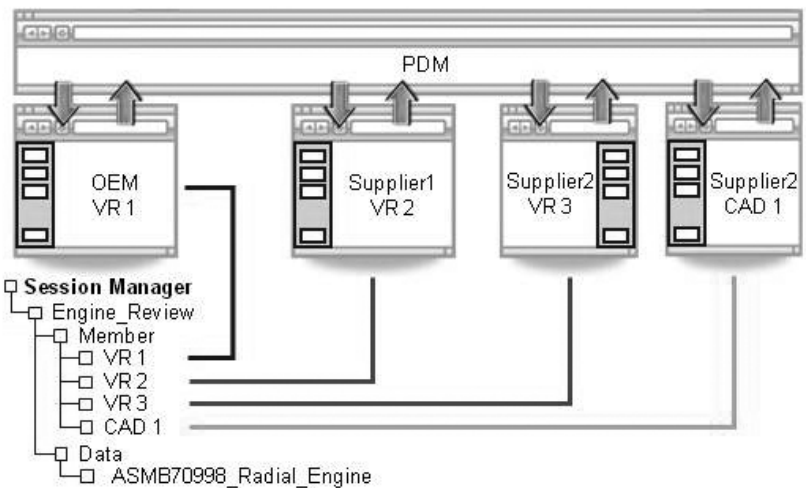


Abbildung 9: Durchführung einer Designänderung

VRplm-Engineering erweitert die Basislösung durch direkte Interaktion zwischen VR- und CAD-Systemen sowie die Integration nicht-geometrischer PDM-Daten in der VR-Präsentation. Die Einbindung von Simulationsdaten ist gleichfalls möglich.

VRplm-Collaboration stellt weitere Funktionen zur Verfügung, die die Festlegung von Änderungsumgebungen sowie die Interaktion zwischen internen und externen Bearbeitern erlauben.

VRplm greift auf Funktionen der Integrationsplattform **J2xPLM®** der Firma xPLM Solution GmbH (vgl. <http://xplm.com/>) zurück. Diese stellt Standardschnittstellen zu einer Vielzahl von CAD- und PDM-Systemen bereit und ermöglicht dadurch eine einfache Erweiterung der Lösung. Derzeit steht VRplm mit einer SAP/PLM-Integration zur Verfügung. Plug-Ins existieren auf CAD-Seite für CATIA und SolidWorks. Auf VR-Seite wurden bisher für eon-Studio, IC:IDO und VRED Integrationen entwickelt. Erweiterungen für weitere CAD- und PDM-Systeme sind vorbereitet und werden je nach Anforderung bereitgestellt. Die Kollaborationsplattform ist mit unterschiedlichen VR-Systemen bei zwei größeren deutschen Maschinenbauunternehmen installiert.

Literaturverzeichnis

- Attwell, G. 2008: Personal Learning Environments - a new learning concept or a new learning system. In: Hornung-Prähauser, V. / Luckmann, M. / Kalz, M. (eds.) Selbstorganisiertes Lernen im Internet – Einblick in die Landschaft der web-basierten Bildungsinnovationen, 64-68
- Erenli, K. 2009: Projektmanagement in virtuellen Welten, Ist das „Büro von morgen“ von überall erreichbar? In: Wirtschaft und Management Band 10, FH bfi Wien, 35–58
- Graf, H., Brunetti, G., Stork, A. (2002): A Methodology Supporting the Preparation of 3D-CAD Data for Design Reviews in VR. In: Marjanovic, Dorian (Hrsg): Proceedings of the 7th International Design Conference (DESIGN), 489–495, Dubrovnik, Croatia
- IEC (2005): Design Review. In: IEC 61160
- Jeong, B., Leigh, J., Johnson, A., Renambot, L., Brown, M., Jagodic, R., Nam, S., Hur, H. (2010): Ultrascale Collaborative Visualization Using a Display-Rich Global Cyber-infrastructure. In: IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 30, No. 3, 71–83

- Jin, L., Wen, Z., Oraifige, I.A. (2007): Distributed VR for Collaborative Design and Manufacturing. In: 11th IEEE International Conference on Information Visualization, 792–797
- Katicic J., Bachvarov, A., Yordanov Y. (2009): Collaborative Engineering in common virtual reality environments. In: 18. Wissenschaftlich Technische Konferenz ADP Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria
- Katzenbach, A., Haasis, S. (2008): Virtual and Mixed Reality in a SOA based engineering environment. In: Design Synthesis, CIRP Design Conference, Enschede, Netherlands
- Kim, S.R., Weissmann, D. (2006): Middleware-based Integration of Multiple CAD and PDM Systems into Virtual Reality Environment. In: Computer-Aided Design & Applications, Vol. 3, No. 5, 547–556
- Krüger, A., Witte, K., von Specht, E., Vajna, S., Edelmann Nusser, J. (2010): Verification of the effectiveness of the Integrated Product Development paradigm for the development of sports equipment, a case study. In: Procedia engineering . Elsevier, vol. 2.2010, 2575–2580
- Leigh, J., Johnson, A.E., DeFanti, T.A. (1997): Issues in the design of a flexible distributed architecture for supporting persistence and interoperability in collaborative virtual environments. In: Conference on High Performance Networking and Computing Proceedings of the 1997 ACM/IEEE conference on Supercomputing, 1–14
- Neugebauer, R., Wittstock, V., Glänzel, J., Schumann, M., Meyer, A. (2010): Adaptive Finite-Element-Methode zur Lösung spezieller Auslegungsprobleme des Maschinenbaus und zur Erweiterung von Virtual Reality-Technologien. In: 9. Paderborner Workshop AR/VR in der Produktentstehung, 79–95
- Paul, R., Anand, S. (2010): A Translator For Converting CAD Models To Second Life. In: ASME 30th Computers and Information in Engineering Conference (CIE), Montreal
- Pavlik, R.A., Vance, J.M. (2011): Expanding haptic workspace for coupled-object manipulation. In: ASME WINVR 2011, Milan, Italy
- Peinado, M., Meziat, D., Maupu, D., Raunhardt, D., Thalmann, D., Boulic, R. (2009): Full-body Avatar Control with Environment Awareness. In: IEEE CGA, 29 (3)
- Roßmann, J., Schluse, M., Hoppen, M., Waspe, R. (2010): Gls-Based Virtual Testbeds and their Application to Forestry and City Simulation. In: ASME WINVR 2010, Ames, Iowa, USA
- Song, I.H., Kim, K.D., Chung, S.C. (2006): An XML-Based Digital Mock-up System for Heterogenous Assembly. In: ASPE Annual Meeting, 455–458
- Stark, R., Israel, J. H., Wöhler, T. (2010): Towards hybrid modelling environments - Merging desktop-CAD and virtual reality-technologies. In: CIRP Annals, Manufacturing Technology, 179–182
- Stelzer, H.R. 2010: Virtual Reality based Engineering Collaboration as part of the Product Life-cycle Management. In: ASME 30th Computers and Information in Engineering Conference (CIE), Montreal, Canada

- Stelzer, H.R., Sembdner, P., Steger, W. (2010): Verknüpfung komplexer und heterogener Baugruppenmodelle in VR. In: 9. Paderborner Workshop AR/VR in der Produktentstehung, 24–36
- Stork, A., Wagner, M., Schneider, P., Hinnerichs, A., Bruder, T. (2010): Functional DMU, Co-Simulation mechatronischer Systeme in einem DMU-Umfeld. In: ProduktDaten Journal 1, 44–48
- Wang, Q.-H., Li, J.-R., Wu, B.-L., Zhang, X.-M. (2010): Live Parametric Design modifications in CAD-linked virtual environment. In: International Journal of Manufacturing Technology, Vol. 50, No. 9-12, 859–869, Springer-Verlag London Limited 2010, published online

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer
 Dr.-Ing. Wolfgang Steger
 Dipl.-Ing. Dirk Petermann
 Technische Universität Dresden
 Fakultät Maschinenwesen
 Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD
 01062 Dresden
www.tu-dresden.de

Globale Collaboration im Kontext mit PLM

Einleitung

Bedingt durch eine geforderte, lokale Präsenz eines global agierenden Unternehmens gegenüber weltweiten Kunden sowie durch global verteiltes Engineering, Produktion und Service sind Unternehmen zunehmend in der Pflicht, sich global zu positionieren. Auch die Verlagerung von Engineeringaufgaben zu externen Zulieferern und Partnern erfordern organisatorische sowie prozesstechnische Maßnahmen, die durch eine entsprechende informationstechnische Unterstützung flankiert werden müssen. Für diese Unterstützung können sogenannte PLM-Systemumgebungen genutzt werden, die sich auf PDM-Systemen abstützen.

Die Bearbeitung eines Kundenauftrages ist heutzutage durch eine Vielzahl von Partner gekennzeichnet. Diese reichen von internen Engineering-Abteilungen über Zulieferer bis hin zu externen Engineering-Dienstleistern. Vermehrt wird auch der Kunde in den unternehmensinternen Entwicklungs- und Projektabwicklungsprozess eingebunden (Schulte 2008). Hieraus resultiert ein stetig steigender Bedarf an Abstimmung, Informationsaustausch und Prozesssteuerung zwischen allen an einem Kundenauftrag beteiligten Parteien. Die Folge ist ein komplexes und weit verzweigtes Beziehungsgeflecht zwischen den verschiedenen Partnern (siehe Abbildung 1). Insbesondere der Datenaustausch mit unternehmensexternen Partnern stellt, getrieben durch zunehmende Plagiat- und IPR-Schutz-Risiken, eine besondere Herausforderung dar.

Unternehmensintern ist dafür Sorge zu tragen, dass Produktinformationen weltweit stets in der richtigen Qualität und zum richtigen Zeitpunkt bereit stehen. Dieser Gedanke wird in dem Begriff Informationslogistik gebündelt. Dies gilt für ein verteiltes Engineering, eine in angeschlossene Standorte verlagerte Produktion sowie für den regionalen Produkt-Service, der schnell und flexibel auf Kundenanfragen reagieren muss.

Mechanismen für den externen Datenaustausch bzw. die kooperative Zusammenarbeit mit Zulieferern, Engineering-Partnern und Kunden sowie die unternehmensinterne Informationsverteilung wird im Folgenden unter »Global Collaboration« zusammengefasst. Ziel von Global Collaboration ist die Schaffung von Rahmenbedingungen zur flexiblen, globalen und zeitnahen Verteilung von Engineeringaufgaben, -prozessen und -daten.

Collaboration-Szenarien

Die detaillierte Betrachtung des oben geschilderten Beziehungsgeflechtes lässt fünf grundsätzliche Collaboration-Szenarien erkennen (siehe Abbildung 2).

Das erste Szenario beschreibt die interne Collaboration, die dadurch gekennzeichnet ist, dass eine Zusammenarbeit innerhalb des Unternehmens erfolgt. Dabei kann es sich sowohl um am Standort angesiedelte Abteilungen als auch um Abteilungen handeln, die an global verteilten Niederlassungen beheimatet sind. Die interne Collaboration erstreckt sich zum einen über einzelne Produktlinien, zum anderen über alle Produktlebenszyklusphasen bis hin zum Service. Insbesondere die flexible, zeitnahe Verlagerung der Montage und Komplettierungsarbeiten von Maschinen zwischen Standorten gewinnt zunehmend an Bedeutung. Kennzeichnend für diese Form der Zusammenarbeit sind der Datenaustausch sowie die Prozessintegration innerhalb des Unternehmens basierend auf einer gemeinsamen PDM- und ERP-Systemumgebung. Das zweite Szenario beinhaltet die Anbindung der Produktionsstätten in den Regionalgesellschaften. Ziel dieser Anbindung ist die Verlagerung der Produktion oder Montage aus den Stammhäusern

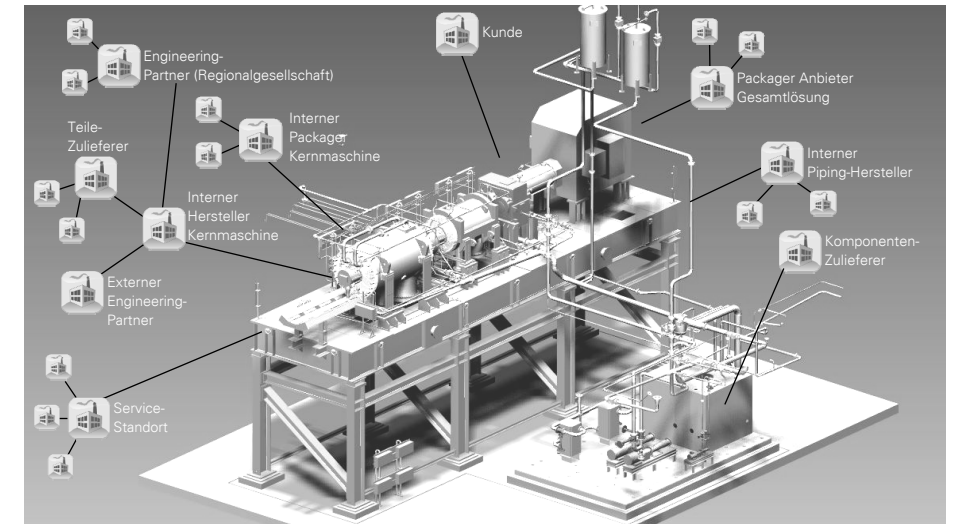


Abbildung 1: Beispiel für interne und externe Collaboration-Partner

heraus in die Regionen. Die lokale Kundennähe vor Ort ist hierbei neben ökonomischen Gesichtspunkten entscheidend. Dieses Szenario erfordert eine Bereitstellung von Engineering-Daten aus den Stammdatensystemen (PDM und teilweise ERP) in den Regionalgesellschaften.

Die Anbindung von assoziierten Partnern (Engineering-Dienstleistern) ist Gegenstand des dritten Szenarios. Diese Partner zeichnen sich durch hohe Vertrauenswürdigkeit sowie enge Bindung an das eigene Unternehmen aus. Nur bedingte IPR-Schutz-Notwendigkeit und die enge Integration der Partner in die unternehmenseigenen Prozesse erlauben – verbunden mit definierten Limitierungen bei der Datenzugänglichkeit – einen Zugang in die Stammdatensysteme. Kennzeichnend für dieses Szenario ist die Anforderung, externen Partnern über bestimmte technische Mechanismen Zugang zum unternehmensinternen, physikalischen Netzwerk zu ermöglichen.

Das vierte Szenario beschreibt die Collaboration unternehmensinterner Bereiche mit unternehmensexternen Zulieferern, Partnern, Engineering-Dienstleistern und Kunden. Zu den externen Dienst-

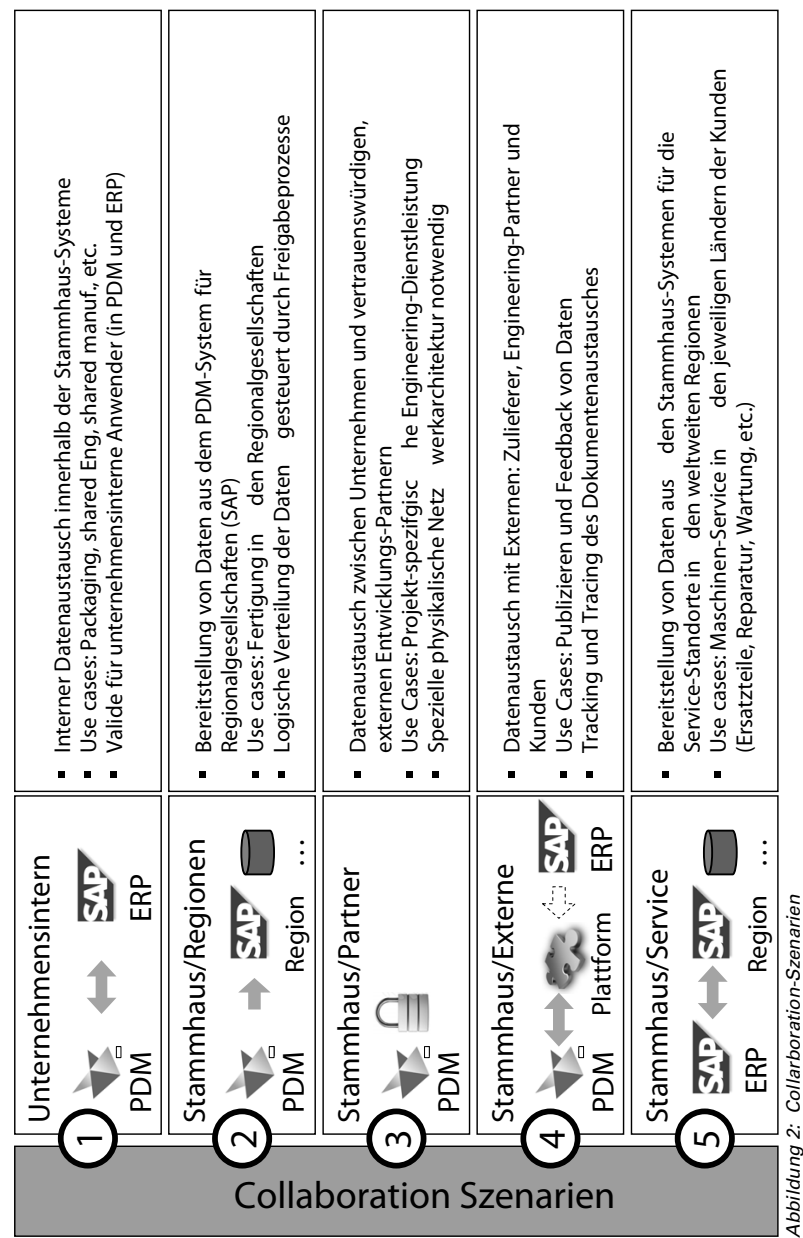


Abbildung 2: Collaboration-Szenarien

leisten können zum Beispiel externe Entwicklungs-Büros oder externe Fertiger gezählt werden. Bedingt durch unterschiedliche PLM-Prozesse und -Systemwelten bezogen auf das Unternehmen und die externen Collaboration-Partner sind organisatorische und prozesstechnische Maßnahmen sowie entsprechende IT-Lösungen erforderlich. Hierzu bedarf es global verfügbarer Konzepte und IT-Werkzeuge für die externe Collaboration, welche in die unternehmenseigene PLM-Umgebung integriert werden können.

Service-orientierte Forderungen nimmt das fünfte Collaboration-Szenario auf. Schnelle Reaktionszeiten auf Kundenanfragen im Servicefall, lokale Kundennähe sowie vollständige Datenverfügbarkeit sind für eine hohe Servicequalität ausschlaggebend. Service-Leistungen zeichnen sich zum einen vertraglich festgelegte periodische Maßnahmen (z. B. fest definierte Wartungs-Intervalle), zum anderen durch Ad-Hoc-Prozesse (z. B. in Reparatur- und Ersatzteilprozesse), welche zeitnah bedient werden müssen, aus. Da Service-relevante Informationen überwiegend im ERP-System der Stammhäuser als »AS-Built«- und »As-Maintained«-Daten gepflegt werden, müssen diese den weltweiten Service-Standorten zugänglich sein. Hierzu müssen aus dem ERP-System des Stammhauses Daten an die regionalen ERP-Systeme ausgeleitet werden, die den Ersatzteil-, Reparatur- und Wartungsprozess (durch spezifische Serviceinformationen angereichert) unterstützen. Ein Beispiel für spezifische Serviceinformationen sind Daten über den aktuellen Bauszustand der Anlage (Stark et al. 2011).

Collaboration-Anforderungen an PLM

Die oben beschriebenen Collaboration-Szenarien und deren Eigenschaften müssen sich in einem unternehmensübergreifenden Collaboration-Konzept widerspiegeln und nahtlos in die unternehmenseigene PLM-Umgebung integriert werden. Die PLM-Umgebung beinhaltet dabei nicht nur Engineering-spezifische PDM-Systeme sondern ebenso ERP-Systeme, um einer gesamten Produkt-Lifecycle-Betrachtung gerecht zu werden (Abramovici & Schulte 2007).

IPR-Schutz

Grundvoraussetzung für die prozess- sowie informationstechnische Realisierung des Collaboration-Gedankens ist der Schutz des geistigen Eigentums (IPR - Intellectual Property Rights). Hierzu bedarf es einer genauen Definition der Collaboration-Beteiligten, deren Rollen und Rechten. Dies beinhaltet sowohl unternehmensexterne als auch -interne Collaboration-Partner. Die Einbeziehung weltweit verteilter Unternehmensstandorte, Regionalgesellschaften und Servicestandorte erfordert dabei besonderer Berücksichtigung, bedingt durch unterschiedliche, landesspezifische gesetzliche Vorgaben, Kulturen und Informationssicherheitsverständnisse. Hierzu ist ein Klassifizierungsschema notwendig, anhand dessen den Collaboration-Beteiligten eindeutig Datenzugriffsrechte und Prozessrollen zugewiesen werden können.

Dateneigentümerschaft

Hervorgerufen durch unterschiedlichste Collaboration-Szenarien ergibt sich neben der Informationssicherheit die Frage der Dateneigentümerschaft und -verantwortung. Einerseits ist dabei der Anspruch von Zulieferern oder Partner zu berücksichtigen, die Hoheit für ihre Daten zu halten. Andererseits darf bei der Verwendung von Zuliefererdaten der unternehmenseigene Prozess nicht gehemmt werden. Die Regelung der Datenverantwortung folgt dem spezifischen Kontext eines konkreten, kollaborativen Engineering-Anwendungsfalles und kann daher nicht pauschaliert werden. Informationstechnisch stellt dies eine besondere Herausforderung an die Realisierung innerhalb der PLM-Systemumgebung dar. Weiterhin sind Haftungsfragen gegenüber dem Endkunden bei differierenden Produkt- und Dateneigentümerschaften exakt zu definieren.

Interne Daten- und Prozessintegration

Bezogen auf unternehmensinterne Datenaustauschprozesse zwischen Stammhäusern und regionalen Standorten ergibt sich eine weiterführende Komplexität, da die Datenhoheit zumeist den Stammhäusern überlassen ist, die Verwendung der Daten aber häufig, z. B. im Service-Fall, in den regionalen Standorten stattfindet. Notwendige Produktdatenänderungen, Neuanlage von Daten und Auftragsabwicklungsdaten in den regionalen Standorten müs-

sen daher intelligent und möglichst automatisiert zwischen den IT-Systemen der Stammhäuser und Regionen ausgetauscht bzw. verteilt werden. Im Gegenzug ist eine Rückführung und teilweise Konsolidierung verteilter Informationen notwendig, um die Konsistenz und Aktualität von Produktstrukturen in den Stammhäusern sicherzustellen. Der permanenten Datenverfügbarkeit als auch einer sehr guten Datenqualität in Bezug auf Vollständigkeit und Genauigkeit kommt besondere Bedeutung zu, da diese für die Qualität von Service-Leistungen, Produktionsverlagerungen und »Shared Engineering« ausschlaggebend sind. Dies erfordert eine enge Integration der Collaboration-Prozesse und Datenaustauschmechanismen in die PLM-Prozesse und -Systemfunktionalitäten, wie beispielsweise Freigabe- oder Änderungsabläufe.

Weiterhin ist ein gemeinsames Datenmodell zu definieren, welches sowohl den Datenaustausch innerhalb der Stammhäuser als auch mit den regionalen verteilten PDM- und ERP-Systemen bedient. Unterschiedliche Teildatenmodelle bedingt durch spezifische Anforderungen der unterschiedlichen Standorte und Landesgesellschaften sind gegebenenfalls auf ein gemeinsames Datenmodell zu mappen.

Datenaustausch mit Externen

Der Datenaustausch mit externen Zulieferern, Partnern und Kunden erfordert u.a. aufgrund der bereits geschilderten IPR-Schutzanforderungen eine Entkopplung der Kommunikationsschnittstelle zu Externen von der unternehmensinternen physikalischen PDM- und ERP-Systemlandschaft. Nur so kann ein dauerhafter Datenschutz gegenüber unternehmensexternen Parteien sichergestellt werden. Diese Kommunikationsschnittstelle muss einen bidirektionalen Informationsaustausch zwischen dem Unternehmen und den externen Collaboration-Parteien erlauben und den Austausch von selektiven Teilstammdaten, Dokumenten und Struktureinformationen (z. B. Stücklisteninformationen) unterstützen.

Die Bereitstellung von Daten für die externe Verwendung sollte dabei direkt aus dem PDM- bzw. ERP-System heraus in diese Kommunikationsschnittstelle erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass bereitgestellte Daten eindeutig für einen externen Empfänger

adressiert sind und nicht von unterschiedlichen externen Collaboration-Partnern untereinander eingesehen werden können. Zudem sind integrative Funktionen notwendig, um wiederum Daten der Zulieferer und Engineering-Partner aus der Kommunikationsschnittstelle in die Stammdatensysteme zurückführen zu können.

Der Datenaustausch verläuft häufig in einer Art iterativer Dreiecksbeziehung zwischen Zulieferer, eigenem Unternehmen und dem Kunden: so prüft beispielsweise der Kunde Zulieferer-Dokumente, die durch das eigene Unternehmen dem Kunden bereitgestellt werden. Etwaige Änderungswünsche des Kunden werden dann an den Zulieferer in Dokumentenform weitergeleitet, beim Zulieferer überarbeitet und wiederum dem eigenen Unternehmen übermittelt. Da diese Prozesse zunehmend an vertragliche Terminvereinbarungen und damit direkt an Kosten gekoppelt sind, müssen diese Austauschprozesse durchgängig verfolgbar sein (»Wer hat was warum an wen zu welchem Zeitpunkt geliefert?«).

Lösungs-Topologien für Global Collaboration

Die geschilderten Collaboration-Szenarien und Anforderungen an PLM beinhalten die Einbeziehung verschiedenster PDM- und ERP-Systeme, sowohl die Systeme der Stammdatenhäuser als auch die der Regionalgesellschaften und teilweise die externen Collaboration-Partner. Damit einher geht die Frage, welches System führend bei der Verwaltung verteilter und teilweise replizierter Datenbestände ist. Diese Frage muss sowohl in organisatorischer Hinsicht bezogen auf die Dateneigentümerschaft als auch hinsichtlich der zugrundeliegenden IT-Systemarchitektur erörtert werden. Zur Unterstützung verteilter, kollaborativer Engineering-Szenarien existieren unterschiedlichste PLM-Architekturansätze. Für die Systemarchitektur einer Collaboration-Umgebung bieten sich aus IT-Sicht drei Integrationstopologien an (siehe Abbildung 3).

Peer-to-Peer

Bei der Peer-to-Peer-Topologie werden die einzelnen Anwendungen direkt miteinander verbunden, weshalb diese Topologie nur bei wenigen Systemen mit wenigen Schnittstellen sinnvoll einsetzbar

ist. Ein Austausch der Systeme ist aufgrund der vielen direkten Verbindungen nur mit hohem Aufwand realisierbar. Der Betrieb einer Peer-to-Peer-Architektur ist mit hohen Kosten verbunden, auch wenn die anfänglichen Implementierungskosten vergleichsweise niedrig ausfallen. Generell kann eine solche Lösung als schnell umsetzbar betrachtet werden, stellt jedoch keine Grundlage für moderne Middleware-Lösungen, Service-orientierte Architekturen (SOA) oder Portale dar.

Hub & Spoke

Der »Hub & Spoke«-Ansatz ist durch einen zentralen Hub als Datendrehzscheibe charakterisiert. Diese zweite Lösung ist besonders für n:m-Verbindungen mit komplexen Datenverteilungsmechanismen geeignet. Bei einem hohen Datentransfervolumen kann es allerdings zu Performance-Einbußen kommen, wenn keine entsprechende systemtechnische Skalierbarkeit vorgesehen ist. Die Austauschbarkeit einzelner Systeme ist mit geringem Aufwand möglich, wodurch

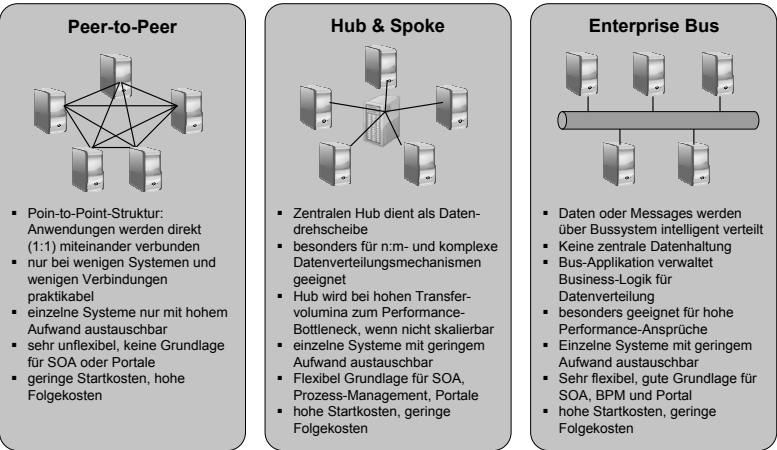


Abbildung 3: Integrationstopologien für Global Collaboration

Folgekosten im Betrieb reduziert werden können. Die Startkosten dagegen sind jedoch hoch, da eine zentrale Serverkomponente mit eigenen Datenverwaltungsmechanismen erforderlich ist. »Hub&Spoke« stellen eine flexible Grundlage für SOA, Prozessmanagement und Portale dar.

Enterprise Bus

Dem Anspruch der Unterstützung einer verteilten Collaboration-Systemarchitektur wird am ehesten der Enterprise-Bus-Ansatz gerecht. Daten werden nicht zwingend zentral, sondern dezentral verwaltet und nur im Bedarfsfall über einen Bus intelligent verteilt. Die Verknüpfung von Informationen und die Datenverteilung folgen dabei einer definierten Business-Prozess-Logik, die in einer Bus-Applikation abgebildet ist. Enterprise-Bus-Architekturen sind besonders für hohe Performanceansprüche geeignet und erlauben einen einfachen und aufwandsarmen Austausch einzelner an den Bus angeschlossener Systeme. Dies ermöglicht relative geringe Betriebskosten, auch wenn die anfänglichen Implementierungskosten hervorgerufen durch die notwendige Einrichtung der Bus-Architektur und der zugehörigen Prozesslogik vergleichsweise hoch ausfallen. Der Bus-Ansatz bildet die klassische und flexible Grundlage für Service-orientierte Architekturen (SOA), Portale sowie Business Process Management (BPM) und ermöglicht den Zugriff auf verteilte Daten aus den an den Bus angeschlossenen Applikationen heraus.

Global Collaboration Konzept

Zur Definition der Collaboration-Lösung wurden die unterschiedlichen Collaboration-Szenarien detailliert analysiert und zusammen mit den Collaboration-Anforderungen mit den zur Verfügung stehenden IT-Topologien abgeglichen. Hieraus resultieren zwei grundlegende Collaboration-Bereiche, die einer prozesstechnischen und informations-technischen Lösung bedürfen und in einem gemeinsamen Collaboration-Konzept münden (siehe Abbildung 4).

Zum einen beinhaltet dieses Konzept für den unternehmensinternen Datenaustausch und die Kopplung verteilter, unterschiedliche Standortprozesse eine Integrationslösung. Diese Integrationslösung

dient der intelligenten Verknüpfung und Zusammenführung von Daten verteilter, unterschiedlicher Datenmanagement-Systeme als auch dem Datenaustausch zwischen diesen Systemen. Zum anderen enthält das Collaboration-Konzept die Anbindung einer Collaboration-Plattform, um den bidirektionalen Datenaustausch mit externen Zulieferern, Dienstleistern und Kunden zu ermöglichen.

Collaboration innerhalb der Stammhäuser

Der einfache Datenaustausch und die Prozessintegration innerhalb der Stammhäuser wurden durch eine konsequente Reduzierung der Datenmanagementsysteme auf ein PDM- und ein ERP- System erreicht. Diese Systeme sowie deren Kopplung über eine Schnittstelle dienen dem reinen internen Datenaustausch innerhalb der Stammhausabteilungen, die in verschiedenen Lokalisationen angesiedelt sein können. Engineering-Daten werden direkt im gemeinsamen PDM-System durch unterschiedliche Abteilungen und verteilte Stammhausstandorte verwaltet. Diese Datenverwaltung umfasst das Anlegen, das Finden, das Ändern und das Freigeben von

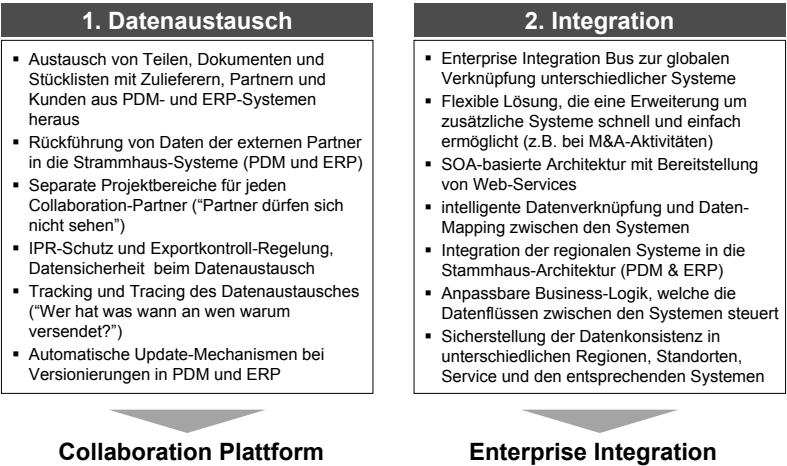


Abbildung 4: Grundlegende Collaboration-Bereiche

Produktinformationen. Das PDM-System unterstützt mittels entsprechenden Prozessen und Funktionen diese Aufgaben (Eigner & Stelzer 2009). Die Engineering-Daten werden in Form von Teilstamminformationen, Dokumenten und werksneutralen Engineering-Stücklisten an das ERP-System übergeben und dort zusammen mit angereicherten, fertigungsbezogenen Daten in werksbezogenen Sichten verwaltet bzw. den Logistikprozessen wie Beschaffung, Fertigung und Versand zugeführt.

Enterprise Bus als Integrationslösung

Die Bereitstellung der Daten aus dem beiden PDM- und ERP-Stammhaussystemen für die Anwendung (z. B. Engineering, Fertigung, Montage oder Service) in den Regionalgesellschaften basiert auf dem Einsatz eines Enterprise Bus (vergleiche Abbildung 5). Ziel dieses Integrations-Bus ist die intelligente Verteilung und Rückführung von Daten aus dem beiden Stammhaussystemen in die PDM- und ERP-Systeme der Regionen. Die Verwendung einer Bus-Lösung folgt dabei der primären Forderung der Vermeidung von Direktschnittstellen bei gleichzeitiger Gewährleistung einer Datenkonsistenz. Die Bus-Lösung baut auf einer SOA-Architektur auf und stellt Web-Services für die Anbindung der unterschiedlichen Systeme und deren Kommunikation untereinander zur Verfügung. Ein gemeinsames Enterprise-Informationsmodell sorgt für einen vereinfachten Datenaustausch oder im Falle von unterschiedlichen Teildatenmodellen in den angeschlossenen Systemen für ein eindeutiges Mapping zur Übersetzung auszutauschender Daten. Eine im Enterprise Bus hinterlegte und verwaltete Business-Prozess-Logik kontrolliert die Verknüpfung der verteilten Datenbestände und steuert intelligent und automatisiert den Datenaustausch zwischen den angebundenen Systemen. Dies geschieht in Verbindung mit im PDM- bzw. ERP-System vorgehaltenen Prozessen, wie beispielsweise Freigabeprozessen, welche bei Datenfreigaben entsprechende Informationsimpulse zur Datenverteilung an die Bus-Prozess-Logik weitergeben.

Neben der beschriebenen automatisierten Datenaustauschsteuerung unterstützt die verwendete Bus-Technologie auch die Benutzerinitiierten Verteilung von Daten. Der Anstoß für eine Verteilung von Daten über den Enterprise Bus erfolgt in diesem Falle nicht durch

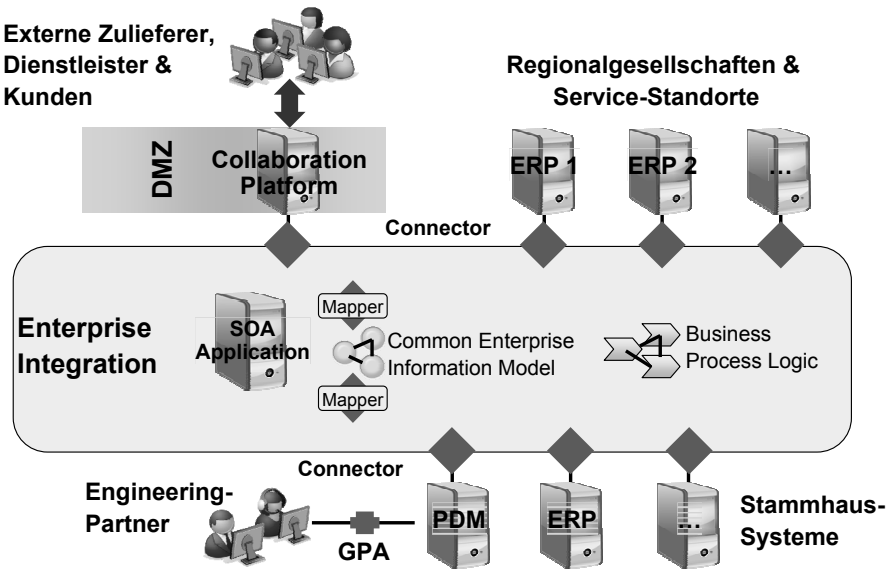


Abbildung 5: IT-Architekturkonzept für Global Collaboration

einen Freigabe- oder Änderungsprozess, sondern ad-hoc durch spezifische Anwender-Interaktionen im PDM- oder ERP-System. So können Daten sehr flexibel und im Kontext verschiedenster Anwendungsfälle verteilt werden, wobei die Business-Prozess-Logik weiterhin die Datenverteilungs-Steuerung vorhält. Auf diese Weise können zuvor festgelegte Prozesse wie verteiltes Engineering oder Produktionsverlagerungen als auch Ad-hoc-Service-Prozesse wie z.B. Reparatur-Prozesse bedient werden.

Collaboration-Plattform für den externen Datenaustausch

Der zweite Teil des Collaboration-Konzeptes besteht aus einer Collaboration-Plattform für den Datenaustausch zwischen dem eigenen Unternehmen und externen Zulieferern, Engineering-Partnern und Kunden. Diese Collaboration-Plattform befindet sich als eigenständige Applikation in einer »Demilitarisierte Zone« (DMZ) und ist damit physikalisch vom unternehmenseigenen Netzwerk, von den PDM- und ERP-System mit ihren sensiblen Daten entkoppelt und diese

somit vor unbefugtem Zugriff durch Externe geschützt. Die Versorgung mit Daten aus dem PDM- und ERP-System heraus erfolgt wiederum über den Enterprise Bus. Auch die Zusammenführung von Daten aus den Stammhaus-Systemen heraus in die Collaboration-Plattform wird über die Business-Prozess-Logik gesteuert.

Die Bereitstellung von Daten in die Collaboration-Plattform erfolgt direkt aus den PDM- und ERP-Applikationen heraus. Selektiv werden Teilestamminformationen, Dokumente und Stücklisten ausgewählt, an einen definierten externen Empfänger adressiert und in die Collaboration-Plattform repliziert. Die Replikation gewährleistet, dass die weitere Verwendung der Daten in der Collaboration Plattform und im weiteren Prozessverlauf beim externen Empfänger die originalen Daten im PDM- und ERP-Quellsystem nicht beeinflusst. Daten-Änderungen im Quellsystem werden automatisch erkannt und durch einen übergreifenden Änderungsdienst der Collaboration-Plattform und damit dem externen Verwender kenntlich gemacht.

Der externe Empfänger nutzt die Collaboration-Plattform sowohl zum Empfang der durch das Unternehmen bereitgestellten Daten als auch für die Rücklieferung eigener oder geänderter Daten an das Unternehmen. Dies beinhaltet z.B. die Vervollständigung von Stücklisten, das Erstellen von technischen Zeichnungen basierend auf bereitgestellten Spezifikationen oder das Ändern von Dokumenten. Die Rückführung dieser Daten aus der Collaboration-Plattform in die PDM-/ERP-Stammhaussysteme folgt einem definierten Freigabe-Prozess, der eine Preview-Funktion der zurückzuführenden Daten bereithält. Auf diese Weise können die Rückführungsergebnisse im PDM- oder ERP-Systeme zuvor simuliert werden, um etwaige Daten- und Strukturfehler im Stammhaussystem zu vermeiden. Zusätzlich steuert dieser Prozess die PDM- und ERP-interne Versionskontrolle und Produktstrukturzusammensetzung.

Collaboration-Partner-Klassifizierung und Autorisierungskonzept

Der Zuordnung von Datenzugriffsrechten zu beteiligten Collaboration-Parteien kommt unter IPR-Schutzaspekten besondere Bedeutung zu. Hierzu wurde ein Klassifizierungsschema entwickelt, welches eine exakte Einordnung von Collaboration-Parteien basierend Klas-

sifizierungskriterien und ihrer Rolle in verschiedenen Collaboration-Szenarien ermöglicht. Diese Klassifizierung ermöglicht die genaue Bestimmung der notwendigen Rollen und Rechte, sowohl auf systemunabhängiger Ebene als auch systemspezifisch für unterschiedliche Applikationen. Die Einordnung der einzelnen Collaboration-Parteien ist in Abbildung 6 dargestellt. Die zwei entscheidenden Kriterien für eine Einordnung der Partner sind:

- Anteil der Beteiligung durch das Unternehmen an dem Partner
- Vertrauenswürdigkeit des einzubindenden Partners

Der letzt genannte Punkt spiegelt die Erfahrungen mit dem Partner, den Wissenstand über die Leistungsfähigkeit des Partners und die Bindung zum Auftraggeber wider.

»Interne Partner« haben freien Zugang zu den internen Stammhaus-systemen, Der Datenaustausch erfolgt über das interne PDM- bzw.

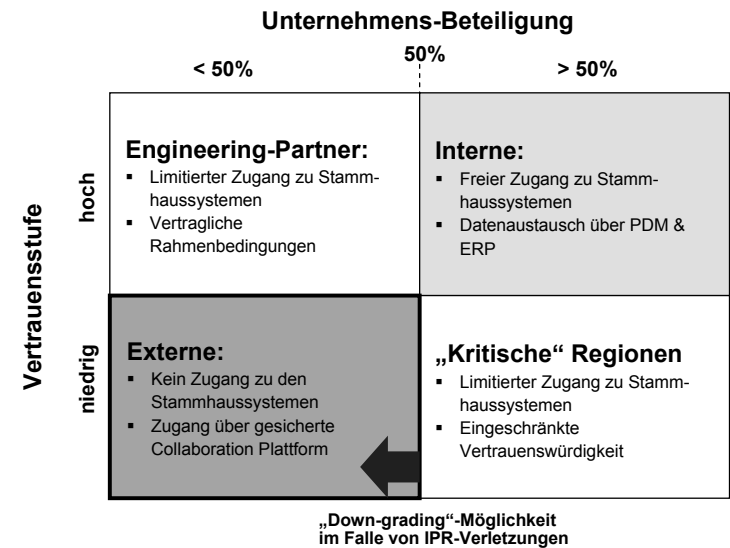


Abbildung 6: Klassifizierung der Collaboration-Partner zur Datenzugriffssteuerung

ERP-System. Vertrauenswürdige externe »Engineering-Partner« erhalten limitierten Zugang zu ausgewählten Datenbereichen der Stammdatensysteme, indem sie über einen Geschäftspartneranschluss (GPA, vergleiche Abbildung 4) in das unternehmenseigene, physikalische Netzwerk eingebunden werden. »Kritische Regionen« sind zwar aufgrund hoher Unternehmensbeteiligung organisatorisch als intern zu betrachten, erhalten jedoch bedingt durch Unsicherheiten bei der Einhaltung des IPR-Schutzes ebenfalls nur einen limitierten Zugang zu den Daten der Stammdatensysteme. Zudem kann der Datenzugriff im Falle von IPR-Verletzungen vollständig gesperrt werden und der Partner über die Collaboration-Plattform angebunden werden. Der Datenaustausch mit »Externen« erfolgt ausschließlich über die Collaboration Plattform.

Die beschriebene Limitierung bei den Datenzugriffsrechten wird über unterschiedliche Mechanismen eines Authentifizierungssystems gesteuert. Zu diesen Mechanismen zählen u.a. die Berechtigungsgruppen in den PDM- und ERP-Systemen, datenobjektbezogene Zugriffsbeschränkungen, Prozessrollen im Collaboration-Kontext und die Definition von expliziten Projektbereichen. Diese Projektbereiche ermöglichen eindeutige Zuordnungen von Daten und Zugriffsberechtigten. Das Authentifizierungssystem erstreckt sich übergreifend auf das PDM- und ERP-System sowie die oben dargestellte Collaboration-Lösung.

Zusammenfassung

Der Gedanke der Globalisierung einerseits und die Forderung nach verstärkter Berücksichtigung nach »local content« andererseits fordern die Unternehmen zur Realisierung einer globalen Zusammenarbeit auf. Diese reicht von der Einbindung verschiedenster Partner sowohl in den ganzheitlichen Datenaustausch zwischen diesen als auch bis hin in die Integration in die eigenen Prozesse und Tools. Dazu werden sogenannte PDM- und ERP-Systeme eingesetzt, die die verschiedenen Collaboration-Szenarien informationstechnisch unterstützen.

Die Verwendung der flexible Enterprise-Bus-Technologie schafft elementare Voraussetzungen, um zukünftige, zusätzliche PDM- oder ERP-Systeme, z.B. im Falle von Merger- & Acquisition-Aktivitäten, schnell und einfach in die unternehmenseigene IT-Systemumgebung einbinden zu können.

Im Kontext mit der globalen Zusammenarbeit ist der Aspekt des Schutzes des geistigen Eigentums zu nennen, der besonders zu beachten ist. Dazu ist ein entsprechendes Zugriffsmanagement für die einzelnen Collaboration-Partner festzulegen. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass zum einem keine Dateninkonsistenzen zwischen den beteiligten System auftreten und zum anderen Fragen der Organisationsanpassungen nicht vernachlässigt werden.

Literatur

- Eigner, M.; Stelzer, R. 2009: Product-Lifecycle-Management.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Stark, R.; Kreis, J.; Müller, P.; Muschiol, M. 2011:
PLM im Kontext des Dampfturbine-Service. in: ZWF 106, 11/2011
- Schulte, S. 2008: Customer Centric PLM - Integrating Customers' Feedback into Product Data and Lifecycle Processes, Proceedings of 4th International Conference on Product Lifecycle Management, Milano, Inderscience Enterprises Limited
- Abramovici, M.; Schulte, S. 2007: Megatrends im Engineering, In: eDM-Report 2/2007

Kontakt

Dr.-Ing. Michael Muschiol
Siemens AG, Energy Service Division,
Oil & Gas and Industrial Applications Services, Nürnberg
www.energy.siemens.com

Dr.-Ing. Stefan Schulte
Siemens AG
Energy Oil & Gas Division, Duisburg
www.energy.siemens.com

Virtual Reality bei Kärcher

Firma Alfred Kärcher GmbH & Co. KG

Die Firma Kärcher wurde 1935 von Alfred Kärcher in Stuttgart-Bad Cannstatt zur Entwicklung und Herstellung industrieller Produkte auf dem Gebiet der Heiztechnik gegründet. Der erste Heißwasser-Hochdruckreiniger Europas entstand 1950 am neuen Stammsitz in Winnenden und bedeutete für Kärcher den Durchbruch in der Reinigungstechnik. Ein weiterer Meilenstein in der Firmengeschichte war die Einführung des ersten tragbaren Hochdruckreinigers und die damit verbundene Erschließung des Consumer-Marktes 1984.

Mit dem Selbstverständnis »Spitzenleistungen für Sauberkeit und Werterhaltung« bietet das Familienunternehmen Kärcher heute eine breite Produktpalette für den Innen- und Außenbereich an, die von Hochdruckreinigern über Nass-/Trockensauger, Kehr- und Scheu-ersaugmaschinen, Kfz-Waschanlagen, Dampfreiniger, Reinigungsmittel und Trink- und Abwasseraufbereitungsanlagen bis zu Bewässerungs- und Entwässerungspumpen reicht. Seit 1980 wächst das Unternehmen in allen Bereichen kontinuierlich und konnte im Jahr 2011 bei einem Umsatz von 1,7 Mrd. Euro eine Beschäftigtenzahl von 8700 Mitarbeitern vorweisen (Abbildung 1).

Das Bestreben von Kärcher, immer neue und verbesserte Produkte auf den Markt zu bringen, drückt sich nicht zuletzt in einer stetig steigenden Zahl gehaltener Patente und Gebrauchsmuster aus, die im Jahr 2011 bereits 1270 betrug (Abbildung 2).

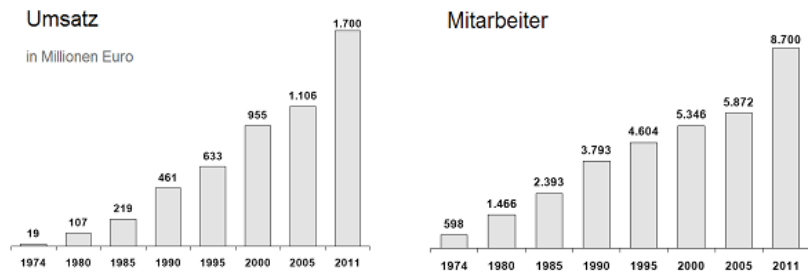


Abbildung 1: Entwicklung der Umsatz und Mitarbeiter bis 2010

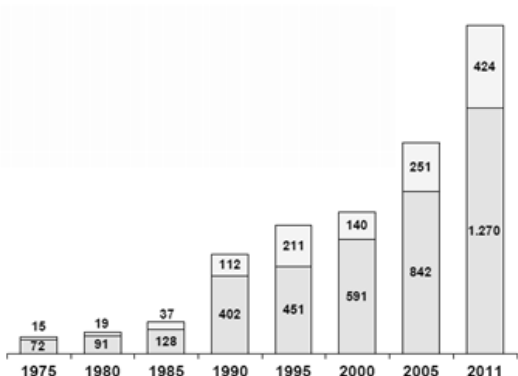


Abbildung 2: Anzahl Patente und Gebrauchsmuster bis 2011

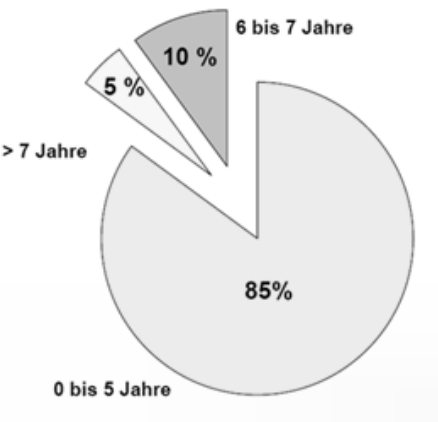


Abbildung 3: Durchschnittliches Alter von Kärcher-Produkten (Quelle Kärcher Vertriebs-GmbH)

Kärcher gelingt es, kontinuierlich Produktverbesserungen oder völlig neue Produkte am Markt zu platzieren, obwohl das Produktportfolio der Firma klar definiert ist. So liegt das Alter von 85% aller Kärcher-Produkte zwischen 0 und 5 Jahren, bei 10 % beträgt es zwischen 6 und 7 Jahren, und nur 5% aller Produkte sind mehr als 7 Jahre alt. Zur Realisierung dieser kurzen Produktzyklen setzt Kärcher moderne Simulationstools für Strömungs- und Strukturmechanik sowie Kunststoff-Spritzguss ein. Bereits 2006 begann die Einführung von Virtual Reality mit dem Ziel, neue Produkte sehr früh im Produktentstehungsprozess mit hoher Qualität zu visualisieren und ihr Verhalten zu simulieren.

Einführung von Virtual Reality

2006 standen am Markt schon mehrere Software-Lösungen zur Verfügung, die in der Lage waren, 3D-CAD-Daten einzulesen und diese in Echtzeit als Stereo-Bildpaare zu rendern. Die Rechenzeiten waren dabei in einem Maße optimiert, dass schon mit einem Cluster aus drei Workstations – einem Frontend-Rechner und zwei Rendering-Rechnern für die beiden Ausgabekanäle – flüssige Bewegungsabläufe wiedergegeben werden konnten. Bei Kärcher sah man zunächst drei Hauptanwendungen von Virtual Reality:

- die Produktvisualisierung im Design-Prozess zur Einsparung teurer Schaummodelle,
- die interaktive Nutzung des virtuellen Prototypen zur Produktoptimierung und Verkürzung der Entwicklungszeiten in der Konstruktion und
- die Darstellung von Wasser- und Luftströmungen auf Basis von Strömungssimulationen zur Kommunikation von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen.

Die Wahl fiel auf ein Ein-Wand Projektionssystem (Powerwall) mit integrierten Tracking-Komponenten. Zur Produktvisualisierung wurde die am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (FhG IAO) in Stuttgart entwickelte Software »VRxm« beschafft (Abbildung 4). Zur Wiedergabe dynamischer Strömungsvorgänge wurde die ebenfalls im Technologiepark in Stuttgart-Vaihingen entwickelte Software »COVISE« der Firma Visenso GmbH ausgewählt. Beide



Abbildung 4: Produktvisualisierung mit der Software VRxm

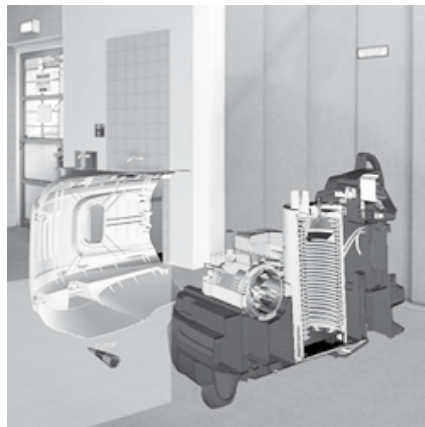


Abbildung 5: Interaktive Zerlegung und Schnitte durch Geräte mit der Software VRxm



Abbildung 6: Darstellung der Strömung in der Kärcher-Gartenpumpe GP 60 mittels Partikeln in COVISE

Software-Pakete liefen sehr zuverlässig unter Linux auf den exklusiv hierfür eingerichteten Virtual-Reality-Workstations und wurden regelmäßig auf dem neuesten Stand gehalten.

Mit der Stereo-Darstellung der Produkte auf der Powerwall in vollem Maßstab und in einer realistisch anmutenden Umgebung gewann man erstmals einen Eindruck von einem neuen Produkt, ohne hierfür einen Prototypen anfertigen zu müssen. Die Software VRxm bot unter Anderem die Möglichkeit, Geräte interaktiv zu bewegen, zu zerlegen und zu schneiden und sie mit Kamerafahrten von allen Seiten zu bewerten (Abbildung 5).

Mittels Partikelbewegung ließen sich komplexe Strömungsvorgänge mit der Software Covise eindrucksvoll visualisieren, was zu einem tieferen Verständnis der Mechanismen führte (Abbildung 6). Kärcher war mit dem neuen Virtual-Reality-System absoluter Vorreiter in der Branche der Reinigungsgeräte-Hersteller. Die Anlage wurde auch ausgewählten Besuchergruppen vorgeführt und leistet bis heute einen wertvollen Beitrag zur Demonstration der im Entwicklungsprozess eingesetzten High-Tech-Werkzeuge.

Nach anfänglich sehr großem Interesse und häufigem Betrieb der VR-Anlage zeigten sich im täglichen Gebrauch einige gravierende Nachteile, die zu einem stetigen Rückgang der Nutzung des Systems führten:

- die sehr zeitaufwändige Aufbereitung von virtuellen Prototypen und VR-Szenen,
- die umständliche Handhabung der VR-Anlage sowie
- der ungenügende Mehrwert der VR-Funktionen gegenüber konventioneller Software.

Bei der Aufbereitung von 3D-CAD-Daten im Virtual-Reality-System traten durch die Datenkonversion in das Austauschformat VRML Informationsverluste und Strukturänderungen des Datensatzes auf, die häufig zu mehrstündiger manueller Nacharbeit führten. Die Bedienung der Virtual-Reality-Anlage als Insellösung unter Linux war Nutzern vorbehalten, die über ein gewisses »Expertenwissen« verfügten. Die Interaktion des Benutzers mit den dargestellten Produkten

erwies sich als kompliziert und führte ohne ausreichende Einübung zu unrealistischen Bewegungsabläufen. Die im 3D-CAD-System vorhandenen Schnitt- und Bemaßungsfunktionen waren denen des VR-Systems meist überlegen, wobei den Konstrukteuren ohnehin die Darstellung in 2D genügte, um sich ein Produkt räumlich vorstellen zu können. Der Zusatznutzen der VR-Anlage im Vergleich zu einem CAD-System war deshalb im Bereich Konstruktion gering. Für Design-Reviews waren die virtuellen Prototypen oft zur Darstellung feiner Details nicht ausreichend hoch aufgelöst, da die Tessellierung der Oberflächen nur eingeschränkt zu steuern war.

Im Ergebnis wurden die mit großem Aufwand erarbeiteten Modelle nicht nachhaltig genutzt, sodass neue konzeptionelle Überlegungen für Virtual Reality angestellt wurden.

Neubewertung des Einsatzes von Virtual Reality

Innerhalb des Unternehmens wurden verschiedene Zielgruppen zum möglichen Nutzen von Virtual Reality befragt. Neben dem Design hatten die Bereiche, Marketing, Vertrieb, Service/Dokumentation und Unternehmenskommunikation Bedarf an hochwertiger Visualisierung. Im Bereich Forschung und Entwicklung (F&E) bestand weiterhin Interesse an der interaktiven Darstellung von Simulationsergebnissen. Die möglichen Einsatzszenarien wurden innerhalb der Bereiche diskutiert und sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

In den gewünschten Anwendungen zeigte sich eine deutliche Präferenz fotorealistischer Computergrafiken, meist als CGI (computer generated imagery) bezeichnet, gegenüber eigentlicher Virtual Reality – also dem Eintauchen (Immersion) in eine stereoskopisch dargestellte 3D-Szene und der Interaktion mit Objekten in Echtzeit. Somit wurde die Beschaffung neuer Software erforderlich, die folgende Anforderungen zu erfüllen hatte:

- Fotorealistisches Rendering virtueller Szenen, dabei
- Möglichkeit zur Immersion und Interaktion in Echtzeit
- Lauffähigkeit auf den Workstations des Firmennetzwerks.

| Zielgruppe | Einsatzszenario | Qualität der Darstellung |
|---------------------------|---|---|
| Marketing | Virtuelle Photo Shootings | Fotorealistische Darstellung |
| Vertrieb | Virtuelle Produkte auf Messen Produkt-Konfiguratoren Einbindung der Kunden in Produktgestaltung / -optimierung | Fotorealistische Darstellung |
| Service / Dokumentation | Visualisierung von Arbeitsabläufen | Hohe Rendering-Qualität |
| Unternehmenskommunikation | Innovation Technologieführerschaft | VR (immersiv in Echtzeit), wenn möglich fotorealistisch |
| F & E | Ergebnisse aus Simulationen | VR (immersiv in Echtzeit), wenn möglich fotorealistisch |
| Design | Visualisierung von Entwürfen Farb- / Materialauswahl | Fotorealistische Darstellung, wenn möglich immersiv in Echtzeit |

Tabelle 1: Virtual Reality – Zielgruppen und Einsatzszenarien

Die Forderung nach Echtzeitfähigkeit bei gleichzeitig sehr hoher Darstellungsqualität ließ sich mit Software-Produkten, die ausschließlich auf Offline-Rendering für Print-Medien und Kinofilme ausgerichtet sind – wie Maxwell, Cinema 4D, Maya oder auch 3D Max – nicht erfüllen. Stattdessen wurde mit der Software VRED (Virtual Reality Editor) eine Lösung gewählt, die für höchste Darstellungsqualität in der Automobilindustrie entwickelt wurde und gleichzeitig alle Virtual-Reality-Funktionen wie stereoskopische Darstellung und Nutzer-Tracking in Echtzeit unterstützt.

Visualisierung mit der Software VRED

VRED ist dabei voll skalierbar und lässt sich daher sowohl auf einer einzelnen Workstation als auch im Cluster-Modus in VR-Anlagen mit mehreren Projektionsflächen einsetzen. Innerhalb von VRED können umfangreiche Materialdatenbanken genutzt und für eine schnelle Wiederverwendung gespeichert werden. Durch die Bereitstellung verschiedener Programmierschnittstellen (C++, Python-Script) bietet die Software sehr gute Möglichkeiten, Import- oder Renderprozesse zu automatisieren, womit sich Renderergebnisse

Abbildung 7a



Abbildung 7b

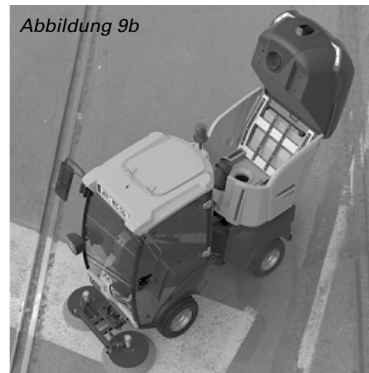


Abbildung 8

Abbildung 9a



Abbildung 9b



leicht reproduzieren und ohne Expertenwissen nutzen lassen. Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen einem realen Produktfoto, das in einem Retuscheprozess digital nachbearbeitet wurde, und einem Rendering aus VRED ohne weitere Bearbeitung.

Neben den überzeugenden Renderergebnissen bietet VRED die Möglichkeit Daten, die aus verschiedenen Erzeugersystemen stammen, gemeinsam zu visualisieren. In Abbildung 8 ist der mit dem Strömungslöser ANSYS CFX berechnete Luftstrom des Dachrockners einer Kärcher-Portalwaschanlage gemeinsam mit dem Produkt selbst visualisiert. Mit der zusätzlichen Information – hier dem geschlossenen Luftvorhang und seiner gleichmäßigen Verteilung – bekommt der Kunde einen Eindruck von der hohen Qualität des Produkts und den vorgenommenen Optimierungen.

Ein weiterer großer Vorteil fotorealistischer Renderings liegt in der Animation von Produkten. In einem frühen Entwicklungsstadium können dem Kunden auf diese Weise Funktionen und Merkmale neuer Produkte vorgeführt werden, ohne dass hierfür ein realer Prototyp aufgebaut werden müsste (Abbildung 9).

Geplante Prozessintegration mit der Software VRplm der TU Dresden

Die Akzeptanz der VR-Technologie im Unternehmen stieg mit der Einführung von VRED beträchtlich. Der nach wie vor nötige manuelle Aufwand für die Aufbereitung des virtuellen Prototypen und der VR-Szenen stellt jedoch auch weiterhin ein großes Hemmnis für den kontinuierlichen Einsatz von VRED im Produktentwicklungsprozess dar und hat seinen Grund in der noch fehlenden Ankopplung an das PDM-Backbone-System SAP (Abbildung 10). Die dezentrale Speicherung von Materialdatenbanken und Umgebungsszenen macht die Handhabung von VRED nach wie vor unhandlich.

Ein zukunftsweisendes Konzept zur Integration verschiedener VR-Anwendungen in den Engineering Prozess bietet hier die VRplm-Plattform des Lehrstuhls Konstruktionstechnik/CAD der TU-Dresden. Mit einer Server-Client-Architektur der VRplm-Plattform lassen sich

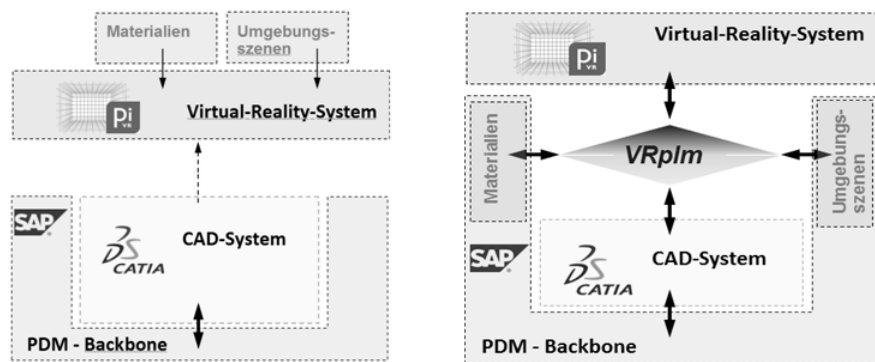


Abbildung 10 (links): Virtual-Reality-System als Insellösung

Abbildung 11 (rechts): Integration von Virtual Reality in den Produktentwicklungsprozess mittels VRplm

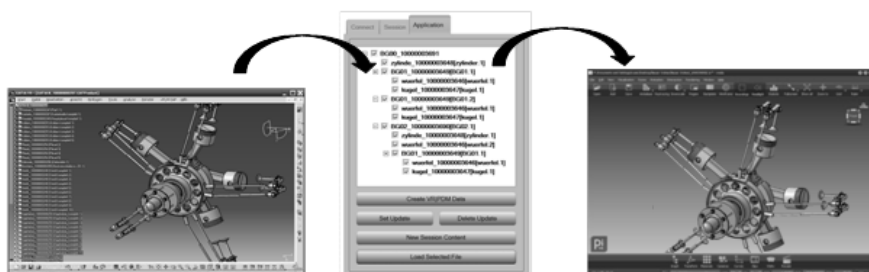


Abbildung 12: Grafische Benutzeroberfläche von VRplm

CAD- und VR-Systeme beliebig verknüpfen. Die Daten werden dabei in der PLM-Umgebung in Echtzeit synchronisiert. Neben den klassischen Produktdaten lassen sich auch Materialdatenbanken und Umgebungsszenen für VRED verwalten und zentral in SAP ablegen. Die VRplm-Plattform der TU Dresden zeigt sich in Abbildung 11 als zentrale Brücke zwischen CATIA, dem Virtual-Reality-System VRED und SAP.

Die Zuweisung von Materialien kann mit diesem Konzept mit geringem Mehraufwand per »drag'n'drop« durch die Konstrukteure selbst vorgenommen werden. Der virtuelle Prototyp ist durch diese zentrale Bearbeitung immer auf dem aktuellen Stand. Die virtuelle Szene wird in VRED durch Ansteuerung über die VRplm-Plattform automatisch aufgebaut. Der Konstrukteur muss sich in VRED nicht einarbeiten und kann sämtliche Materialzuweisungen in seiner gewohnten CAD-Umgebung vornehmen. Einen Eindruck der grafischen Oberfläche von VRplm vermittelt Abbildung 12. Die VRplm-Plattform wird derzeit bei Kärcher den unternehmensspezifischen Anforderungen angepasst. Nach erfolgreichem Abschluss einer Evaluierungsphase ist der produktive Einsatz der VRplm-Plattform in der Produktentwicklung geplant.

Kontakt

Dr. Andreas Seibold
 Alfred Kärcher GmbH & Co.KG
 Postfach 160
 71349 Winnenden
 andreas.seibold@de.kaercher.com

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer
 Dr. Bernhard Saske
 Technische Universität Dresden
 Fakultät Maschinenwesen
 Professur für Konstruktionstechnik/CAD
 01062 Dresden
 bernhard.saske@tu-dresden.de

Uwe Freiherr von Lukas

Visual Computing als Basis für Prozessinnovation im Produktlebenszyklus

Einführung

Die Informationstechnik ist seit den Anfängen von CAD vor ca. 50 Jahren ein wesentlicher Impulsgeber für die Produktentwicklung und hat maßgeblichen Anteil an Prozessinnovationen wie dem Global Engineering oder der Digitalen Fabrik. Längst geht es aber heute nicht mehr allein um die Geometriebeschreibung zukünftiger Produkte, sondern um die möglichst umfassende Begleitung und Ergänzung des realen Produkts durch das virtuelle Produkt: von der ersten Idee bis zum Recycling. Die umfassende Vision des virtuellen Produkts als Pendant zum realen Produkt (Spur & Krause 1997) ist untrennbar mit dem Fortschritt der Informationstechnologie verbunden.

Visual Computing bezeichnet bild- und modellbasierte Informatik und ist die Disziplin, die die wesentlichen Grundlagen für das virtuelle Produkt und die vielfältigen Anwendungen im Produktlebenszyklus legt. Es umfasst die Bereiche Computergraphik, Computer Vision, Image Processing und Interaktion. Damit liefert Visual Computing die Basistechnologien, um virtuelle Produkte zu beschreiben, sie sichtbar zu machen, sie interaktiv zu bedienen oder auch Aspekte der realen Welt auszuwerten und mit dem virtuellen Produkt zu verknüpfen. Mixed Reality, bildbasierte 3D-Rekonstruktion oder auch die realitätsnahe Simulation von Beleuchtungssituationen sind Beispiele für konkrete Technologien des Visual Computing.

Technologien und Anwendungen

Die Modellierung des Produkts als 3D-Modell bildet den Kern des virtuellen Produkts – ist aber nicht darauf beschränkt. Die Ergänzung um Materialinformationen, die Beschreibung funktionaler Aspekte und die Anbindung physikalischer Simulation machen das virtuelle Produkt im kompletten Produktlebenszyklus vielfältig einsetzbar.

1. So dient der digitale Prototyp zunehmend als Entscheidungsgrundlage im Produktentwicklungsprozess. Mit ihm kann das zukünftige Produkt in unterschiedlichsten Aspekten schneller und kostengünstiger bewertet werden.
2. Nicht allein das zukünftige Produkt wird bewertet – auch Fertigungsverfahren oder Montageprozesse lassen sich heute in vielfältiger Weise digital absichern. Auch hier tragen die Verfahren des Visual Computing dazu bei, Prozesse optimal zu gestalten und Fehler zu vermeiden.
3. Ähnliche Anwendungen wie im Engineering gibt es auch beim Einsatz im Marketing: Das virtuelle Produkt macht das reale Produkt für den Kunden erlebbar, z.B. im Showroom mittels Virtual Reality oder als Mixed Reality App auf dem Smartphone. Besser als in jeder Printkampagne lassen sich Produkte mit ihren Eigenschaften so kommunizieren.
4. Hat sich der Kunde für ein Produkt entschieden, so benötigt er ggf. Unterstützung bei der Benutzung. Auch hier leistet Visual Computing einen Beitrag zur Effizienz, wenn statt umfangreicher Papierunterlagen ein interaktives virtuelles Produkt mitgeliefert wird, das seine Nutzung erläutern kann und mit dem der Kunde sich vertraut machen kann – ohne Schaden bei Fehlbedienung anzurichten. Anlagen oder Systeme müssen so nicht als reale Trainingsumgebung »missbraucht« werden und stehen komplett für den eigentlichen Einsatzzweck zur Verfügung.
5. Bei der Wartungsassistenz unterstützt das virtuelle Produkt wiederum mittels Mixed Reality bei der Durchführung komplexer Prozeduren und schaltet bei

Bedarf auch einen Remote-Experten zu, der das übertragene Videobild mit dem vorliegenden Produktmodell in Einklang bringen kann und sich so mühelos orientieren kann. Dies führt zu effizienten After-Sales-Prozessen und eröffnet zudem ein Feld für neuartige, produktbegleitende Dienstleistungen.

6. Investitionsgüter werden in ihrer Lebensdauer oft an neue Nutzungsanforderungen oder gesetzliche Vorschriften (Sicherheit, Umweltauflagen) angepasst. Für solche Retrofit-Aufgaben können die virtuellen Methoden ebenfalls qualitäts- und effizienzsteigernd eingesetzt werden.

Zum besseren Verständnis sollen in diesem Abschnitt wesentliche Basistechnologien des Visual Computing sowie deren Bezug zum virtuellen Produkt kurz vorgestellt werden.

Visualisierung

Die Visualisierung von Modelldaten ist eine zentrale Fähigkeit, die bereits in CAD-Systemen und DMU-Tools in teils guter Darstellungsqualität zur Verfügung steht. Durch die Anforderung immer komplexer werdende Modelldaten komplett und in Echtzeit zu visualisieren sowie durch den Wunsch nach fotorealistischer Darstellung waren hier weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Ein



Abbildung 1: Beispiel einer echtzeitfähigen Visualisierung unter Einsatz von Precomputed Radiance Transfer und Raytracing (Mustang model courtesy of Italdesign Giugiaro)

Ergebnis mit hoher praktischer Relevanz ist das Visibility-guided Rendering (Brüderlin et al. 2007), bei dem über eine geschickte Datenhaltung und heuristische Verfahren lediglich der vermutlich sichtbare Teil eines großen 3D-Datensatzes an die Graphikkarte gesendet wird. Auf diese Weise können auch Modelle mit bis zu 500 Millionen Polygonen mit sehr guter Darstellungsgeschwindigkeit interaktiv betrachtet werden.

Als weiterer Beitrag des Visual Computing ist der Einsatz von High Dynamic Range-Systemen für die Visualisierung zu nennen (Stork 2010). Damit ist es erstmals möglich, die komplette Kette von der Erfassung einer realen Lichtsituation und der Beschreibung von Texturen über das Rendering (die Erzeugung eines Rasterbildes von einer 3D-Szene) bis zur Darstellung über einen Projektor mit einem sehr hohen Dynamikumfang zu betreiben. Durch die Kombination fortgeschrittener Renderingverfahren, wie dem Precomputed Ra-

diance Transfer und dem Raytracing unter Ausnutzung der massiven Parallelverarbeitung auf den Graphikkarten lassen sich so qualitativ sehr hochwertige Darstellungen erreichen. Die fotorealistische Qualität, die heute schon beim Rendern von Einzelbildern, beispielsweise für Kataloge genutzt wird, lässt sich nun auch zunehmend in interaktiven Anwendungen erreichen.

Der umfassende Einsatz von 3D-Daten außerhalb der Konstruktionsabteilung, also beispielsweise im Einkauf, im Management oder im After-Sales-Bereich scheitert oft daran, dass die dortigen Arbeitsplätze (aus Kostengründen) nicht mit geeigneter Software ausgerüstet sind und diese Anwendergruppen auch nicht im Einsatz mit den oft sehr komplexen 3D-Programmen geschult sind. Abhilfe kann hier die Einbindung von 3D-Daten in Web-Anwendungen bieten. Dies war bislang nur durch den Einsatz proprietärer Plug-Ins möglich, was von den meisten Anwenderfirmen nicht akzeptiert wird. Ein vielversprechender Ausweg liegt in der nativen Berücksichtigung von 3D-Daten in Form von X3D im neuen HTML5-Standard, der aktuell entwickelt wird (Behr et al. 2010). Der Ansatz macht es möglich, X3D direkt im HTML-Code verwenden zu können, um Web-Programmierern einen einfachen und intuitiven Zugriff auf 3D-Objekte zu bieten.

Die direkte Unterstützung von 3D-Modellen im World Wide Web ermöglicht insbesondere auch den mobilen Zugriff auf das virtuelle Produkt. So lassen sich die Daten jederzeit auf Geräten wie Smartphones oder Tablets anzeigen, für die spezielle Viewer (CAD oder DMU) in der Regel nicht verfügbar sind.

Interaktion

Neben der Visualisierung spielt auch die natürliche Interaktion eine wesentliche Rolle bei der Bereitstellung leistungsfähiger Anwendungen für die virtuelle Produktentwicklung. Wichtige Impulse kommen hier – wie in vielen anderen industriellen Anwendungen der Computergraphik – aus der Spielebranche. Konkret ist es hier die extrem preisgünstige Verfügbarkeit eines optischen 3D-Sensors, der Kinect von Microsoft. Das als Eingabegerät für eine Spielekonsole entwickelte Gerät erstellt in Echtzeit eine Tiefenkarte



Abbildung 2: Nutzung von X3D in einer HTML-Seite zur interaktiven Visualisierung eines Simulationsergebnisses als 3D-Datensatz

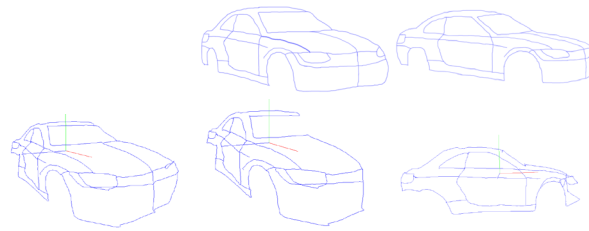


Abbildung 3: Zwei Ausgangsskizzen (obere Reihe) und daraus rekonstruiertes 3D-Modell (links unten) sowie nachbearbeitete Modelle (Mitte und rechts unten)

und liefert zudem von den im Kamerabereich befindlichen Personen ein Skelettmodell. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die intuitive Bedienung (bin Mohd Sidik et al. 2011).

Diese gestenorientierte Interaktion ist allerdings nicht für alle Anwendungsfälle geeignet. So nutzen Ingenieure in der Entwurfsphase oft (perspektivische) Skizzen, die in der Regel auf Papier erstellt werden. Soll einer der Entwürfe weiter detailliert werden, so muss die Form erneut eingegeben werden, um sie beispielsweise in einem CAD-System zu bearbeiten. Mit Computer Vision-Verfahren können solche Skizzen weitgehend automatisch in dreidimensionale Drahtgittermodelle überführt werden (Wendt et al. 2010). Voraussetzung ist, dass das Objekt aus unterschiedlichen Perspektiven skizziert wurde.

Mixed Reality

Für Mixed Reality (synonym auch als Augmented Reality bezeichnet) kombiniert man die generative Computergraphik mit der Bildverarbeitung. So lassen sich in Echtzeit virtuelle Objekte in die Realität einblenden. Dies erfolgt entweder durch ein computergeneriertes Overlay, das passgenau über einen Videostrom gelegt wird und so auf dem Bildschirm oder ein Head Mounted Display präsentiert werden kann. Oder es werden lediglich die virtuellen Objekte über halbdurchlässiges Display dargestellt und die Objekte mischen sich dann im Sichtfeld des Anwenders.

Aus Sicht des Visual Computing liegt die Herausforderung in der Erfassung der Position und Blickrichtung des Nutzers. Nur wenn diese in Echtzeit bestimmt werden kann, dann lassen sich die virtuellen Objekte auch in korrekter Größe, Perspektive und Lage einblenden. Aktuelle Verfahren verbinden oft die in einem Gerät (z. B. Smartphone oder Tablet-PC) vorhandenen Sensoren, um die Aufgabe des so genannten Trackings zu lösen. Besondere Bedeutung bei der exakten Positionierung spielt das optische Tracking. Während dazu bislang explizite Markierungen in der realen Welt erforderlich waren, orientieren sich aktuelle Verfahren an robusten Merkmalen im Videostrom bzw. verwenden das bekannte 3D-Modell des Produkts. Aus dem Vergleich des Objekts im Video mit dem Modell kann aus der perspektivischen Verzerrung dann die Position und Blickrichtung der Kamera bestimmt werden.

Ergebnisse aktueller Forschung tragen dazu bei, den optischen Eindruck bei Mixed Reality noch zu verstärken. Dazu wird von der realen Umgebung eine Tiefenkarte erzeugt, mit der sich Verdeckungen der virtuellen Objekte beim Platzieren in der Umgebung berechnen lassen (Franke et al. 2011). Zudem lassen sich aus den Videobildern auch die Lichtverhältnisse in der Szene rekonstruieren, die dann bei der Visualisierung der virtuellen Objekte berücksichtigt können (Gierlinger et al. 2010).

Simulation auf der Graphikkarte

Die Algorithmen sowie die für Visual Computing optimierte Graphikhardware eignen sich nicht nur für die sehr schnelle Visualisie-

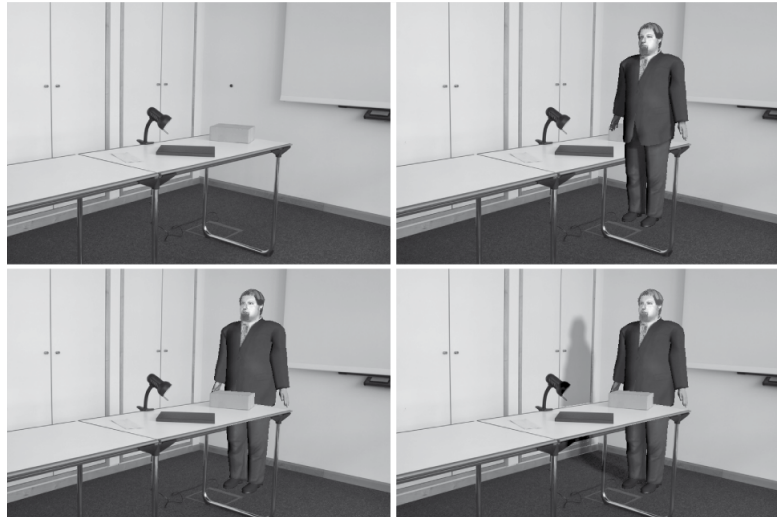


Abbildung 4: Reales Bild einer Szene (oben links); Szene mit überlagelter virtueller Person (oben rechts); Szene mit berechneter Verdeckung der Person (unten links); Szene mit Verdeckung und berechnetem Schattenwurf auf den realen Objekten (unten rechts)

rung von 3D-Daten. Auch aufwendige Simulationsberechnungen profitieren in hohem Maße davon. Maßgeblichen Anteil daran hat die massiv-parallele Architektur moderner Graphikprozessoren (Graphics Processing Unit) mit bis zu einigen hundert Prozessorkernen. Durch eine geeignete Aufbereitung der klassischen Berechnungsverfahren für die numerische Simulation (z.B. Euler oder Navier-Stokes-Gleichungen) kann so eine erhebliche Beschleunigung erzielt werden. Bei passend gewählten Parametern für die Diskretisierung der Zellen und der Approximation der Gleichungen lässt sich (bei leichten Einbußen in der Genauigkeit) sogar eine Berechnung in Echtzeit erreichen (Weber et al. 2012). Da die Ergebnisdaten bereits im Speicher der Graphikkarte vorliegen, ist zudem deren Visualisierung mit minimalem zeitlichem Zusatzaufwand möglich.

Frameworks

Die aktuelle Fülle prototypischer und kommerzieller IT-Anwendungen für die Produktentwicklung unterstreicht die Rolle von Visual Computing als Enabler für Innovation des gesamten produzierenden Gewerbes. Mit leicht verändertem Fokus stützen auch Stark et al. (2010) sowie Abele et al. (2011, S. 70 ff.) diese Aussage. Umso wichtiger ist es, den Entwicklungsaufwand für anwendungsgerechte IT-Systeme zu reduzieren. Nur bezahlbare Lösungen stoßen auf Akzeptanz bei den Anwendern und können ihr Potenzial zur Entfaltung bringen. Neben der Standardisierung von Datenformaten, wie z.B. JT (ISO 2011) leistet die Bereitstellung leistungsfähiger Frameworks für die Applikationsentwicklung eine wichtige Rolle. Ein Beispiel hierfür ist Instantreality (Behr et al. 2008), dass seine Eignung für die effiziente Erstellung von Anwendungen in der Produktentwicklung vielfach unter Beweis gestellt hat. Es unterstützt sowohl Virtual Reality als auch Mixed Reality und kann aufgrund seiner zahlreichen Schnittstellen und der unterstützten Standards vielfältig integriert werden.

Zudem sei an dieser Stelle das Functional DMU-Framework (Wagner et al 2011) genannt, das auf klassischem geometrischem DMU aufbaut, dieses aber um verschiedene Aspekte des Verhaltens erweitert und so eine deutlich bessere Bewertung gerade auch von mechatronischen Produkten erlaubt. Das Framework ermöglicht die Anbindung spezialisierter Simulationswerkzeuge (Matlab, Dymola, Rhapsody etc.) sowie deren Kopplung untereinander unter einer einheitlichen Oberfläche.

Prozessinnovation für Entwerfen, Entwickeln, Erleben

Die oben vorgestellten Technologien des Visual Computing erlangen ihre Bedeutung im Produktlebenszyklus erst durch die Effekte, die sie bei den Anwendern erzielen können. Deshalb sollen in diesem Abschnitt beispielhaft Prozessinnovationen vorgestellt werden, die ohne Visual Computing nicht erzielbar wären.

Entwerfen: Entscheidungsunterstützung im Styling

Der Einsatz von Virtual Reality zum Design-Review ist hinlänglich bekannt und zählt heute nicht nur in der Automobilindustrie zum Standard-Repertoire. In vielen Fällen gehören dadurch aufwendig zu erstellende Tonmodelle oder gar Prototypen im Maßstab 1:1 der Vergangenheit an. Da in einem VR-basierten Review zudem Varianten einfach und schnell erstellt und anschließend gegenübergestellt werden können und das Produkt auch visuell in unterschiedlichen Szenen bzw. Umgebungen betrachtet und visuell bewertet werden kann, ist diese Prozessinnovation inzwischen aus der Praxis nicht mehr wegzudenken.

Entwickeln: Rapid Simulation

Die oben beschriebene echtzeitfähige Simulation unter Nutzung des Graphikprozessors bietet ein erhebliches Potenzial zur Veränderung der Produktentwicklung. Zwar wird in vielen Branchen auch heute bereits intensiv mit Simulationstools gearbeitet, doch ist die Schleife aus Modellierung, Simulation, Interpretation der Simulationsergebnisse und daraus abgeleiteter Optimierung noch sehr träge. Dies ist sowohl der erforderlichen manuellen Aufbereitung der Simulationsmodelle, aber insbesondere auch den langen Berechnungszeiten geschuldet. Durch die echtzeitfähige Simulation, die direkt in die Modellierungswerkzeuge integriert werden kann, lässt sich der Effekt einer Änderung sofort bewerten und unterschiedliche Varianten explorieren. Zur Absicherung der favorisierten Lösung ist aber nach heutigem Stand immer noch eine genaue Simulation mit den üblichen Verfahren erforderlich.

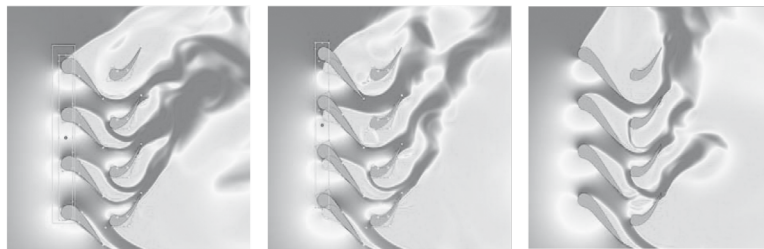


Abbildung 5: Rapid CFD (Modellierungswerkzeug mit integrierter, echtzeitfähiger Strömungssimulation)

Entwickeln: VR im schiffbaulichen Entwicklungsprozess

Der Schiffbau in Europa ist gekennzeichnet durch Spezialschiffe hoher Komplexität, die in Kleinstserien oder als Unikate unter hohem zeitlichem Druck und in einem starken Preiswettbewerb entwickelt und gefertigt werden. Auch wenn die großen Werften heute sehr intensiven Gebrauch von 3D-CAD-Systemen machen, so reichen deren Möglichkeiten zur Visualisierung und Interaktion in einigen Fällen nicht aus, um im Entwurf alle Folgen einer Designentscheidung zu verdeutlichen.

Durch den Einsatz von Virtual Reality-Anwendungen, die speziell auf die konkreten Anforderungen in der jeweiligen Situation zugeschnitten sind, lässt sich dieses Defizit beheben. In Mesing et al. (2009) wird dazu ein Konzept vorgestellt, das sowohl methodische als auch implementierungstechnische Unterstützung bietet. Es wurde an verschiedenen Fallbeispielen von Werften unter Einsatz des o.g. Frameworks Instantreality erfolgreich erprobt.

Eine Anforderung mit hoher Aktualität, ist die Gewährleistung der Sicherheit von Passagieren an Bord von Fähren oder Kreuzfahrtschiffen. Hier wurde in Zusammenarbeit mit der Flensburger Schiffbau Gesellschaft ein Tool erstellt, das eine immersive VR-Darstellung mit einem Multitouch-Table zur intuitiven Steuerung verbindet (Mesing et al 2011). Die aus dem CAD-System importierten 3D-Daten wurden in einem stark automatisierten Authoringprozess aufbereitet, um trotz des großen Datenvolumens das komplette Schiff beim Sicherheitsreview betrachten zu können. Zudem wurde eine Integration mit der Evakuierungssimulation TraffGo vorgenommen. Darüber lassen sich die Bewegungen der Passagiere von ihrem Aufenthaltsort zu den Sammelplätzen bei den Rettungsbooten realitätsnah nachbilden.

Die von TraffGo nur als 2D-Visualisierung auf den Decksplänen unterstützte Visualisierung kann durch die 3D-Visualisierung deutlich verbessert werden. Die Nutzung von Virtual Reality mit der Möglichkeit der Einstellung unterschiedlicher Sichtweiten (durch die graphisch nachgebildete Ausbreitung von Rauch im Schiff) liefert zusätzliche Hinweise zur Verbesserung des Sicherheitskonzepts.

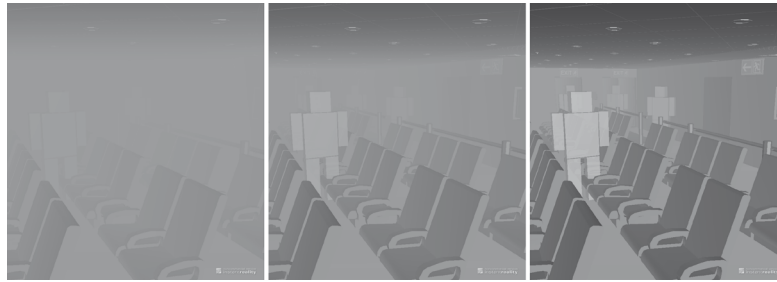


Abbildung 6: VR-gestützte Auswertung einer Evakuierungssimulation mit unterschiedlicher Sichtweite durch Rauchausbreitung



Abbildung 7: Konstruktion von Rohren im realen Kontext mittels Mixed Reality

Bisher wurden ähnliche Bewertungen erst bei der Endabnahme des Schiffes durchgeführt. Aufgedeckte Defizite resultieren dann zwangsläufig in hohen Kosten durch die Änderung bereits gefertigter und montierter Bauteile. Die Bewertung im virtuellen Raum spart dadurch Zeit und Kosten.

Entwickeln: Virtueller Modelldraht

Eine Besonderheit im U-Bootsbau ist, dass aufgrund der extrem hohen Packungsdichte in vielen Bereichen sowie der Vielzahl der Systeme, Leitungen und Rohre heute noch Kunststoffmodelle im Maßstab 1:5 gefertigt werden, die als Referenz für die Fertigung der Unikate dienen. Zur Reduzierung der Entwicklungs- und Fertigungszeiten und auch aus Kostengründen soll dieser Prozess jetzt auf virtuelle Modelle umgestellt werden. Ein interessanter Teilaspekt in der Produktentwicklung sind die kleinen Leitungen bzw. Rohre unterhalb einer gewissen Nennweite. Diese werden nicht vorab modelliert, sondern bislang unter Nutzung des Kunststoffmodells geplant, mit einem echten Draht modelliert, der dann als Vorlage für die Rohrschlosserei dient.

Mittels Mixed Reality kann dieser Prozess, der von einer engen Verzahnung von Konstruktion und Fertigung geprägt ist, jetzt deutlich verbessert werden (Bockholt et al. 2010). Dafür nutzt man einen Tablet-PC mit eingebauter Kamera. Dieser erfasst den realen Bau-raum und ermöglicht es, über optisches Tracking die Position der Kamera exakt zu bestimmen. Damit kann eine Korrespondenz des Videobildes mit dem vorhandenen CAD-Modell gebildet werden. Der Nutzer kann dann einen Flansch auf dem Video selektieren und eine Rohrverbindung zum Zielflansch modellieren. Die Geometrie des so modellierten Rohrs kann direkt als Datensatz für die CNC-Biegemaschine exportiert werden.

Erleben: Training im virtuellen Modell

Bei der Entwicklung von komplett neuen Fahrzeugtypen müssen die eigentliche Produktentwicklung und die Bereitstellung von Trainings- und Ausbildungskonzepten für die Fahrzeugführer eng miteinander verknüpft sein. So ist es auch bei den Bodeneffektfahrzeugen, die sich i.d.R. in geringem Abstand über der Wasseroberfläche bewegen und dadurch schnell und trotzdem sehr energieeffizient betrieben werden können. Bei Geschwindigkeiten von bis zu 200 km/h müssen die Operator solcher Fahrzeuge sehr gut geschult sein, um die potenziellen Gefahren, die von dem Fahrzeug im See-raum ausgehen, beherrschen zu können.



Abbildung 8: Trainingssimulator für Bodeneffektfahrzeuge am Fraunhofer IGD in Rostock

Aus diesem Grund wurde ein Trainingssimulator entwickelt (Deistung et al. 2011), der das Bewegungsverhalten des Fahrzeugs physikalisch weitgehend korrekt abbildet und mit dem Manöver, wie das Abwassern oder das Ausweichen gefahrlos geübt werden können – und das in einer Phase, in der sich das eigentliche Fahrzeug noch in der Entwicklung zur Serienreife befindet.

In ähnlicher Form werden heute auch von der deutschen Marine virtuelle Trainingsumgebungen für die Besatzungen erprobt, damit diese die Bedienung des Schiffs erlernen können, während das reale Schiff noch im Bau ist (Schupp 2011).

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, wie aktuelle Forschungsergebnisse des Visual Computing genutzt werden können, um das Konzept des virtuellen Produkts im kompletten Lebenszyklus umzusetzen. Damit leistet es einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Prozesse – vom Styling über die Entwicklung bis zum Training der Anwender.

Die meisten der hier vorgestellten Anwendungen befinden sich noch im Prototypenstadium. Analog zur Entwicklung der VR-Systeme, die sich inzwischen am Markt etabliert haben und teilweise in umfassende Systeme zur Produktentwicklung integriert wurden, werden auch Rapid Simulation, Mixed Reality & Co. in den kommenden Jahren Eingang in entsprechende IT-Produkte finden.

Auch zukünftig werden die Prozesse der Produktentwicklung und der nachgelagerten Phasen von den Fortschritten des Visual Computing profitieren. Die dafür erforderlichen anwendungsorientierten Forschungsarbeiten lassen entsprechende Innovationen in den folgenden Bereichen erwarten:

- Leichtgewichtiger Soll-Ist-Abgleich unter Einsatz von Kameras statt von Laserscannern.
- Die umfassende Nutzung von 3D-Daten in allen Unternehmensbereichen durch Plug-In-freie Web-Applikationen.
- Die ständige Möglichkeit zum mobilen Zugriff auf 3D-Daten über leistungsfähige mobile Endgeräte.
- Die Etablierung alternativer Repräsentationsformen für 3D-Objekte, insbesondere durch dynamische Meshes.
- Die kontinuierliche und möglichst automatisierte Aktualisierung des virtuellen Produkts bei Änderungen am realen Produkt.

Danksagung

Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten in den Projekten »POWER-VR« und »3D maritim« wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literaturverzeichnis

- Abele, E. ; Reinhart, G: 2011: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser Verlag.
- Behr, J ; Jung, Y.; Keil, J.; Drevensek, T.; Zöllner, M.; Eschler, P.; Fellner, D.W. 2010: A Scalable Architecture for the HTML5 / X3D Integration Model X3DOM. In: Proceedings Web3D 2010: 15th International Conference on 3D Web Technology. 185-193. New York: ACM Press
- Bockholt, U.; Webel, S.; Staack, I.; Riedel, M.; Rieß, P.; Olbrich, M.; Wuest, H. 2011: Kooperative Mixed Reality für Konstruktion und Fertigung im Schiffsbau. In: Schenk, M. (Hrsg.); 14. IFF-Wissenschaftstage. Tagungsband : Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. 191–196, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Brüderlin, B.; Heyer, M.; Pfützner, S. 2007: Interviews3D: A Platform for Interactive Handling of Massive Data Sets. IEEE Computer Graphics and Applications, 27(6):48-59.
- Deistung, E.; Kolewe, B.; Vahl, M.; von Lukas, U. 2011: MARSPEED - Ein skalierbarer Trainingssimulator für Bodeneffektfahrzeug. In: von Lukas, U. et. al (Hrsg.) Tagungsband Go-3D 2011, 75-94, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Behr, J.; Bockholt, U.; Stricker, D. 2008: Instant-Reality – Mixed Reality Techniken im Produktlebenszyklus. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.) Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. 16–27. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.
- Franke, T.; Kahn, S.; Olbrich, M.; Jung, Y. 2011: Enhancing Realism of Mixed Reality Applications through Real-Time Depth-Imaging Devices in X3D. In: Proceedings Web3D 2011: 16th International Conference on 3D Web Technology. 71–80, New York: ACM Press.
- Gierlinger, T.; Danch, D.; Stork, A. 2010: Rendering Techniques for Mixed Reality. In: Journal of Real-Time Image Processing. 5 (2010), No. 2, 109-120.
- International Organization for Standardization 2011: Industrial automation systems and integration – JT file format specification for 3D visualization. ISO/PAS 14306:2011
- Mesing, B.; Kluwe, F.; von Lukas, U. 2011: Evaluating Evacuation Simulation Results in a Virtual Reality Environment. In: Bertram, V. (Hrsg.) Proceedings International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT) 2011, 326–334, TU Hamburg-Harburg
- Mesing, B.; Vahl, M.; von Lukas, U. 2009: Ein ganzheitlicher Ansatz für den Einsatz von VR im schiffbaulichen Sektor. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.): Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung : Grundlagen, Methoden und Werkzeuge. Paderborn 275–288: Heinz Nixdorf Institut.

- Schupp, M. 2011: ViSTIS: Revolutionary team training for complex systems. In: ThyssenKrupp techforum, Issue 1. 64–67.
- bin Mohd Sidik, M.K.; bin Sunar, M..S.; bin Ismail, I.; bin Mokhtar, M.K.; Jusoh, N.B.M. 2011: A Study on Natural Interaction for Human Body Motion Using Depth Image Data. In: Proceedings of the 2011 Workshop on Digital Media and Digital Content Management (DMDCM). 97-102, Washington, DC, US: IEEE Computer Society.
- Spur, G.; Krause, F.-L. 1997: Das virtuelle Produkt – Management der CAD Technik. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Stark, R.; Krause, F.-L.; Kind, C.; Rothenburg, U.; Müller, P.; Hayka, H.; Stöckert, H. 2010: Competing in engineering design — The role of Virtual Product Creation, In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 3, Issue 3, 175–184.
- Stork, A. 2010: Shedding Light on the Virtual World. In: Projects. (2010), No. 18, 76-78.
- Wagner, M.; Schneider, P.; Hinnerichs, A.; Bruder, T.; Stork, A.: 2011: Functional DMU: Co-Simulation of Mechatronic Systems in a Virtual Environment. In: The American Society of Mechanical Engineers (ASME): ASME 2011 World Conference on Innovative Virtual Reality: WINVR 2011. 193–198. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Weber, D.; Peña Serna, S.; Stork, A.; Fellner, D.W. 2012: Rapid CFD für die frühe konzeptionelle Design Phase. In: NAFEMS Online Magazin 21 (2012) No.1, 70–79
- Wendt, L.H; Stork, A.; Kuijper, A; Fellner, D.W. 2010: 3D Reconstruction from Line Drawings. In: Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication (INSTICC): VISIGRAPP 2010. Proceedings: International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. 65–71. Portugal: INSTICC Press

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Uwe Freiherr von Lukas
 Fraunhofer IGD / Universität Rostock
 Joachim-Jungius-Straße 11
 18059 Rostock
www.igd-r.fraunhofer.de

PDM based Lifecycle Analysis – A Case Study

To facilitate collaborative design in vocational education institutions, we have conducted a project to establish a nationwide PDM platform for four different schools spread all over the country. The particular aim of a follow up project introduced in this paper is to sensitize the participating students to sustainable design and lifecycle assessment (LCA) and provide them with hands-on tools through the PDM platform to accomplish these tasks. As a collaborative case study project, a cordless drill driver was chosen to be re-designed with respect to Ecodesign aspects. Since LCA is truly a holistic task, we focused on the ecological aspects of material and production stage. Distribution, usage and end-of-life stages were left out as well as economic and social aspects. The drill driver was divided into housing, drill chuck, gear and power unit. Each component was assigned to one of the schools and had to be designed with respect to reduced environmental impacts. Since different CAD systems are used the decision to provide the needed tools and environmental information within the PDM platform rather than CAD environment was easy. Some of the PDM systems on the market do also provide lifecycle analysis modules but it is rather a black box approach than a transparent data and reporting source. Because LCA heavily relies on the method itself and the way analysis is conducted we decided to develop our own tools. Therefore, a new, adapted interface was developed using open source business intelligence software called Pentaho to facilitate on the fly reporting and analytics of the work in progress by the users. Furthermore, the Ecoinvent database was connected to the PDM system to provide required information on

carbon footprint and cumulated energy demand. The paper discusses strength and weaknesses of tools and methods with respect to the introduced case study and gives an outlook on ontology representation for the data model for better analysis capabilities.

Introduction

Complexity of products and economic considerations during product development usually require the collaboration of geographically distributed, intercultural and interdisciplinary teams. Thus, the use of PDM systems is inevitable during this process, as multiple parties are involved representing different competences and performing specific tasks. They are holding the reference structure of the product or system under development and build the integration basis for different CAx tools. Any change of a particular part or component in the product can be communicated via a PDM system, may it involve communication to the supplier, the development engineer or the purchase department.

Technical and vocational schools play an important role in the education of technically skilled employees in Austria. While employees with a vocational education usually have profound engineering design skills, collaborative work skills making use of PDM system capabilities are shortcoming. To provide an environment where these can be trained, our research group at Vienna University of Technology has created and maintains a PDM platform for national vocational schools (Gerhard et al. 2009). Currently, four schools in Austria are cooperating to introduce and implement this PDM platform into their design syllabus. The PDM platform is optimized for the different types of design education courses at schools and is adapted to the schools' specific needs. In particular, students in their final year of school shall take advantage of this platform to prepare their final design projects which are commonly conducted in cooperation with partners from industry.

In the current project PDM-UP (UP = Umweltgerechte Produktentwicklung) the adaptation of the platform for successful design collaboration in school spanning design projects with focus on «Design

for Environment" (DfE) is given special attention. The consideration of environmental aspects is becoming a key issue aspect in product development and product design. This topic was chosen to leverage further advantages of the PDM system usage and thereby convince students of the added value. Advanced functionality of the system in terms of process control and product structure analysis spanning different CAD systems is implemented and supports design collaboration between students in the course of an Ecodesign project.

Related Work

Numerous tools have been developed that help to track and evaluate the environmental impacts of a product over its entire life cycle with special methods. In any of the methods for reducing the environmental impacts of a product environmental information is necessary to start the environmental evaluation process. Life Cycle Assessment (LCA) is the most widespread assessment method for this purpose (Jeswiet et al. 2005). However, carrying out a full LCA is a time-consuming and complex task and there are still many barriers that withhold LCA from being a common practice in industry, mainly because of data requirements Millet et al. (2007). LCA requires much data that is constantly changing in the product development process, in particular in the early design stages. The early design stages would allow for the most efficient changes in the design, as they have the greatest potential for any improvement. But available information about later phases is generally unknown or fuzzy in this stage. Later in the development process, more data is available, but the potential for improvement is significantly lower and much more costly, a phenomenon commonly known as the «design paradox».

There have been some efforts to bring LCA into CAD systems (Ostad-Ahmad-Ghorabi et al. 2009). Meanwhile, major CAD vendors have also integrated DfE functions or modules. SolidWorks Sustainability (Dassault 2012.) evaluates the environmental impact categories non-renewable lifecycle energy demand, water eutrophication, carbon footprint, and air acidification based on the modeled CAD data. The Eco Materials Adviser in Autodesk Inventor 2012 (Autodesk 2012) has the aim to provide guidance on material

selection in the early stages of design in order to enable exploration of alternatives and rationally chose materials.

Most of these approaches suffer from the lack of information in these early design stages. Furthermore, a CAD system is not the major source to gain comprehensive information about product structures and part information because products in general contain more items than modeled within CAD. Commonly, PDMS are the major source containing global Information from preceding projects and representing the complete structure of a product including variants etc. This is particularly the case if more than one single CAD system is used in the development process.

On the other hand there are specialized LCA software tools to optimize products and processes like GaBi (PE 2012), CMLCA (CMLCA 2012), SimaPro (Pre 2012) providing also required databases like GaBi Database (PE 2012), Granta (Granta 2012) or Ecoinvent (Ecoinvent 2012). These tools represent methodology and data established partly in about 20 years development time for performing in-depth LCA and require specialized know how and considerable effort. Some of them provide standard interface to import LCA-relevant data directly from Bill of Materials (BOM). After performing a survey of different approaches our conclusion is that with special respect to early phases of the product creation process a PDM based lifecycle analysis approach has distinct advantages. On the one hand side there is no limitation a single CAD environment and on the other hand side PDMS belong to the common working environment of design engineers and information about product structures and relationships is available in the underlying database. Windchill LCA (PTC 2012) offers a LCA module within a commercial available PDM software solution which our research group is using for the above mentioned projects. At the beginning of our project this module was not yet available. Nonetheless, we decided to stick with our own solution because the implementation of LCA functionality is a black box for the end user and not transparent which is essential for research and education processes.

System Environment and Case Study

A particular goal of the project is to provide students with add-on functionalities for environmental evaluation of their design concepts which the CAD environment (different CAD-systems are in use) is not capable of. The existing databases in the PDM system are complemented with environmental databases containing environmental impact indicators such as indicator for global warming expressed in gram-CO₂-equivalents or Cumulative Energy Demand (CED), expressed in MJ. The platform itself is optimized to allow the consideration of the processes in the products' life cycle, from use of raw materials to end of life processes, to attach metadata to CAD files and ease file sharing and communication between design collaborators. Four important steps are followed in the case study:

1. Systematic analysis of products in regard to their environmental performance: To help the students in evaluating the environmental impacts of their concepts, an abridged Life Cycle Assessment (LCA) methodology was incorporated into the PDM system.
2. Integration of environmental database into the PDM system: To access environmental impact indicator values and life cycle inventory data, the database Ecoinvent (Frischknecht et al. 2007) is integrated into the PDM system. Students are only confronted with the indicator values for materials and processes. Life Cycle Inventory (LCI) data is used for the development of the system's internal algorithms for environmental evaluation.
3. Design collaboration between schools: A real product has to be designed through collaboration of students distributed in different schools. Each school is assigned a particular component based on the competencies they have.
4. Analysis of the acceptance of the PDM system and the added value provides for the design process: It is important to understand how much the system is accepted in design lectures (intra-school application) and/or inter-school design projects.

Since most students were not familiar with the concept of eco-design, an introductory workshop was organized in the schools to give insight into the topic. Through the project, students are continuously supervised to help them to accomplish step 1 for their design task. By integrating LCA into PDM, students are provided a powerful tool to analyze the environmental impacts of their design. As a real design task, the collaborative design of a new cordless drill driver is considered in step 3 of the project. It is divided into its four main components: 1. Housing, 2. Drill chuck, 3. Gear, and 4. Power unit. Each school is responsible for the design of one main component; one school provided material specifications for the new design of the drill driver. In this step, the PDM platform is continuously improved based on the requirements for efficient collaboration. Usability, functionality and acceptance of the PDM platform are investigated in step 4 to conclude for a platform concept that has the potential to be an integrative part of the design lectures.

To ease the handling of the PDM system and to provide capabilities needed for the case study, an easy process to extract, visualize and communicate analysis information is needed. Business Intelligence (BI) and reporting tools are capable of fulfilling these requirements. BI systems usually have three main purposes: 1. Providing data, 2. Analyzing data, and 3. Presenting data. The open source application Pentaho (Pentaho 2012) provides all necessary features relevant in the scope of this project. For the purpose of this project it is important to conclude to an architecture that can be implemented in any of the participating schools. Even the fact that different CAD systems are used should not hinder students to properly share their results and outcomes. The final architecture of the adapted PDM system is shown in Figure 1.

In order to facilitate easy file sharing among different CAD systems, to retrieve data for environmental evaluation and to generate reports, it is necessary to track where relevant data (coming from the CAD systems and containing information such as material or mass) is stored in the central data archive of the PDM system. Since the data model of the incorporated PDM system is not open but proprietary, an interface from Pentaho to the PDM database had to be developed which

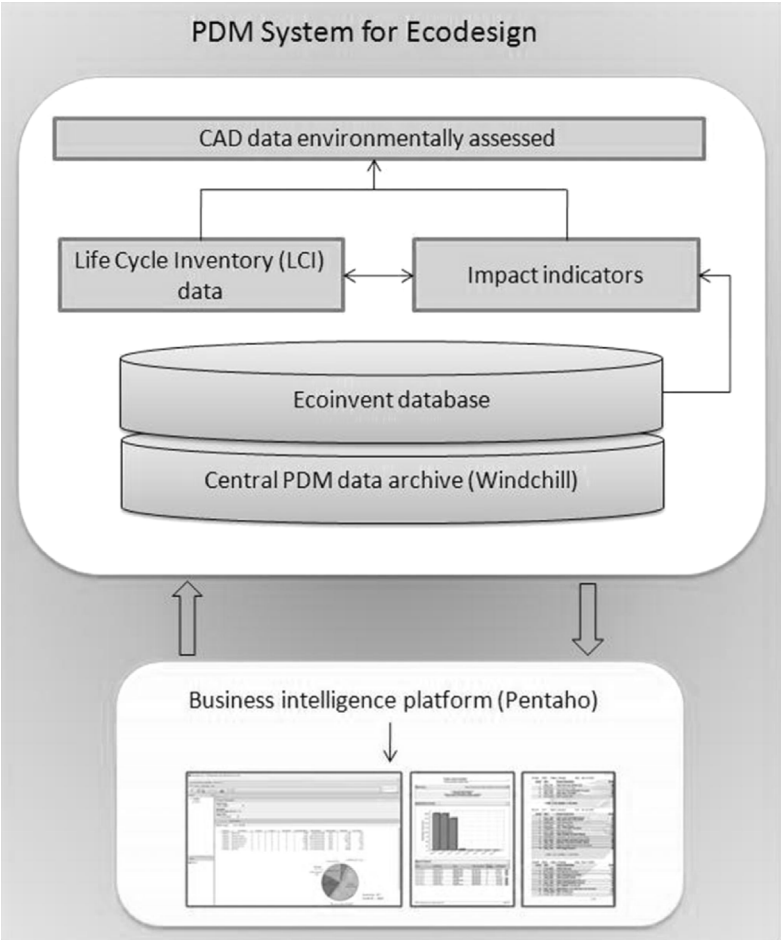


Figure 1: Architecture of the adapted PDMS

was a significant effort. A number of reports have been created in Pentaho to deliver the relevant environmental data which can be analyzed by students in order to improve their design concepts. Due to the web-based architecture of the system, users have access no matter in which location they are working be it at the different school locations, from home or at the sites of industrial partners.

Experiences and Evaluation

A first survey was conducted among 76 participating students to find out about the acceptance of the PDM system in the design education. They were asked about usability of the system, the added value of integrating such a system into the design lectures and about the time effort to use such a system amongst others. A particular aim of the questionnaire was to find out whether the acceptance of the PDM system solely depends on the system itself or the way it was taught and introduced in the lectures. The students surveyed were aged between 17 and 19. Most of the students were in their final year of school and were particularly interested to evaluate whether the PDM system is of any advantage for their final design projects. When asked about the usefulness of implementing PDM systems into the design lectures, some 28% considered it as less useful or even not useful whereas when asked for the usefulness for final design projects, 65% considered it as very useful or useful.

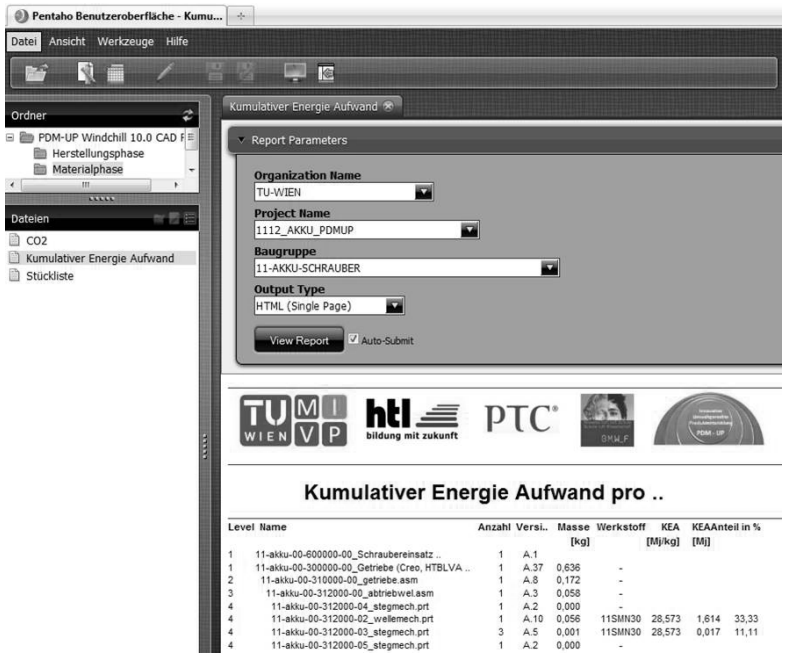


Figure 2: Screenshot of the implemented Reporting Tool

The customization and optimization of the PDM platform through integrating the reporting tool helped the students to better handle the platform. Figure 2 shows the interface of the reporting tool. Some 73% rated the usability of the platform as very good or good. However, almost 50% indicated that by adding a PDM system to the design lectures and the obligation to use it has raised their workload considerably. On the other side, the willingness to use the PDM system is also high, since some 80% agreed on the fact that by using the system, they have gained more competencies in the design process and 90% were stating that the use of PDM should be part of the design lectures already in the third school year after the basics of design and technical drawing have been educated in the first and second year. In general, the use of the PDM system in design lecture was perceived quite positively, although some comments indicated that more time should be allocated to the teaching of the system. At the end of the project, another survey will be conducted in order to find out if there are significant changes with respect to the given school spanning Ecodesign project, in our case the development of an environmentally optimized cordless drill driver. By then, the design of the cordless drill driver will be finished and a feedback from the students regarding the use of the PDM system will be most insightful.

Conclusion and Outlook

Engineering design is already a complex process; any additional supporting tool has to be intuitive, provide rigorous results, and has to ease the work right away; although learning mechanisms positively affects the handling of a tool over time, most users do not appreciate tools that require long learning periods. The students, in particular those in their final year, were seeking for a professional tool for design collaboration but the original virgin PDM platform seemed too complex to handle and added too much to their workload. For any tool or methodology to be successfully integrated into design, the effort clearly lies on the developer's side. Complex tools requiring long learning periods are outdated. Those tools will either be completely declined or their full features will barely be used efficiently. As much as consumers are demanding easy to handle and intuitive pro-

ducts, engineering designers require processes and tools that are as much intuitive as the products that are the result of these processes.

For the case of PDM systems, our research group has started further efforts to ease data exchange processes, ease environmental analysis for engineering designers and to provide a clear structure for communication between design team members. The concept is not to provide all information or any information that might be of any use sometime in the design process, but rather provide only that particular information which is needed in a particular process step in the most efficient way. In order to allow confidence in the use of LCA, it is essential that users have access to data that can be selected to best meet their needs in view of the goal and scope of an LCA study. A wide variety of databases and other repositories has evolved over time, some national, some commercial, some freely available. This diversity causes challenges because there is currently no way to either assure that information is consistent and exchangeable from these databases or even that users are provided with sufficient and compatible information on which to decide which datasets best meet their needs.

Furthermore, Product lifecycle management and analysis often requires information gathering from disparate software systems. An increase in the number of disparate systems regularly requires custom individual interfaces to transfer the data. This can be time consuming and prone to conversion errors. Ontologies can be used to bridge the data interoperability gap between various software systems and separated software systems (Patil et al. 2005). By using an ontology a common understanding of different information structures can be achieved, knowledge can be reused and analyzed and general assumptions about a certain field of knowledge can be made. Furthermore, heterogeneous data can be made available through the (semantic web) linked data concept which enables complex, semantic database queries. Within the remaining project duration of about 9 month we will follow this approach to merge data sets, infer new relations, and integrate outside data sources as well as to map the various data onto an abstract data representation and thereby make the data independent of its internal representation.

Acknowledgements

The work presented in this paper has been funded by the Austrian Federal Ministry of Science and Research within the Sparkling Science research program.

References

- Autodesk (2012) <http://www.autodesk.de/> (viewed: Apr 2012)
- CMLCA (2012) <http://www.cmlca.eu/> (viewed: Apr 2012)
- Dassault Systems (2012) <http://www.solidworks.com/sustainability/index.htm> (viewed: Apr 2012)
- Ecoinvent (2012): <http://www.ecoinvent.ch/> (viewed: Apr 2012)
- Gerhard, D., Grafinger, M. (2009) Integrative Engineering Design Using Product Data Management Systems in Education. In: Proceedings of the 11th International Conference on Engineering and Product Design Education EPDE09: pp.79–84
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, A. J., Dones, R., Hecl, T., Hellweg, S., Hirsch, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielman, N. and Wernet, G. Ecoinvent. Overview and Methodology. Data 2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Tech.Rep,07.
- Granta Materials Database (2012) <http://www.grantadesign.com/> (viewed: Apr 2012)
- Jeswiet J, Hauschild M (2005) Ecodesign and future environmental impacts. *Materials and Design*, (26)7:629–634.
- Millet D, Bistagnino L, Lanzavecchia C, Camous R, Poldma T (2007) Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production*, (15)4:335–346.
- Patil, L. Dutta, D., Sriram, R., (2005). Ontology-based exchange of product data semantics, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2(3), 213-225.
- PE International (2012) <http://www.gabi-software.com/ce-eu-german/index/> (viewed: Apr 2012)
- Pentaho webpage, <http://www.pentaho.org/> (viewed: Apr 2012).
- PRé Consultants (2012) <http://www.pre-sustainability.com/> (viewed: Apr 2012)
- PTC Windchill (2012): <http://www.ptc.com/> (viewed: Apr 2012)

Contact

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard
 Dipl.-Ing. Toubia Rahmani
 TU Wien
 Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik
 Forschungsbereich Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung
 Getreidemarkt 9/307
 1060 Wien, Austria
www.mivp.tuwien.ac.at

Wolfgang Holle, Stephan Husung & Christian Weber

CAD-Produktmodell – Quelle der Produktbewertung nach Zeit und Kosten

1 Einleitung

Produktentwicklung und Fertigungsplanung innovativer komplexer technischer Produkte sind heute ohne massiven Rechneinsatz gar nicht mehr möglich: Produkteigenschaften wie Funktion, Fertigung, Montage, Bedienbarkeit, dynamisches Verhalten, Reaktion auf Störgrößen, Ästhetik, Instandhaltung bis Recyclings sollten möglichst früh im Entwicklungsprozess durch virtuelle Prototypen technischer Produkte und Verfahren beschrieben und abgesichert werden (Höhne 2009).

Ausgehend von vorgegebenen SOLL-Eigenschaften eines technischen Produktes werden während der Produktentwicklung in mehreren Syntheseschritten die Produktmerkmale (Konstruktionsparameter) festgelegt. Die Ergebnisse der Syntheseschritte werden als virtuelle Prototypen, meist in 3D-CAD Modellen (CAD-Produktmodell), abgebildet (siehe Abbildung 1). Ausgehend von den virtuellen Prototypen lassen sich unter Nutzung von CAE-Werkzeugen die IST-Eigenschaften bei vergebenen Rand- und Umgebungsbedingungen ermitteln (Virtual Engineering). Während der Produktentwicklung möchte der Produktentwickler möglichst schnell Rückmeldungen über die Auswirkungen von Syntheseentscheidungen auf die realisierten Produkteigenschaften (IST-Eigenschaften) haben (Weber 2011). Eine wichtige Anforderung hierfür ist, dass die virtuellen Prototypen und die enthaltenen Produktinformationen kontinuierlich genutzt werden können.

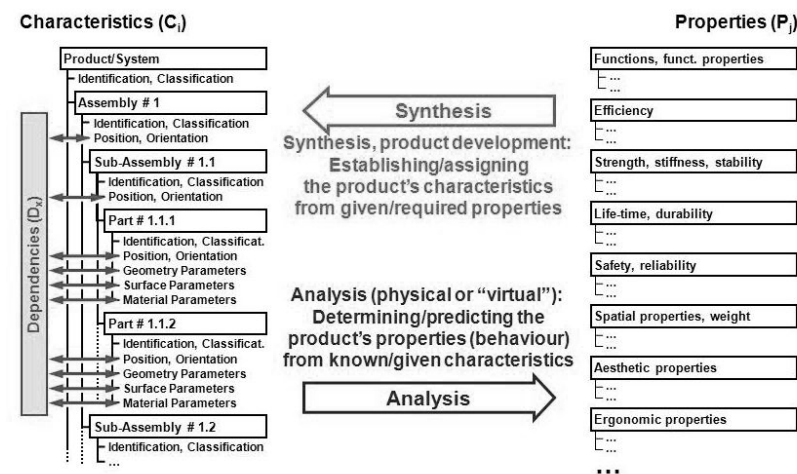


Abbildung 1 : Produktmerkmale und -eigenschaften sowie deren Beziehungen

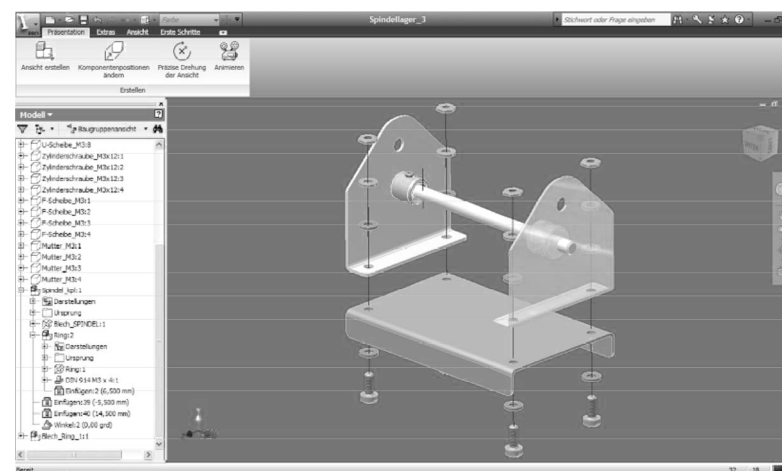


Abbildung 2 : Modell eines Spindellagers im parametrischen 3D-CAD-System

In der Produktentwicklung bestimmt der Konstrukteur im Wechselspiel von Ganzheit und Detail, Funktion und Gestalt, Einzelteil und Produkt u.a. auch die fertigungs-/montagerelevanten und zeitwirkenden Faktoren auf Teilefertigung und Montage und legt sie »nebenbei« in den Datensätzen zum virtuellen Prototypen ab. Dem Produktentwickler sind jedoch die Auswirkungen auf die Fertigungs- und Montagezeiten und -kosten meist nicht direkt bekannt. In dem vorliegenden Paper wird ein Werkzeug (AssCE1) vorgestellt, welches dem Produktentwickler direkt in der CAD-Umgebung (vgl. Abbildung 2) ausgehend von den festgelegten Produktmerkmalen die zu erwartenden Montagezeiten und -kosten unter Nutzung des MTM2-Verfahrens ermittelt und darstellt. Somit kann der Produktentwickler über kurze Iterationsschleifen das Produktmodell anpassen und technologische Produkteigenschaften optimieren.

2 Technologisch relevante Informationen im CAD-Produktmodell

Der Umfang an technologisch relevanten Informationen in einem virtuellen Prototypen ist so umfassend vorhanden, dass in Verbindung mit verfahrenstechnischem Wissen bereits in der Entwicklungsphase eine Bewertung konstruktiver Lösungen auf Fertigungs-/Montagezeit und Fertigungs-/Montagekosten z.B. für einen Variantenvergleich möglich ist. Um diese Möglichkeit zu erschließen, sind technologisches Wissen und gezielte Bewertungen in AssCE (Hilmer 2010) so abgelegt, dass sie dem Konstrukteur in seiner Entwicklungsumgebung bereitstehen. Dazu werden für die Montage Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ)³ in unterschiedlichen Ausprägungen gemeinsam mit den Relationen von Primär- und Sekundärmontagen als methodische Ansätze genutzt. Diese methodischen Ansätze werden in dem hier beschriebenen Programm aufgenommen und in das CAD-System Autodesk INVENTOR eingebettet.

Es steht die Aufgabe, den Montageprozess konstruktionsbegleitend (Simultaneous Engineering) zu berücksichtigen, das Ergebnis der Produktentwicklung frühzeitig zu beurteilen und die erhaltenen Daten später auch in den Informations- und Datenfluss der Prozesskette Montageplanung einzubinden.

Der Produktentwickler wird von AssCE in seiner Arbeit unterstützt; die traditionelle Arbeitsvorbereitung oder die Vor- und Nachkalkulation werden nicht ersetzt. AssCE stellt jedoch eine frühzeitige Bewertung konstruktiver Lösungsvarianten zu gleichen Maßstäben bereit und ermöglicht so eine qualifizierte Entscheidung zu Lösungen und Varianten während der Entwicklung.

Wenn der Montageplaner systematisch arbeitet, denkt er in Handlungszyklen für jedes Einzelteil bzw. für jede Baugruppe. Das FÜGEN von Einzelteilen und Baugruppen steht – meist in Verbindung mit ergänzenden technologischen Verfahren – als Handlungselement im Zentrum planerischer Arbeit und wird in der MTM-Nutzung (Antis 1969) und in produktorientierten Betrachtungen explizit behandelt (Holle 2002). Den Zyklus kann man – in Anlehnung an B. LOTTER – in PRIMÄR- und SEKUNDÄR-Montage gliedern (Lotter 1992; Lotter 1994).

Im MTM-Verfahren existieren 18 bewertete Ausprägungen des FÜGENs als PRIMÄR-Montage, mit denen sich die Fügestellen schlüssig auf Basis von virtuellen Prototypen bewerten und zur weiteren Planungsarbeit aus ihm extrahieren lassen. Die Vielzahl und Vielfalt zeitwirksamer Einflüsse auf den zentralen Vorgang FÜGEN wie:

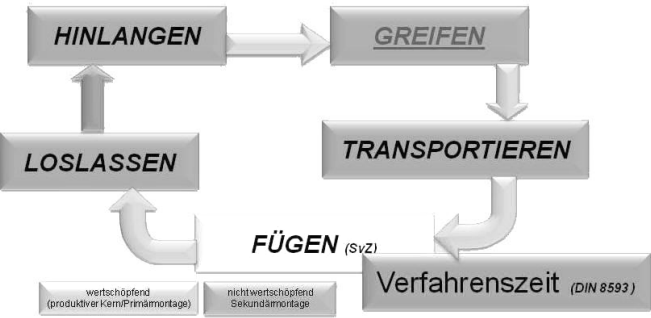


Abbildung 3 : Montagevorgänge nach Holle in Rechnerunterstützte Montageplanung S. 91

- Nennmaße
- Passungen
- Toleranzen
- Oberflächenqualitäten, Rauheit
- Adhäsion
- Reibungskoeffizienten

werden in der MTM-Bewertung durch empfundene – also nicht exakt quantifizierbare – Beurteilungskriterien (kein Druck, leichter Druck, starker Druck) und die Klassifizierung von Faktoren (Symmetrie über Winkel, Erschwernisse über Häufigkeit, Maße und Masse) in FÜGE-Symbole und Zeitbedarf überführt.

Eine Möglichkeit zu einer direkten Übernahme der Konstruktionsparameter ergibt sich aus den Grundlagen der Bemaßung und Tolerierung aus der Konstruktionslehre (Krause 2004), aus Festlegungen zur Oberfläche, aus Materialkombinationen, usw. (siehe Abbildung 4). Äquivalenzlisten zwischen den Passungsklassen der Konstruktion und den Passungsklassen des MTM-Verfahrens wurden als Erweiterung abgestimmt und autorisiert (MTM-Institut Zeuthen 2004).

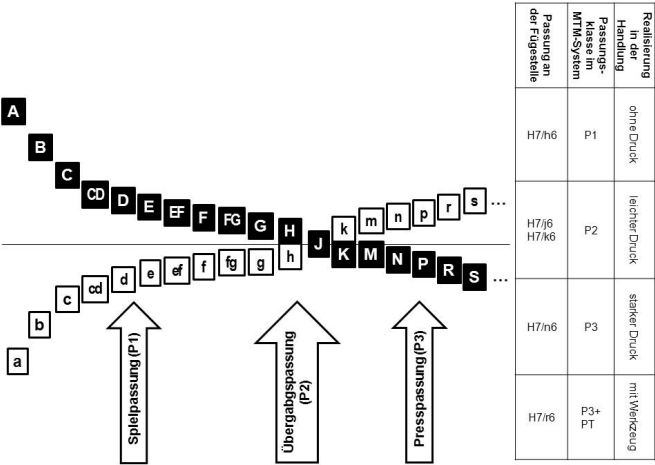


Abbildung 4: Äquivalenz zwischen Passungen an der Fügestelle und im MTM-System

3 Ermittlung der MTM-Parameter

Ausgehend vom erweiterten MTM-Verfahren müssen die notwendigen Eingangs-informationen aus dem CAD-Modell ermittelt werden. Dies sind:

- Alle Fügestellen (Kontaktflächen während des Montageprozesses) inkl. der vorliegenden Passungen
- Montageunterstützungen (z.B. Montagefasen)
- Montagerichtung
- Montage-Drehwinkel
- Masse der bewegten Komponenten.

Die Informationen über die Fügestellen, die Montageunterstützungen und die Masse der bewegten Komponente liegen – wenn auch teilweise implizit – im CAD-Modell vor. Die Toleranzen müssen an den Flächenpaarungen ermittelt und in die MTM-Passungen übertragen werden. Nicht in den CAD-Modellen enthalten sind die Informationen über die Montage-richtung und den Drehwinkel, da die CAD-Modelle nur den Zustand nach dem Zusammenbau abbilden.

Eine wesentliche Aufgabe ist die Ermittlung der Fügestellen und der zugehörigen Parameter. Dabei ist zu beachten: Eine Fügestelle wird nicht durch eine einzelne Kontaktflächenpaarung zwischen zwei Komponenten definiert. Eine Fügestelle ist vielmehr die Gesamtheit aller Kontaktflächenpaarungen zwischen zwei Komponenten (siehe Abbildung 5). An der so definierten Fügestelle, also dem Verbund der Kontaktflächenpaarungen, können gleichzeitig mehrere Passungen vorliegen. Für die Ermittlung der MTM-Passungsklasse wird jeweils die »strengste« Passung verwendet. Liegen im CAD-Modell an der Fügestelle keine Passungen vor, so wird eine unternehmens- bzw. produktspezifische MTM-Passungsklasse »Px« verwendet und der Anwender aufgefordert, die Passung ggf. nachzutragen.

Voraussetzung zur Ermittlung der Fügestellen ist das Auffinden der Kontaktflächenpaarungen an den Kopplungen der Komponenten sowie der dort vorliegenden Toleranzen. Die Kontaktflächenpaarungen in den CAD-Modellen ergeben sich implizit aus der Nominalgeometrie der Komponenten und deren Anordnung (Position

und Orientierung). Die Flächenpaarungen liegen nicht explizit im CAD-Modell vor. Zur Ermittlung der Flächenpaarungen gibt es unterschiedliche Konzepte. Die vielversprechendste Methode ist der direkte Flächenvergleich (Vergleich, ob die Flächen unterschiedlicher Komponenten sich an mindestens einer Stelle berühren), da so alle – richtig modellierten – Flächenpaarungen erkannt werden können. Diese Methode ist für das gesamte CAD-Modell aufgrund der unterschiedlichsten Flächentypen (siehe Tabelle 1) und der unterschiedlichen Modellierungsstrategien der Konstrukteure jedoch sehr zeitaufwändig. Durch eine Vorauswahl der potentiellen Flächenpaarungen mittels Bounding-Box-Analyse, Skalierung der Bauteile mit Kollisionsanalyse (siehe Abbildung 6) oder über eine Auswertung der Komponentenverknüpfungen (Husung 2008, Kirchner 2007) kann die Analysezeit erheblich reduziert werden.

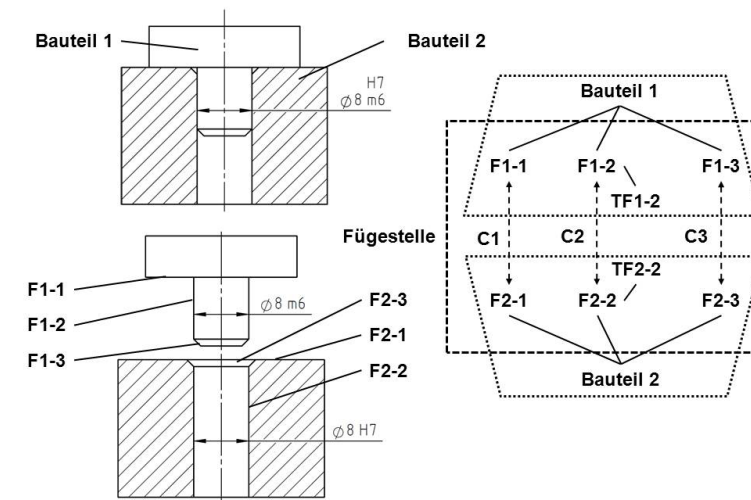


Abbildung 5: Fügestelle zwischen zwei Bauteilen, bestehend aus mehreren Kontaktflächenpaarungen (mit C – Kopplung, F1-1 – Kontaktfläche 1 von Bauteil 1, TF – Toleranz an der Kontaktfläche 1)

Die Montagerichtung und der -drehwinkel können derzeit nur aus den vorliegenden Freiheiten an der Fügestelle im eingebauten Zustand (abgebildeter Zustand im CAD-Modell) abgeschätzt werden. Eine genauere Betrachtung würde eine komplette kinematische Simulation des Montagepfades ausgehend von einem Startpunkt unter Berücksichtigung der Kollisionen mit den anderen Komponenten verlangen.

4 Einbindung in den Entwicklungsprozess

Der Produktentwickler durchläuft viele Synthese-Analyse-Bewertungs-Schleifen, damit alle relevanten Soll-Produkteigenschaften hinreichend realisiert werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Veränderung von Produktmerkmalen zur Verbesserung irgendeiner anderen Eigenschaft sofort auch Einfluss auf den Montageaufwand und damit auf die Montagekosten haben kann. Eine frühzeitige und schnelle – im Sinne von wenig Aufwand für den Produktentwickler – Rückmeldung über die mit den festgelegten Produktmerkmalen verursachten Montagekosten wäre daher sehr hilfreich. Damit der Produktentwickler seine Konstruktionsumgebung nicht verlassen muss, ist eine Einbindung des Analyseprogramms in das CAD-System sinnvoll.

Damit die Änderungen an den Produktmerkmalen in den Iterationsschleifen erfasst werden, sollte das Analyse-Programm zwei Modi besitzen. Neben einer kompletten Analyse des gesamten Modells sollte eine partielle Analyse für veränderte Komponenten (bei Veränderung der Produktmerkmale) durchgeführt werden. Hierfür kann das »Event«-Management der CAD-Systeme eingesetzt werden. Vor und nach einer Änderung werden sogenannte »Callback«-Funktionen aufgerufen, sodass die Änderungen erfasst werden können (siehe Abbildung 7).

Für eine Bewertung der Montagekosten müssen diese dem Produktentwickler geeignet präsentiert werden. Die Präsentation darf den Entwicklungsprozess aber auch nicht behindern. In der ersten Umsetzung wurde hierfür ein kleiner Dialog geschaffen, welcher die wesentlichen Informationen über die Montagezeiten, kosten und die

| | Kegel | Zylinder | Ebene | Kugel | Torus |
|----------|-------|----------|-------|-------|-------|
| Kegel | | | | | |
| Zylinder | | | | | |
| Ebene | | | | | |
| Kugel | | | | | |
| Torus | | | | | |

Tabelle 1: Auswertbare Flächenpaarungen (grau)

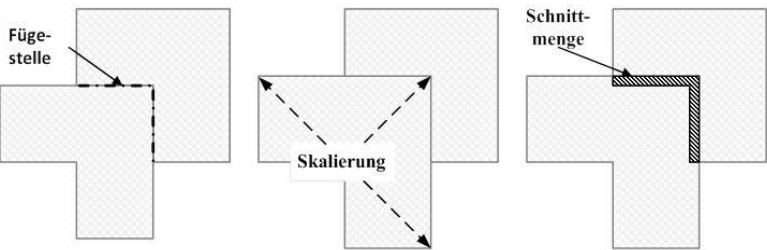


Abbildung 6: Ermittlung der Kontaktflächenpaarungen

notwendigen Montagestationen beinhaltet (siehe Abbildung 8 (a)). In vielen Fällen ist es jedoch sinnvoll, sich die Analyseergebnisse detaillierter anzusehen. Sind beispielsweise Passungen im CAD-Modell nicht hinterlegt oder werden diese falsch erkannt, so werden die darauf aufbauenden Montagezeiten und -kosten verfälscht. Daher hat es sich als sinnvoll erwiesen, neben einem kompakten Dialog für die kontinuierliche Präsentation der Analyseergebnisse zusätzlich einen erweiterten Dialog einzuführen, in welchem die einzelnen Analyseergebnisse detailliert dargestellt werden. Der Dialog zeigt zu jeder erkannten Fügestelle die ermittelte MTM-Passungsklasse (siehe Abbildung 9). Der Produktentwickler kann die Passungsklassen bei Bedarf – vorerst ohne Rückwirkung auf das virtuelle CAD-Modell – auch manuell editieren.

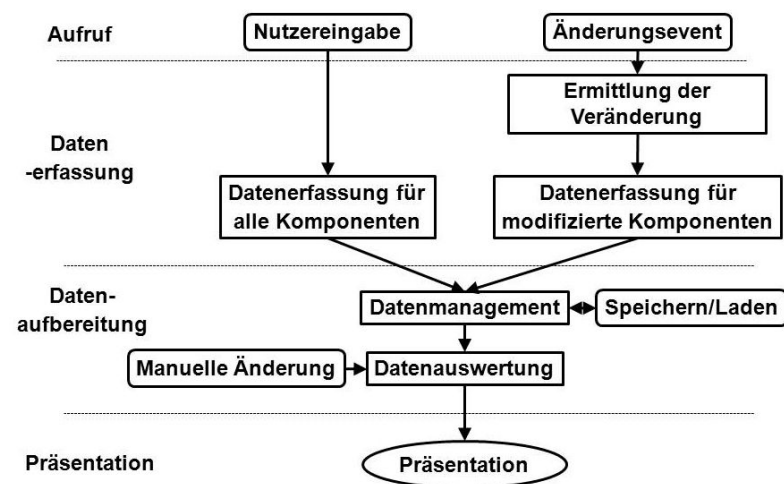


Abbildung 7: Programmablauf mit Datenerfassung und -auswertung

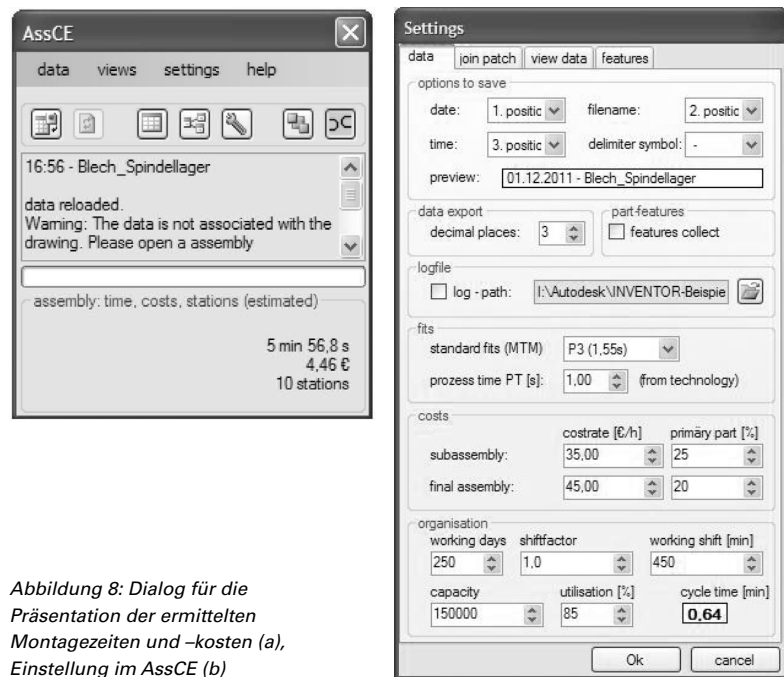


Abbildung 8: Dialog für die Präsentation der ermittelten Montagezeiten und -kosten (a), Einstellung im AssCE (b)

Zur Justierung der Analyseparameter wird ein Dialog bereitgestellt (siehe Abbildung 8 (b)), in dem unter anderem unternehmens- und produktspezifische Werte für die Standardpassung, die Kostensätze sowie die für die Abschätzung der notwendigen Montagestationen notwendigen organisatorischen Daten festgelegt werden.

Anwendungsbeispiel

Abbildung 9 zeigt die Anwendung des entwickelten Programms AssCE am Beispiel eines Spindellagers, welches unter anderem zur Verifikation des Programms verwendet wurde. Bei dem Modell handelt es sich um ein natives Autodesk INVENTOR-Modell. Das Modell ist parametrisch voll definiert und fast alle Toleranzen sind als semantische Informationen mit dem Modell abgelegt. Mit dem Programm AssCE können 44 der 46 Fügestellen automatisch erkannt und die Parameter ermittelt werden. Abbildung 9 zeigt weiterhin den kompakten Dialog für die dauerhafte Präsentation der Analyseergebnisse sowie den erweiterten Dialog für die Auswertung der einzelnen Fügestellen. Über den erweiterten Dialog kann der Konstrukteur die ermittelten Fügestellenparameter bei Bedarf manuell anpassen, sodass die Ermittlung der Montagezeiten und -kosten genauer wird.

Zusammenfassung

Ausgehend vom erweiterten MTM-Verfahren wurde das Programm AssCE entwickelt. Innerhalb des methodischen und programmtechnischen Werkzeugs für den Prozess der Montageplanung IL-MOPLAN (Interaktive Layout- und Montageplanung in Holle 2002) wurden die Parameter und Einflüsse aus dem Produktentwurf (vor allem Toleranzen und Passungen, aber auch Masse, Zielkoordinaten und Fügerichtungen) für die MTM-Codierung und Zeitableitung genutzt und ein direkter Bezug zum Produktentwurf geschaffen. Aus den vorbestimmbaren Zeiten für die PRIMÄR-Montage (aus dem FÜGEN nach MTM) wird über eine Relation zur SEKUNDÄR-Montage eine wahrscheinliche Gesamtzeit errechnet. Die Zuordnung von Prozessdaten (Arbeitszeitfonds, Fertigungsmenge, ...) lässt die Abschätzung der benötigten Montagestationen zu. Die

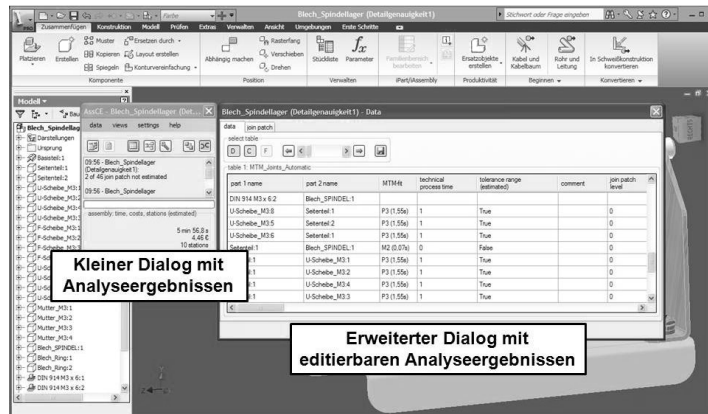


Abbildung 9: Analyseergebnisse für das Spindelager (Konstruktursfassung)

Übergabe der Produktinformationen aus AssCE in die spätere Montageplanung geht erheblich weiter als bei der üblichen Vermittlung von Ergebnissen aus dem Konstruktionsprozess an den Planer z.B. durch Zeichnungen, weil eine direkte rechnergeführte Analyse der Rechnerinterne Darstellung (RID) als Quelle der Planungsinformationen für den Planungsprozess genutzt wird. Damit wird auch eine weiterführende feste Anbindung der Planungsarbeit für Montagen an die Konstruktionsergebnisse geschaffen.

Die Daten aus AssCE werden für die rechnerunterstützte Montageplanung in Dateien bereitgestellt und dann einfach in ILMOPLAN übernommen. Der Datenfluss führt dadurch aus der RID über die Montageplanung bis hin zur automatischen Generierung von Dokumentationen als Listen, Prozessmodelle/Zeichnungen und Unterweisungsvideos. Die direkte Kopplung der Planungsarbeit an CAD-Systeme und die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit erfordert bereits in der Produktentwicklung konsequente 3D-Modellierung im CAD-System sowie eine möglichst weitgehende Beschreibung der konstruktiven Lösung. Leider fehlen in der Praxis oft Toleranzen und Passungen, Materialzuordnungen oder korrekte Komponentenverknüpfungen.

Literaturverzeichnis

- Antis, William; jr., John M. Honeycutt; Koch, Edward N. 1969:
Die MTM-Grundbewegungen. Bd. 1. Düsseldorf: H.B. Maynard & Co.,
- Hilmer, Florian 2010: Ermittlung technologischer Informationen auf Basis parametrischer 3D-CAD-Modelle. Thesis, Medienproduktion
- Höhne, Günter; Husung, Stephan; Lotter, Eberhard; Weber, Christian 2009:
Virtuelle Produktentwicklung unter Nutzung eines audiovisuellen VR-Systems.
In: Konstruktion 10/2009 Nr. 61, S. 52–58
- Holle, Wolfgang 2002: Rechnerunterstützte Montageplanung, Montageplanung und Simultaneous Engineering. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Husung, Stephan; Sander, Martin; Weber, Christian; Höhne, Günter 2008:
Optimierung der CAD-VR Datenaufbereitung zur Erzeugung funktionsrelevanter Modellstrukturen, In: Jürgen Gausemeier, Michael Grafe (Hrsg.) 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, S. 79–93
- Kirchner, Annegret; Husung, Stephan; Krömker, Heidi; Metag, Sebastian 2007:
Functional Investigations of Mechanisms using CAD-modeled Constraints, Proceedings of 10th International Conference on Humans and Computers, Düsseldorf, 2007, University of Aizu, Japan, 13. -15. 12.2007, S. 59–64
- Krause, Werner 2004: Konstruktionselemente der Feinmechanik.
3., stark bearb. Aufl. Ed. München: Hanser.
- Lotter, Bruno 1992: Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2., erw. Aufl. Ed. Düsseldorf: VDI-Verlag
- Lotter, Bruno; Schilling, Werner 1994: Manuelle Montage. Planung – Rationalisierung – Wirtschaftlichkeit. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Weber, Christian; Husung, Stephan 2011: Virtualisation of product development/design – seen from Design Theory and Methodology, Proceedings of 18th International Conference on Engineering Design (ICED'11), S. 226–235

Kontakt

Dipl.-Ing. Stephan Husung
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet Konstruktionstechnik
stephan.husung@tu-ilmenau.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Holle
modest Montage-Design-Studio
holle@modest-suhl.de

Markus Färber, Johannes Ghiletiuc,
Peter Schwarz & Beat Brüderlin

Echtzeit-Visualisierung von sehr großen Virtual- und Augmented-Reality-Szenen auf Smartphones und mobilen Tablet-Computern

1 Einführung und Motivation

Klassische VR/AR-Ausgabegeräte sind meist kopfgetragene Systeme oder 3D-Projektionsanlagen. In bestimmten Anwendungsfällen, zum Beispiel in der Wartung (Schreiber 2011) oder auch in Bauplanung und Bauausführung (Woodward 2011), verbieten sich diese Geräte aufgrund von Arbeitsschutzbestimmungen oder widrigen Einsatzbedingungen. Hier bieten sich Smartphones oder auf ähnlicher Technologie arbeitende Tablett-Computer als Alternative an, insbesondere dann, wenn stereoskopische Darstellung nicht benötigt wird.

In dieser Arbeit wird ein client-server-basiertes Renderingverfahren vorgestellt, das sehr große Polygonmodelle (im Bereich vieler Millionen bis einiger Milliarden an Dreiecken), wie sie aus komplexen CAD-Konstruktionszeichnungen oder Laserscan-Datensätzen abgeleitet werden, in Echtzeit darstellt. Bei diesem Verfahren entfällt die bisher notwendige Umwandlung und Detailreduzierung der Modelle, sodass alle in den Modellen enthaltenen Informationen bei Bedarf auf dem Client-System dargestellt werden können. Das Verfahren beansprucht nur geringe Ressourcen des Clients und stellt keine hohen Anforderungen an seine 3D-Grafikfähigkeiten.

Damit verbleibt genügend Verarbeitungskapazität für andere Aufgaben, wie zum Beispiel Tracking, Augmentierung der Daten, Interaktion, Datenkompression und ähnliches.

Die Interaktion mit dem Client-System erfolgt intuitiv mit Hilfe von Touchscreen-Gesten oder alternativ durch Bewegen des gesamten Geräts, wobei die Daten der Magnetfeld- und Beschleunigungssensoren ausgewertet werden.

2 Bildbasiertes Rendering mit Impostoren

Die Visualisierung einer Szene auf einem Rasterbildschirm ist immer ein approximierender Vorgang. Für jeden Bildpunkt wird ein Farbwert bestimmt, der alle Informationen widerspiegelt, die auf dem Areal des Bildpunktquadrats von der virtuellen Kamera aus zu sehen sind. In der Regel berechnet ein Renderer auch den Abstand des Bildpunkts von der Kamera und speichert ihn in einem separaten Tiefenpuffer, um die Sichtbarkeit zu bestimmen. Die Komplexität des dargestellten Bildes ist konstant und daher für komplexe 3D-Szenen um mehrere Größenordnungen kleiner als die Szene selbst.

Weiterhin ist in vielen Fällen ein in einem Frame darzustellendes Abbild der Szene während der interaktiven Navigation ähnlich wie im vorherigen Frame. Diese zeitliche Kohärenz bewirkt meist, dass viele Szenenteile in beiden Bildern dargestellt werden und nur verhältnismäßig wenig neue Information visualisiert wird.

Immer dann, wenn das Erstellen eines Szenenabbildes sehr viel Aufwand in Anspruch nimmt und auch die Beleuchtung der Szene konstant bleibt, werden approximative Visualisierungstechniken, die die oben beschriebenen Tatsachen ausnutzen, interessant. Der in dieser Arbeit umgesetzte Ansatz beruht darauf, ein für eine Referenzkamerakonfiguration erstelltes 3D-Bild auch für nachfolgende Frames wiederzuverwenden. Dieses Referenzbild wird Impostor genannt, und es existieren viele 3D-Rendering-Systeme, die auf dieser Technik beruhen, zum Beispiel die von Décoret et al. (1999, 2003), Jeschke (2005) oder Wilson und Manocha (2003).

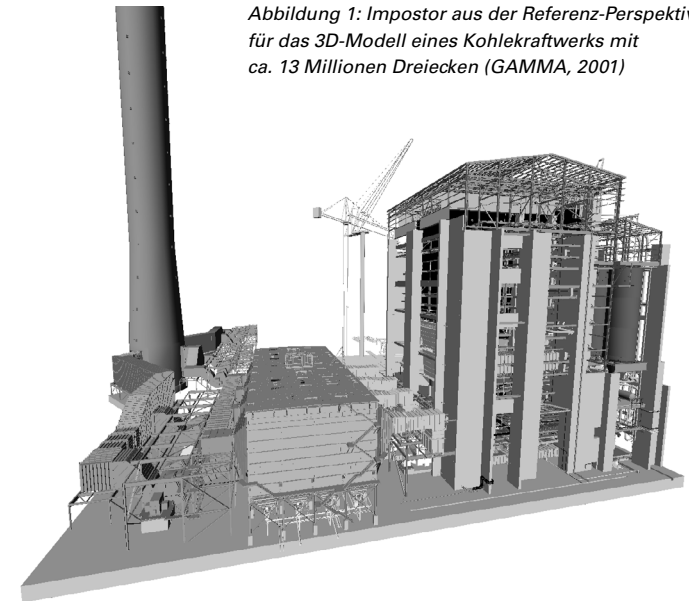


Abbildung 1: Impostor aus der Referenz-Perspektive für das 3D-Modell eines Kohlekraftwerks mit ca. 13 Millionen Dreiecken (GAMMA, 2001)

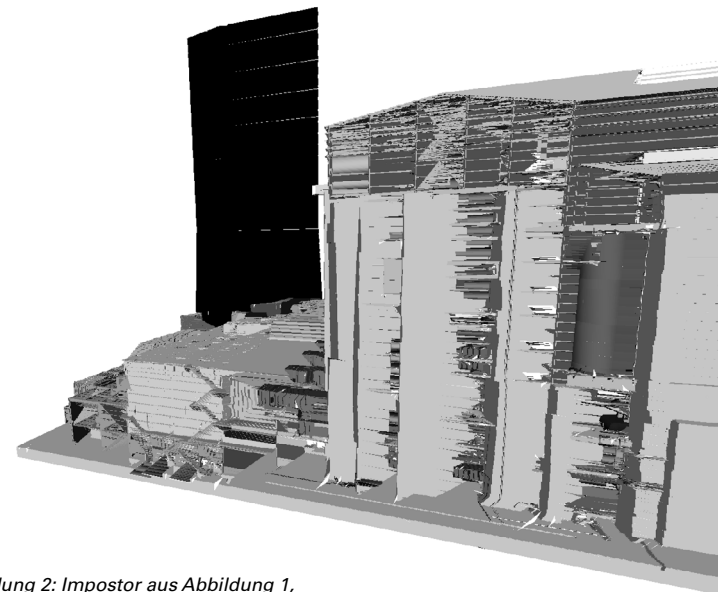


Abbildung 2: Impostor aus Abbildung 1, gesehen aus einer anderen Kamerakonfiguration

Die Grundidee ist hierbei, das Referenzbild und die zugehörigen Tiefenwerte in ein Dreiecksnetz im Objektraum umzuwandeln. Dieser 3D-Screenshot entspricht für die Referenzkamerakonfiguration exakt dem Original-Rendering (Abbildung 1).

Betrachtet man den Impostor aus einer anderen Kameraposition, so erkennt man, dass die Umwandlung des Referenzbildes in ein Dreiecksnetz an einigen Stellen Darstellungsfehler aufweist (Abbildung 2).

Man sieht viele lange, nach rechts gezogene Dreiecke (Skins), die Szenenteile miteinander verbinden, die in den Originaldaten nicht zusammenhängend sind. Diese Dreiecke befinden sich genau an den Stellen, an denen sich der Tiefengradient der Referenzansicht stark ändert (siehe hierzu auch Abbildung 6 weiter unten). An diesen Stellen muss das Impostor-Dreiecksnetz aufgetrennt werden. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe von Kantenerkennungsoperatoren (Ghiletiuc et al. 2010) bewerkstelligt werden. Es zeigt sich jedoch, dass eine einfache Heuristik, die nur das Skalarprodukt von Referenz-Blickrichtung und aus den Tiefenwerten benachbarter Bildpunkten interpolierter Normalenrichtung gegen einen Schwellwert vergleicht, qualitativ bessere Resultate liefert. Abbildung 3 stellt den Impostor aus derselben Kameraposition und -orientierung dar wie Abbildung 2, jedoch wurde das Dreiecksnetz an den Unstetigkeitsstellen aufgetrennt. Die Originalszene wird dadurch wesentlich korrekter wiedergegeben.

In Abbildung 3 sieht man auch, dass nun leere Bereiche aufgedeckt werden, in denen sich Szenenteile befinden, die aus der Referenzansicht nicht sichtbar waren. Es existieren verschiedene Ansätze, diese fehlenden Szenenteile zu ergänzen (Ghiletiuc et al. 2011). Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Impostor-Datenbank verwendet, die eine Anzahl bereits erstellter Impostoren zwischenspeichert und zur Anzeige bereithält. Jeder Impostor besteht aus Impostorfragmenten, und es wird in jedem Frame bestimmt, welche Fragmente aus allen in der Datenbank gehaltenen Impostoren für die aktuelle Kamerakonfiguration gültig sind. Diese werden dann gemeinsam dargestellt.

Abbildung 3: Impostor aus Abbildung 1 mit korrekt erkannten Diskontinuitäten, gesehen aus der Kamerakonfiguration von Abbildung 2

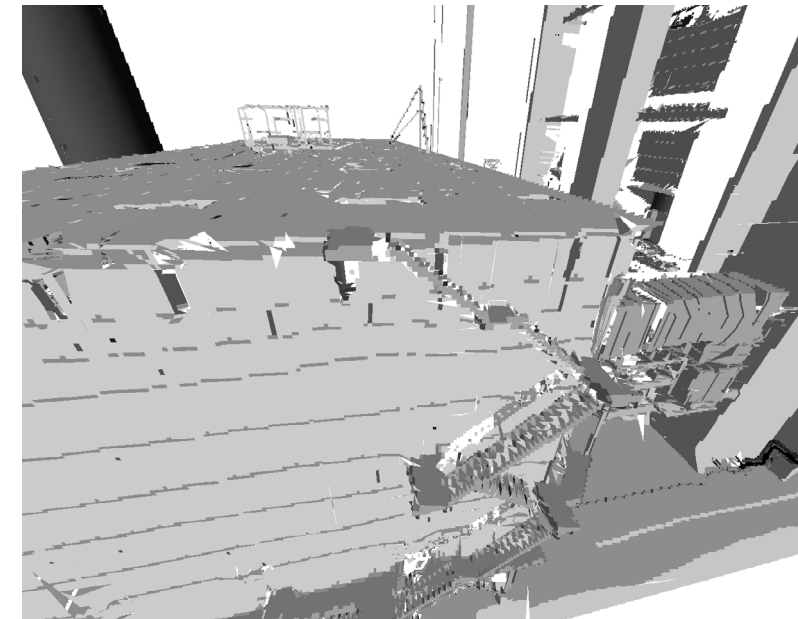
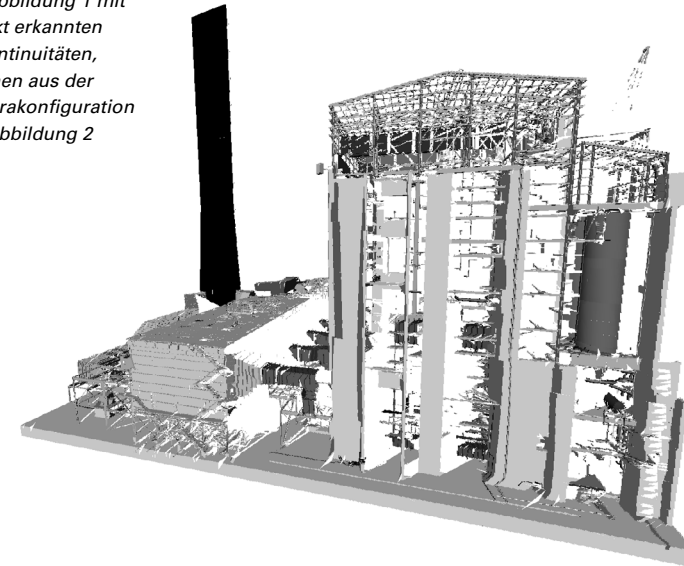


Abbildung 4: Visualisierung des Impostors aus Abbildung 1 aus zu naher Entfernung: Überabtastung des texturierten Dreiecksnetzes

Weiterhin ist die Darstellungsqualität des Impostors abhängig von der Entfernung der virtuellen Kamera. Insbesondere wirkt sich die Annäherung an den Impostor negativ aus. Während bei der Visualisierung des Originalmodells weitere Szenendetails sichtbar werden, bewirkt die Annäherung an den Impostor nur die Darstellung von Überabtastungsartefakten, da die hochaufgelöste Information im Impostor nicht verfügbar ist. Abbildung 4 zeigt hierfür ein Beispiel.

Der Auflösungsfehler lässt sich verringern bzw. ganz vermeiden, indem der gesamte Impostor für ungültig erklärt wird, wenn die aktuelle Kameraposition zu stark von der Referenzkameraposition abweicht. In diesem Fall wird ein neuer Impostor vom Server angefordert.

3 Architektur des Rendering-Systems

Das Rendering-System, genannt Incremental Impostor Streaming, besteht aus einem Server und einem Client, wie in Abbildung 5 dargestellt. Im Unterschied zu videostrombasierten Remote-Rendering-Systemen (Pajak et al. 2011) fordert das Incremental-Impostor-Streaming-System weniger Grafikleistung des Render-Servers, da

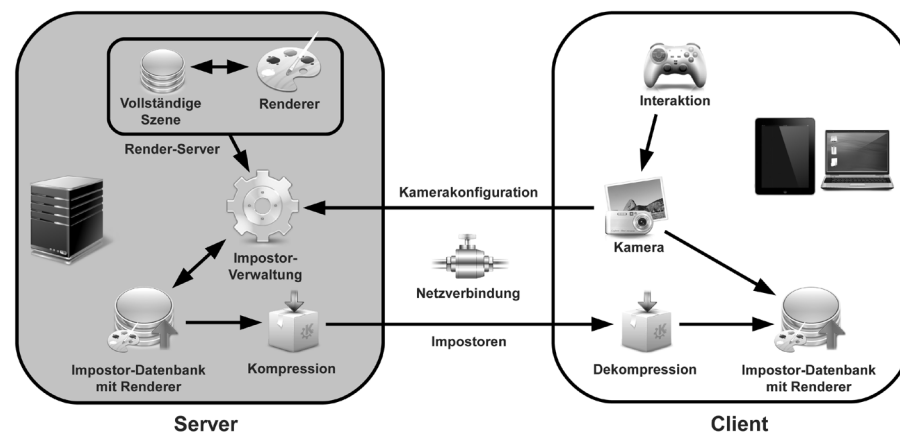


Abbildung 5: Architektur des Incremental-Impostor-Streaming-Systems

nicht in jedem Frame ein Bild erzeugt werden muss. Auch tritt keine Verzögerung zwischen Interaktion und Visualisierung auf, da eine eventuelle Interaktion des Nutzers direkt vom Client bearbeitet wird und nicht erst eine Antwort des Servers abgewartet werden muss. Das Impostor-Streaming-System eignet sich in erster Linie für statische Szenen.

3.1 Server

Auf dem Server werden die Ansichten aus Referenzkamerakonfiguration, die so genannten Impostoren, erstellt und in einer Datenbank verwaltet. Jeder Impostor wird in Form eines Dreiecksnetzes mit einer zugehörigen Textur (Textured Depth Mesh – TDM) gespeichert. Er gibt genau eine vollständige Ansicht der Szene aus einer bestimmten Kamerakonfiguration wieder, siehe Abbildung 6.

In der Wireframe-Darstellung, die mit dem Gradienten der Tiefenwerte unterlegt ist, kann man erkennen, dass das Dreiecksnetz nur in Bereichen hoher Tiefenkomplexität verfeinert wurde. Damit entsteht eine kompakte 3D-Repräsentation des Bildschirminhalts, deren Speicherbedarf durch Festlegung der maximalen Größe der kleinsten Dreiecke gesteuert werden kann. Die Impostorgröße wird entsprechend der Übertragungsbandbreite und der Verarbeitungsleistung des Clients angepasst, damit immer eine Mindestdarstellungsgeschwindigkeit bzw. -qualität erreicht wird. Die kleinsten Rechtecke des Dreiecksnetzes in Abbildung 6 bilden die so genannten Impostorfragmente.

Um einen Impostor zu erstellen, benötigt der Server ausschließlich Farb- und Tiefenpuffer der Szenenansicht. Diese werden mit Hilfe eines leistungsfähigen Visualisierungsservers (Brüderlin et al. 2006) erstellt, der als einziger Systembestandteil vollständigen Zugriff auf das gesamte Polygonmodell hat.

Alle zur Impostorerstellung notwendigen Algorithmen wurden auf der Grafikkarte implementiert. Einen Impostor zu erstellen dauert ca. 15 Millisekunden auf einer Grafikkarte des Typs NVIDIA GeForce GTX 470.

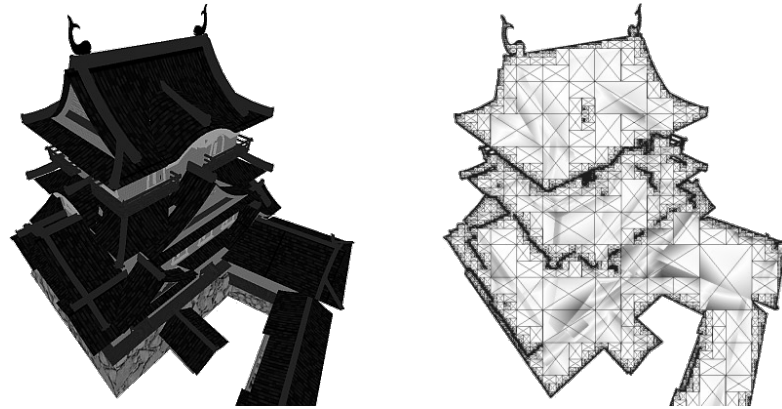


Abbildung 6: Impostor als texturiertes Dreiecksnetz (Textured Depth Mesh): Darstellung mit Texturierung (links) und Wireframe-Darstellung (rechts)

3.2 Client

Der Client wurde als Interactive-Walkthrough-Applikation realisiert und soll als Technologiedemonstrator für eine Virtual- und Augmented-Reality-Lösung dienen. Das System besteht aus drei parallel laufenden Teilen: der kontinuierlichen Visualisierung der jeweils gültigen Impostorfragmente, dem Interaktionssystem zur Steuerung der virtuellen Kamera sowie der Impostordatenbank und -verwaltung mit angeschlossenem Netzwerk-Übertragungssystem. Der Client sendet die folgenden Informationen an den Server:

- Position der virtuellen Kamera
- Blickrichtung der virtuellen Kamera
- Andere Konfigurationsdaten der Kamera (Öffnungswinkel, Seitenverhältnis, Near und Far Plane)
- Dreiecksbudget für die Impostordatenbank auf Client-Seite

Der Client empfängt folgende Daten vom Server:

- Liste der Kennungen der jeweils anzuzeigenden Impostorfragmente
- Texturierte Dreiecksnetze, in Blöcken von Impostorfragmenten

Der Client ist allein für die Visualisierung des jeweils aktuellen Inhalts der Impostordatenbank zuständig. Die Datenbank wird kontinuierlich und asynchron vom Server mit neuen Impostoren versorgt, sofern sich die Kameraeinstellungen signifikant ändern. Zu jedem Zeitpunkt visualisiert der Client alle als gültig gekennzeichneten Impostorfragmente, wobei deren Gültigkeit basierend auf einer Reihe von Heuristiken auf Serverseite bestimmt und regelmäßig an den Client übertragen wird.

4 Implementierung des Smartphone-Clients

Die Implementierung des Client-Systems für Smartphones und Tablet-Computer basiert auf Android Version 2.2 und wurde in Java umgesetzt. Sie ist dafür ausgelegt, auf Geräten verschiedener Leistungsklassen zu arbeiten. Die Lauffähigkeit auf dem Samsung Galaxy Tab ist nachgewiesen. Abbildung 7 zeigt ein Foto des auf diesem System laufenden Clients. Die visualisierten Impostoren bestehen aus ca. 500 Dreiecken. Diese Zahl wird im Mittel immer erreicht, unabhängig davon, aus wie vielen Dreiecken die Originalszene besteht.

4.1 Übertragung und Verwaltung der Impostoren

Die vom Server erstellten und dort in einer Datenbank gehaltenen Impostoren werden per WLAN an den Client übertragen. Hierzu wurde ein platzsparendes Übertragungsprotokoll entwickelt, das Dreiecksnetz und Textur getrennt überträgt, wobei ein verlustloser Kompressionsalgorithmus verwendet wird. Die Übertragung erfolgt in Blöcken von Impostorfragmenten.

Der aktuelle Arbeitssatz an Impostoren wird an den Client übertragen und im Hauptspeicher sowie im Flash-Speicher des Gerätes abgelegt, wobei ungültig gewordene Impostoren erst dann aus dem Speicher entfernt werden, wenn neu nachgeladene Impostoren den Platz beanspruchen. Die Impostorfragmente, die zum aktuellen Zeitpunkt visualisiert werden müssen, werden dann in den Grafikspeicher transferiert, visualisiert und weiter vorgehalten, bis sie durch neue Impostorfragmente ersetzt werden.

4.2 Rendering

Die verschiedenen Smartphones und Tablett-Computer besitzen unterschiedliche 3D-Grafikfähigkeiten. Ebenfalls unterscheiden sich die OpenGL-ES-Implementierungen der verschiedenen Android-Versionen. Aus diesem Grund wurden drei verschiedene Renderer implementiert, basierend jeweils auf OpenGL ES 1.0, OpenGL ES 1.1 und OpenGL ES 2.0. Rendering der Impostoren direkt aus dem Grafikspeicher (per Vertex Buffer Objects) wird verwendet, sofern es von Hardware und OpenGL-ES-Implementierung unterstützt wird.

Das Rendering selbst erfolgt auf die einfachste mögliche Weise: Es wird ausschließlich ein texturiertes Dreiecksnetz dargestellt. Alle Material- und Beleuchtungsinformationen werden ausschließlich auf dem Server berechnet. Sie sind in der Impostortextur enthalten. Der Renderer stellt in jedem Frame die jeweils gültigen Impostorfragmente dar. Zu Beginn sendet er die aktuelle Kamerakonfiguration (Position, Orientierung und andere Parameter, falls diese sich ändern) an den Server. Der Server antwortet umgehend mit einer Liste der Kennungen der für dieses Frame gültigen Impostorfragmente und beginnt, die auf dem Client nicht verfügbaren Impostoren zu senden. Gegebenenfalls müssen die Impostoren erst mit Hilfe des Render-Servers aus der Originalszene erzeugt werden.

Aufgrund der Kohärenz zwischen den verschiedenen Frames eines Interaktionsvorganges – Kameraposition sowie -orientierung ändern sich in der Regel nur in kleinen Schritten – bleibt ein Teil der Impostorfragmente gültig, und der Renderer beginnt sofort, diese darzustellen. Im Hintergrund empfängt ein Thread die neuen Impostoren, speist sie in die clientseitige Datenbank ein und stellt sie zum Rendern zur Verfügung, sodass sich das dargestellte Bild nach und nach vervollständigt. Impostoren sind aufgrund ihrer guten Approximationseigenschaften (Ghiletiuc et al. 2010) vergleichsweise lange gültig, sodass nur bei abrupter Kameraänderung ein völliger Neuaufbau des Bildes erforderlich ist.

4.3 Interaktion

Die Interaktion mit dem Client besteht im Wesentlichen aus einer Logik zur Steuerung der virtuellen Kamera. Zwei Steuerungsmög-



Abbildung 7: Incremental-Impostor-Streaming-Client auf einem Samsung Galaxy Tab: Darstellung des 3D-Modells eines Verkehrsflugzeugs vom Typ Boeing 777 (ca. 350 Millionen Dreiecke, Quell-3D-Daten zur Verfügung gestellt von The Boeing Company)

lichkeiten wurden implementiert, eine, die die Beschleunigungssensoren und den Magnetfeldsensor des Gerätes auswertet und einfache Zeigegesten ermöglicht, sowie eine Touchpad-Steuerung.

Mit Hilfe der in Android eingebauten Auswertungsalgorithmen wird bei der sensorbasierten Steuerung die Orientierung der Kamera im Raum bestimmt. Indem man das Smartphone rechtwinklig zur Erdoberfläche hält und nach links oder rechts dreht, wird die Blickrichtung der Kamera geändert, siehe Abbildung 8. Die Änderung der Kameraposition erfolgt durch Berühren des Touchpads (Abbildung 9). Inspiriert ist diese Art der Interaktion vom Kompassmodus in Google Maps Street View für Android (Google 2008, 2011).

Die von den Sensoren gelieferten Werte sind, abhängig von der Einsatzumgebung, deutlichen Schwankungen unterworfen. Insbesondere im Innenraum kann die Ausgabe des Magnetfeldsensors sehr stark gestört sein. Aus diesem Grund werden die Sensorwerte in einem parallel zum Renderer laufenden Thread mit sehr viel höherer Wiederholrate erfasst und mit Hilfe einer rollenden Durchschnittsberechnung geglättet. Die Glättung wird unterbrochen, sobald eine sehr große sprunghafte Änderung der Sensorwerte gemessen wird, mit dem Ergebnis, dass durch die Glättung schnelle Interaktionen nicht unnötig verzögert werden.

Zusätzlich ist eine reine Touchpad-Steuerung der Kamera implementiert. Einfache Wischgesten bewirken die Rotation der Kamera um die globale x- bzw. y-Achse, während die Verschiebung der Kameraposition mit Hilfe eines unsichtbaren Tastenkreuzes auf dem Touchscreen geschieht. Mit zwei Fingern ausgeführte Gesten bewirken die Bewegung der Kamera in Blickrichtung. In den Abbildungen 9 und 10 ist die Touchpad-Steuerung symbolisch dargestellt. Zur Erleichterung der Orientierung erlaubt das System die Darstellung einer Skybox.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Client-Server-System vorgestellt, mit dem sehr große Polygonmodelle, wie sie aus komplexen CAD-Modellen oder Laserscan-Datensätzen generiert werden, auf Smartphones und Tablett-Systemen dargestellt werden können. Das System kann als Basistechnologie für anspruchsvolle Virtual- und Augmented-Reality-Systeme dienen, da es nur geringe Ressourcen des Clients in Anspruch nimmt und dennoch hochdetaillierte Modelldaten visualisieren kann.

Während auf dem Server auf Anforderung so genannte Impostoren, das sind 3D-Screenshots der darzustellenden Szene, erstellt und verwaltet werden, visualisiert der Client diese Impostoren kontinuierlich und erlaubt so die interaktive Navigation durch die Szene. Einmal generierte Impostoren werden während der Interaktion wiederverwendet, sofern die Einstellungen der virtuellen Kamera nicht zu stark von der Referenzkonfiguration abweichen. Das Impostor-Rendering-Konzept nutzt die Tatsache, dass ein 3D-Screenshot nur einen Bruchteil des Speicherbedarfs und des Visualisierungsaufwandes der Gesamtscene hat und dass während der Navigation die meisten Frames zeitlich kohärent sind.

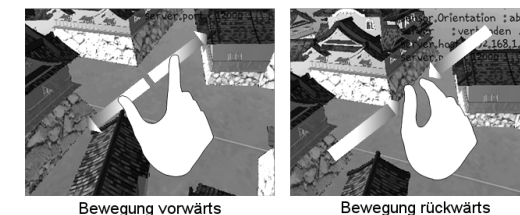
Das Impostor-Streaming-System wird stetig weiterentwickelt. Wichtigstes Ziel ist die Qualitätsverbesserung und damit Verlängerung der Wiederverwendungsdauer der Impostoren, zum Beispiel durch mehrschichtige texturierte Dreiecksnetze (Ghiletiuc et al. 2011) und intelligente Anordnung der Referenzkamerakonfigurationen. Langfristiges Ziel ist die Ertüchtigung des Systems für dynamische Szenen.



Abbildung 8 (oben): Rotation der virtuellen Kamera durch Veränderung der Geräteposition im Raum

Abbildung 9 (Mitte): Bewegung der virtuellen Kamera nach links, rechts, oben und unten durch Berühren des Touchscreens

Abbildung 10 (unten): Rotation und Bewegung in Blickrichtung der virtuellen Kamera per Wischgesten auf dem Touchscreen



Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert von der Graduiertenschule Bildverarbeitung und Bildinterpretation im ProExzellenz-Programm des Thüringer Ministeriums für Bildung, Wissenschaft und Kultur.

Literaturverzeichnis

- Brüderlin, B., Heyer, M., Pfützner, S., 2006: Visibility-guided Rendering to Accelerate 3D Graphics Hardware Performance. In: Kasik, D., Manocha, D., Stephens, A. et al.: Real-time Interactive Massive Model Visualization, Eurographics 2006 Course Notes, Wien.
- Décoret, X., Durand, F., Sillion, F. X., Dorsey, J., 2003: Billboard Clouds for Extreme Model Simplification. In: SIGGRAPH '03 Papers, 689–696.
- Décoret, X., Sillion, F., Schaufler, G., Dorsey, J., 1999: Multi-layered Impostors for Accelerated Rendering. In: Computer Graphics Forum, 18(3), 61–73.
- Ghiletiuc, J., Färber, M., Brüderlin, B., 2010: A Highly Scalable Image-Based Remote Rendering Framework. In: 9. Paderborner Workshop: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung, 317–330, Paderborn.
- Ghiletiuc, J., Färber, M., Brüderlin, B., 2011: Bildbasiertes Echtzeit-3D-Rendering mit Hilfe von mehrschichtigen Impostoren. In: 10. Paderborner Workshop: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung, 171–184, Paderborn.
- GAMMA Research Group, University of North Carolina, 2001: Power Plant Model. <http://gamma.cs.unc.edu/POWERPLANT>, 19.03.2001, abgerufen am 10.02.2012.
- Google Inc., 2011: Google Maps für Handys in 3D. <http://www.google.de/mobile/maps>, abgerufen am 8.1.2012.
- Google Inc., 2008: Google Maps on Android. <http://www.youtube.com/watch?v=YFw9p0TjT8>, 30.09.2008, abgerufen am 8.1.2012
- Heyer, M., Pfützner, S., Brüderlin, B., 2005: Visualization Server for Very Large Virtual Reality Scenes. In: 4. Paderborner Workshop: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn.
- Jeschke, S., 2005: Accelerating the Rendering Process using Impostors. Dissertation, Technische Universität Wien.
- Klein, G., Murray, D., 2009: Parallel Tracking and Mapping on a Camera Phone. In: Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2009), Orlando, Florida.
- Pajak, D., Herzog, R., Eisemann, E., Myszkowski, K., Seidel, H.-P., 2011: Scalable Remote Rendering with Depth and Motion-flow Augmented Streaming. In: Computer Graphics Forum, 30(2), 415–424.

- Papagiannakis, G., Singh, G., Magnenat-Thalmann, N., 2008: A Survey of Mobile and Wireless Technologies for Augmented Reality Systems. In: Computer Animation and Virtual Worlds, 19(1), 3–22.
- Schmalstieg, D., Wagner, D., 2007: Experiences with Handheld Augmented Reality. In: Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007), Nara, Japan.
- Schreiber, W., Zimmermann, P. (Hrsg.), 2011: Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld: Das AVILUS-Projekt – Technologien und Anwendungen. Berlin: Springer.
- Wilson, A., Manocha, D., 2003: Simplifying Complex Environments using Incremental Textured Depth Meshes. In: SIGGRAPH '03 Paper, 678–688.
- Woodward, C., Hakkarainen, M., 2011: Mobile Augmented Reality System for Construction Site Visualization. In: Proceedings of the ISMAR 2011 Workshop on Enabling Large-Scale Outdoor Mixed Reality and Augmented Reality, Basel.

Kontakt

Dipl.-Inf. Markus Färber
Markus.Faerber@tu-ilmenau.de

Dipl.-Inf. Johannes Ghiletiuc
Johannes.Ghiletiuc@tu-ilmenau.de

Peter Schwarz
Peter.Schwarz@tu-ilmenau.de

Prof. Dr. sc. techn. Beat Brüderlin
Beat.Brüderlin@tu-ilmenau.de

Technische Universität Ilmenau
 Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung
 Postfach 100 565
 98684 Ilmenau
www.tu-ilmenau.de/gdv

Graduiertenschule Bildverarbeitung und Bildinterpretation
www.tu-ilmenau.de/gs-ipii

Quo vadis, FEM?

1 Prolog

Seitdem die Methode der Finiten Elemente dank der rapiden Fortschritte der Hard- und Softwareentwicklung ihr anfängliches Nischendasein aufgeben konnte, ist sie zu einem unverzichtbaren Werkzeug der Produktentwicklung geworden. Anwenderseitig wurde mit dieser Entwicklung jedoch nicht immer Schritt gehalten. Anstelle der wenigen Spezialisten früherer Jahre nutzt inzwischen beinahe jeder, der über die entsprechenden Programme verfügt, die FEM, mit zuweilen zweifelhaften Resultaten – »*The stark reality is that probably the majority of users are blissfully unaware that their analyses are invalid.*« (Horspool 2010). In diesem Beitrag wird die aktuelle Anwendungssituation untersucht, und es werden Ausbildungskonzepte vorgestellt, die zu besseren und sichereren Analysen führen sollen. In den folgenden drei kleinen Szenarien sind zur Einstimmung typische Fehlschlüsse – ein wenig überzogen – dargestellt.

1.1 Von Tortenstücken und Löffelbiscuits

Immer wieder beliebt ist die Vernetzung von Kreisen durch viereckige Elemente, die in der Mitte zu Tortenstücken entarten. Es sieht sehr regelmäßig und symmetrisch aus, genügt also den üblichen ästhetischen Ansprüchen. Numerisch nachteilig ist die Singularität im Kreismittelpunkt. Die Alternative, die Kreisfläche mit einem quad-dominanten *Freemesh* zu vernetzen, ist wegen der Unregelmäßigkeit des Netzes weit weniger beliebt, obwohl die Ergebnisse dank ausgeglichener Elementgeometrien besser sein dürften.

Die geradezu krampfhaft Beschränkung auf die Idee des *mapped mesh* liefert zwar stets hexaedrische Elemente, ihre Geometrie weicht in unglücklichen Konstellationen aber oft erheblich von der idealen Würfelform ab. Es entstehen Elemente, bei denen eine oder zwei Lineardimensionen erheblich kleiner sind als der Rest. Das Ergebnis sind sehr flache oder sehr längliche Elemente. Natürlich sind solche seltsamen Elemente in nicht relevanten Bereichen kein Problem, aber die gern gestellte Frage, ob das nun gut oder schlecht sei, ist ohne solche Zusatzinformationen nicht zu beantworten.

1.2 Der horror trianguli

Die Angst vor Dreieckselementen ist legendär. Sie beruht auf dem grundsätzlich richtigen Gedanken, dass Dreieckselemente und Tetraeder ohne Seitenmittelpunktsknoten zu steif sind. Das ist korrekt, muss aber dahingehend relativiert werden, dass die modernen Netzgeneratoren in der Regel nur noch *vernünftige* Dreiecke/Tetraeder mit Seitenmittelpunktsknoten produzieren. Und selbst wenn irreguläre Netze mehr Rechenzeit benötigen sollten als gemappte – ein mit extremen Anpassungen *erzwungenes* Hexaedernetz mit seltsamer Elementgeometrie liefert nicht automatisch die besseren Ergebnisse.

1.3 Spannend, nicht wahr?

Die Auswertung von FEM-Ergebnissen ist ein Quell beständiger Freude. Selbst von durchaus renommierten Wissenschaftlern kann man die Bemerkung *»Da ist ja alles rot. Das hält nicht.«* hören. Hier ist der Übeltäter die standardmäßige automatische Skalierung von Spannungslegenden auf Minimal-/Maximalwerte. Unterschiedliche Spannungsniveaus aus verschiedenen Lastfällen sind damit nicht wirklich vergleichbar. Sehr aufschlussreich ist auch die übliche Beschränkung auf Vergleichsspannungen. Man erhält so zwar eine ungefähre Vorstellung des Bauteilverhaltens, aber letztlich sind es die Spannungsponenten, auf die es ankommt. Zitat eines echten Experten: *»Am besten hätte man nur Hauptspannungs-kreuze, ohne Farbe.«*

2 Historisches und Aktuelles

Historisch ist die FEM als ein Werkzeug für Spezialisten entstanden. Diesen Charakter hat sie lange beibehalten, bis durch die Entwicklung der grafischen Benutzungsoberflächen und die darauf aufsetzende Teilintegration in CAD-Systeme ihre Verbreitung deutlich zunahm. Die vermeintlich einfache Bedienung hat zur Folge, dass FEM-Analysen für jedermann zugänglich sind. Berechnungen mittels der FEM werden als ebenso selbstverständlich angesehen wie die traditionellen, so genannten analytischen Methoden. Dass ein fundamentaler Unterschied zwischen diesen Ansätzen allein schon darin liegt, dass die Ergebnisse aus der FEM grundsätzlich eine Anwenderabhängigkeit enthalten, wohingegen traditionelle Berechnungsvorschriften vollständig reproduzierbar sind, wird geflissentlich ignoriert.

Weil die Programme funktionieren und stets Ergebnisse liefern, werden sie genutzt. Sie gelten als glaubwürdig, weil sie von den Herstellern als validiert angeboten werden. Die pessimistische Erfahrung zeigt, dass die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse einfach hingenommen werden, mit allen Fehlschlüssen, die denkbar sind – *»Der Computer hat gesagt ... also stimmt es.«*

Das Grundproblem besteht darin, dass die FEM zwar durchaus in den Curricula der meisten technisch orientierten Hochschulen enthalten ist, jedoch nicht immer den Zeitrahmen erhält, der erforderlich ist, um den Umgang mit diesem Werkzeug wirklich zu beherrschen. So entsteht ein ungesundes Halbwissen! Die FEM kann man nicht erfolgreich aus Büchern lernen, sondern man braucht ständige intensive Übung, bis man hinreichend sicher ist. Das ist in den allgemeinen Studiengängen nicht immer so vorgesehen.

Angesichts der unbestreitbaren Vorteile, die mit der Anwendung der FEM verbunden sind, hieße es, das Kind mit dem Bade auszuschütten, wenn man nun aus der FEM-Anwendung wieder eine Geheimwissenschaft machen wollte, um die häufig leichtfertigen, nur rudimentär geübten Nutzer auszuschließen. Das Heilmittel kann hier wie immer im Grunde nur die Verbesserung der Ausbildungssituation sein.

3 Kompetenz und Vermittlung

Es besteht kaum ein Zweifel daran, dass Grundkenntnisse der FEM zum Rüstzeug der Absolventen aus dem Bereich der Konstruktionstechnik gehören. Es gilt umso mehr, als ein Ziel des Bachelorschlusses die Berufsfähigkeit sein sollte, ein Praxisbezug mithin unverzichtbar ist.

Die klassischen universitären FEM-Kurse bieten dabei ein recht einheitliches Bild. Traditionell sind sie oft an den Mechaniklehrstühlen angesiedelt und deshalb eher theoretisch ausgerichtet. Sie orientieren sich an den mathematisch-physikalischen Grundlagen, beschreiben vielleicht sogar den Aufbau von FE-Software, lassen aber letztlich die Teilnehmer im Stich, wenn es um die Fragen der konkreten Umsetzung geht. Ein praktisches Grundproblem ist dabei die Frage, mit welchem System im Übungsbetrieb gearbeitet werden soll. Die Nutzung kommerzieller Software hat den Makel, oft zu programm-spezifisch zu sein und damit eine unerwünschte Prägung der Studierenden zu veranlassen. Eine weitere Unzulänglichkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass die erwähnten Mechaniklehrstühle traditionell vorwiegend Fachwerke und Balkentragwerke behandeln, manchmal darüber hinausgehend auch Plattenstrukturen. Die 3D-CAD-Orientierung der modernen Konstruktionstechnik mit der Notwendigkeit, volumenbehaftete Kontinuumselemente zu verwenden, ist in diesen Denkmodellen nicht vorgesehen, und die typischen Probleme des Imports von CAD-Modellen werden kaum je besprochen.

Eine dazu komplementäre Form der FEM-Ausbildung wird von den Softwareherstellern angeboten. In der Regel werden die Highlights der jeweiligen Programme vorgestellt und einige einfache Beispielaufgaben vorgeführt. Meistens sind die Kurse *workshopartig* organisiert. In derartigen Kompaktkursen bleibt dennoch wegen ihrer geringen Dauer für das Sammeln eigener Erfahrungen meist zu wenig Zeit, daher taugen sie im Grunde nur für Anwender mit guten Vorkenntnissen. Zur Ehrenrettung dieser Form der Ausbildung sei gesagt, dass sie die Vermittlung des einschlägigen Grundwissens nicht leisten kann und soll. Sie findet typischerweise nach dem Eintritt ins Berufsleben statt. Sinnvoll können solche Kurse daher nur sein, wenn bereits gute Basiskenntnisse vorhanden sind. Außer Frage

steht dagegen der Wert von speziellen Erweiterungskursen, in denen Lösungen für komplexe Problemstellungen erarbeitet werden.

4 Wie kann man es besser machen?

Eine gute FEM-Ausbildung sollte so gestaltet sein, dass ihre Absolventen in der Lage sind, *selbstständig* eine *qualifizierte* FEM-Analyse durchzuführen. Sie müssen also die Idee der geometrischen Diskretisierung verstehen, Randbedingungen und äußere Lasten korrekt formulieren und aus der Ergebnismenge die relevanten Daten extrahieren können. Für den Standardanwender verzichtbar ist dagegen alles, was mit Programmierung zu tun hat. Normalerweise werden in der industriellen Praxis weder neue Elemente noch neuartige Materialgesetze entwickelt. Bei aller Bedeutung des wissenschaftlichen Ansatzes liegt der Schwerpunkt der FEM in der Anwendung. Aus diesem Grunde sollte die Basis der FEM-Ausbildung wie oben erwähnt bereits im Bachelorstudium angesiedelt sein.

4.1 Das absolute Minimum

Der stark gedrängte und sehr verschulte Bachelorstudiengang lässt nur wenige Freiräume für vertiefende Lehrveranstaltungen. Zwar wird häufig als Ergänzung zu den Mechanikvorlesungen eine FEM-Veranstaltung angeboten, die jedoch meist zu theorielastig ist. Ein Minimalkonzept sollte die FEM eher im Bereich der Maschinenkonstruktion/Festigkeitslehre verorten. Hierbei ist zumindest der Bezug zu konkreten Bauteilen leichter zu sichern. Ein in zeitlicher Hinsicht extrem minimalistischer Vorschlag müsste zwei Vorlesungseinheiten à 90 Minuten, ein Tutorium im Hörsaal und wenigstens eine neunzigminütige Übung umfassen. Eine Idee für die Verteilung der Inhalte kann man der Tabelle 1 entnehmen.

4.2 Was möglich sein sollte

Angesichts der Bedeutung der FEM zur Bauteildimensionierung ist eine separate, ausschließlich der FEM gewidmete Lehrveranstaltung ein vernünftiger Kompromiss. Sie sollte einen Umfang von 2+1, besser 2+2 (V+Ü) Semesterwochenstunden haben. Besonders wichtig sind hierbei die Übungen, in denen die Teilnehmer konkrete Aufgaben bearbeiten sollen. Diese sollten auch testiert werden,

| Veranstaltungsteil | Inhalt |
|--------------------|---|
| Vorlesung 1 | Bauteilgeometrie und Diskretisierung Vereinfachungsregeln Richtlinien zur Elementierung Beispiele aus der Praxis |
| Vorlesung 2 | Fesselungen und äußere La sten Geometriebezug Ergebnisse und ihre Interpretation Darstellung und Präsentation |
| Tutorium | Kurzeinführung in ein einfach bedienbares (lineares) FEM-System [falls möglich: Studenten-/Demoversion] |
| Übung | Import einer einfachen Geometrie aus CAD FE-Analyse mit wenigstens zwei Lastfällen |

Tabelle 1: Minimalkonzept für die FEM-Ausbildung

um den Lernerfolg, also den Erwerb der notwendigen Erfahrungen, abzusichern. Problematisch ist dabei natürlich der personelle Aufwand. Bei einer Teilnehmerzahl von etwa 20 mag ein einzelner geschulter Betreuer ausreichen. Veranstaltungen mit mehr als 100 aktiven Teilnehmern, wie sie der Autor seit zwei Jahren erleben darf, sind in dieser Hinsicht schwieriger durchzuführen. Für eine gute Betreuung ist deutlich mehr Personal oder die Aufteilung in mehrere kleine Übungsgruppen erforderlich. Diese Situation lässt sich etwas lindern durch die Anfertigung von Hausaufgaben, die quasi offline bearbeitet und durch den Dozenten und seine Mitarbeiter testiert werden. Bei einer einsemestrigen Lehrveranstaltung dürfen die Inhalte selbstverständlich etwas üppiger ausfallen als beim Minimalkonzept.

Sehr zu empfehlen ist ein kurzer theoretischer Teil über die mathematischen Grundlagen. Darunter ist keinesfalls die häufig anzutreffende ausgiebige Wieder-holung von Vektor- und Matrizenrechnung

zu verstehen, sondern eine solide Erklärung des Diskretisierungs- und Approximationscharakters der FEM einschließlich der daraus resultierenden Konsequenzen. Damit sollte das Verständnis für die Methode gesichert sein. Der Modellbildung muss großzügig Raum gegeben werden. An oberster Stelle stehen Import und Aufbereitung von 3D-CAD-Bauteilen. Hier muss der Einfluss möglicher Vereinfachungen ebenso untersucht werden wie die Auswahl der zu verwendenden Elementtypen und die Vernetzungsqualität. Wie beim Minimalkonzept ist die klare Beschreibung von Fesselungen und äußeren Lasten ein wesentlicher Bestandteil. Auf Materialnicht-linearitäten – vor allem plastisches Verhalten – und Kontaktprobleme darf keinesfalls verzichtet werden. Die Interpretation/Bewertung der Ergebnisse sollte um Präsentationstechniken erweitert werden. Die Resultate einer FE-Analyse sind im Gegensatz zu häufig anzutreffenden Ansichten keineswegs selbsterklärend. Das ergibt sich bereits aus der Tatsache, dass traditionelle Berechnungsverfahren eine kleine Anzahl klar definierter Kenngrößen liefern, die FEM dagegen über die Bauteilgeometrie verteilte Werte, aus denen die relevanten Daten abgeleitet werden müssen. Dieser Verdichtungsprozess erfordert ein tiefgehendes mechanisches Verständnis, er ist stets auch eine Interpretation. Interessanterweise schweigen sich viele Lehrbücher gerade dazu weitestgehend aus. Klar ist jedenfalls, dass die schlichte Betrachtung von einzelnen Extremwerten nicht ausreicht, selbst wenn diese in den Postprozessen gerne besonders herausgestellt werden.

Tabelle 2 vermittelt einen ungefähren Eindruck der Aufteilung der Wunschinhalte innerhalb des Semesters einschließlich möglicher Aufgabenstellungen für die Übungen.

Sehr wünschenswert, in der universitären Lehrpraxis aber nicht leicht zu realisieren, ist die Abstimmung der Übungen mit parallelen Lehrveranstaltungen. Damit wäre es möglich, einen Vergleich von FEM-Analysen mit konventionellen, analytischen Verfahren durchzuführen. Dankbare Objekte sind Zahneingriffe, einfache Gehäuse, Druckbehälter mit Stützen oder Federn.

| Vorlesungsinhalte | Übungen | |
|-------------------------|---|---|
| Theorie | Differentialgleichungen Diskretisierungsprinzipien Approximation | |
| Traditionelle Phasen | Preprozessor, Solver, Postprozessor Softwarekonzepte | Tutorium für ein einfaches Programm |
| Modellbildung | Geometrie als Basis Notwendigkeit der Aufbereitung und Vereinfachung Randbedingungen (Festlegungen und äußere Lasten) | Einfache Bauteile Punktlasten vs. verteilte Lasten |
| Elementierung | Elementtypen Richtlinien zur Vernetzung Netzqualität | Vergleich verschiedener Netze |
| Geometriemodelle | Import von CAD-Geometrien Berechnungsgerechte Aufbereitung | Vorgabe einer komplexen Geometrie |
| Nichtlineares Verhalten | Materialnichtlinearität Kontaktprobleme Geometrische Nichtlinearität | Einfacher Tiefziehvorgang |
| Ergebnisauswertung | Interpretation Extraktion relevanter Daten Darstellung von Ergebnissen | Vergleich mit traditionellen Ergebnissen |
| Optional | Eigenfrequenzen, Eigenformen Automatismen: Adaptive Vernetzung | |

Tabelle 2: Verteilung des Lehrstoffs über ein Semester

4.3 Optimal?

Die Wunschvorstellung der FEM-Experten ist natürlich eine in Bachelor- und Masterphase durchgängige Ausbildung. Wenn eine derartige Idee realisiert werden soll, setzt sie mindestens die in 4.2 als möglich vorgestellte Lehrveranstaltung voraus.

Als wesentliche Ergänzung sollte eine theoriebezogene, eher mechanikorientierte Grundlagenvorlesung angeboten werden. Sie muss zwingend die Vermittlung der grundlegenden Differentialgleichungen und Variationsprinzipien enthalten. Dazu gehört ebenso der Übergang zum diskreten Gleichungssystem in seiner allgemeinen Formulierung als beste Approximation. Weiter sollten erweiterte

Balkentheorien und die Besonderheiten der Beschreibung durch Schalen betrachtet werden, zusätzlich modale Ansätze und darauf aufbauend die Behandlung transienter Vorgänge.

Wenn diese durchaus anspruchsvolle Lehrveranstaltung schon im Bachelorstudium angeboten wird, sollte sie zwingend die Voraussetzung für die eher praxisorientierte Vorlesung aus 4.2 sein, die dann im Theorieteil deutlich gekürzt werden kann und dafür um die Bearbeitung dynamischer Problemstellungen erweitert werden könnte, alternativ ist auch die Bearbeitung einer größeren Anzahl von Aufgaben vorstellbar, also eine Erhöhung des Übungsanteils.

Für das Masterstudium bietet sich dem gegenüber eine generalisierte FE-Vorlesung an. Sie sollte vor allem den allgemeingültigen Charakter der FEM als universelles Lösungsverfahren für beinahe alle Feldprobleme der Physik herausstellen. Als einfachste Erweiterung sind Wärmeleitungsprobleme – stationär und transient – anzusehen, insbesondere auch im Verbund mit den klassischen elastomechanischen Problemen über die Wärmedehnungen. Ähnlich interessant dürften Strömungsprobleme sein, hier auch als *fluid-structure-interaction*.

Eine weitere interessante Ergänzung könnte ein Abschnitt zu Programmiererweiterungen sein, in dem beispielsweise Materialgesetze entwickelt werden. Angesichts der zunehmenden Bedeutung von Optimierungen für die Produktentwicklungen können in einer derartigen Veranstaltung für Fortgeschrittene auch FEM-bezogene Topologie-, Struktur- und Formoptimierungstechniken behandelt werden.

Als Alternative ist es auch vorstellbar, die ergänzende Theorievorlesung aus dem Bachelorstudium in das Masterstudium zu verschieben. In diesem Fall würde die praxisorientierte FEM-Vorlesung im Bachelorstudium vollständig dem vorgestellten Konzept ohne Kürzungen im Theorieteil entsprechen. In den Übungen zur generalisierten FE-Vorlesung sollte dann der Umgang mit den üblichen Softwareprodukten stärker aufgefrischt werden.

5 Die Frage nach dem Lehr- und Lernmaterial

Die Methode der Finiten Elemente hat einen durchaus janusköpfigen Charakter. Auf der einen Seite ist sie entschieden abstrakt, theoretisch und durch eine extrem anspruchsvolle Mathematik geprägt. Auf der anderen Seite ist sie anschaulich und in ihrer Anwendung sehr einfach zu erfassen.

Die marktgängigen Lehrbücher spiegeln diese Situation wider. Vorab sei darauf hingewiesen, dass die im Folgenden zitierten Werke ein zwar willkürliche, aber nach Ansicht des Autors durchaus typische Auswahl aus dem fast unüberschaubaren Literaturspektrum bilden. Sollte dem Leser also ein liebgewordenes Werk fehlen oder ein hier Benanntes als irrelevant angesehen werden, ist das dem Autor dieses Beitrags anzulasten.

Alle anspruchsvolleren Monographien behandeln den mathematisch-mechanischen Formalismus in voller Allgemeinheit. Oft werden – gerade bei den Klassikern – zusätzlich Programmfragmente vorgestellt (Bathe 1986, Knothe 2007). Die nach Auffassung des Autors extremste Lehrbuchversion ist das Werk Goering 2010, das sich an Anfänger (sic!) richtet und die komplette Approximationstheorie in speziellen Funktionenräumen behandelt. Das alles ist korrekt, hilft jedoch dem mit einer konkreten Aufgabe beglückten Anwender überhaupt nicht weiter. Das andere Extrem wird durch die Tutorials und Kursunterlagen der verschiedenen Softwareprodukte verkörpert, die viele schöne Beispiele bieten, die sich gut nachvollziehen lassen, jedoch keinerlei Hinweis auf das allgemeine Vorgehen bieten. Gangbare Kompromisse sind nur in Form der Kombination mehrerer Lehrbücher möglich. Aus Kostengründen ist dies allerdings wenig studentenfreundlich.

Literaturempfehlungen für das Minimalkonzept aus 4.1 sind wenig sinnvoll. Für die Variante aus 4.2 hat sich in den Veranstaltungen des Autors als preisgünstiger Kompromiss das Buch von Klein (Klein 2007) zusammen mit der so genannten FEM-Formelsammlung (Nasdala 2010) bewährt. Ersteres behandelt trotz seines überschaubaren Umfangs auch nichtlineares Verhalten, letzteres geht mit seinen Empfehlungen zur Vorgehensweise über ein einfaches Nach-

schlagewerk deutlich hinaus. Letztlich bleibt es dennoch immer der Entscheidung des Dozenten überlassen, welche Empfehlungen er seinen Studierenden gibt.

Lernen enthält stets auch eine aktive Übungskomponente. Im Falle der FEM wird hierzu ein geeignetes Programmpaket benötigt. Die am einfachsten erscheinende Lösung geht von der akademischen Version einer marktgängigen FEM-Software aus. Abhängig vom Budget und dem Verhandlungsgeschick der Universität lassen sich mehr oder weniger sinnvolle Systeme konfigurieren. Eine Alternative könnte die Verwendung freier Software sein. Dem ist allerdings entgegenzuhalten, dass viele der einschlägigen Freewareprodukte in etlichen durchaus zentralen Details nach wie vor höheren professionellen (industrietauglichen) Ansprüchen nicht genügen können.

An dieser Stelle soll die Nennung konkreter Produktnamen unterbleiben. Grundsätzlich ist es gleichgültig, mit welcher Software die praktische Ausbildung in den Übungen erfolgt. Minimal ist entsprechend den heutigen betrieblichen Anforderungen eine grafische Benutzungsoberfläche zu fordern (damit fallen viele Programm-bibliotheken aus dem Freeware-Bereich durch das Raster). Wegen der CAD-Zentrierung der Ausbildung in der Konstruktionstechnik müssen die einschlägigen Geometrieschnittstellen (IGES, STEP) vorhanden sein. Darüber hinaus muss der verwendete Preprozessor komfortable Manipulationsfunktionen bieten (Defeaturing, Lückenschluss etc.). Werden wie meist üblich kommerzielle Produkte genutzt, ist darauf zu achten, dass es (ggf. eingeschränkte) Studentenversionen gibt oder besser, ein Zugriff vom Heimrechner aus, z.B. via VPN, möglich ist.

6 Ende offen? Ein vorläufiges Fazit

Alle hier angestellten Betrachtungen sind zutiefst persönlich geprägt. Sie entstammen der inzwischen gut dreißigjährigen Erfahrung des Autors mit der FEM sowohl in konkreten Anwendungen als auch in der Lehre. Die Motivation für diesen Beitrag entstand, als im Laufe der letzten zwei Jahre gehäuft Anfragen zu im Grunde banalen Problemen bei der Nutzung der FEM gestellt wurden. Unter

dem Aspekt, dass ein großer Teil der Fragen von ehemaligen Hörern des Autors kam, stellte sich zunächst die Frage nach dem *Warum*. Warum ist von dem vermittelten Wissen so wenig übriggeblieben? Warum sind die praktischen Erfahrungen aus den Übungen wieder verblasst?

Die nächstliegende Erklärung für diese Phänomene wäre die – zu geringe! – Qualität der Lehre. Damit lässt sich aber das vom Autor durchaus so empfundene *Desaster* nicht vollständig erklären. Einen guten Hinweis gibt die in den letzten Jahren zu beobachtende Überfüllung der Lehrveranstaltung. Die bereits weiter oben erwähnte drastische Steigerung der Teilnehmerzahl von 10 bis 20 auf deutlich mehr als 100 hatte in der Tat zur Folge, dass das ursprüngliche workshopartige Lehrkonzept mit intensiv betreuten Übungen nicht mehr durchzuhalten war, da die universitären Ressourcen unverändert blieben. Damit war der Mangel an *learning by doing* als eine Hauptursache ausgemacht. Ohne Training bleibt nur wenig im Gedächtnis hängen, vor allem, wenn es um praktische Fertigkeiten geht.

Gleichzeitig wurden auch die Lehrinhalte und die Art der Vermittlung einer kritischen Untersuchung unterzogen. Dazu erwies sich die neue Evaluierung der Lehrveranstaltung gerade durch die Freitextbemerkungen der Teilnehmer als hilfreich (für Lehrveranstaltungen mit weniger als 20 Teilnehmern war keine Evaluierung vorgesehen, so dass aus früheren Jahren keine derartigen Auswertungen vorliegen).

Auf diese Weise wurde es möglich, die typischen Verständnisprobleme beim Erlernen der FEM zu identifizieren. Diese sind in die vorgeschlagenen Konzepte eingeflossen und haben die Auswahl der unverzichtbaren Inhalte nachhaltig beeinflusst, ebenso wie sie die Notwendigkeit der praktischen Übungen begründet haben.

Wie soll die Zukunft der FEM aussehen? Aus unseren Überlegungen ergibt sich, dass man die FEM weder den *Selbstlernkräften* der Studierenden noch den *a posteriori* Schulungen der Systemanbieter überlassen darf. Ein sicheres Fundament muss bereits in der Hochschulausbildung gesetzt werden. Wie dies geschehen kann, sollte aus den vorgestellten Konzepten ersichtlich sein.

Der Autor möchte nicht versäumen, alle Lehrenden, die sich durch einige drastische, vielleicht auch polemisch formulierte Aussagen verletzt fühlen könnten, vorsorglich um Entschuldigung zu bitten. Ein großer Teil der beschriebenen Schwierigkeiten bleibt nach wie vor der Situation geschuldet, dass die FEM-Ausbildung oft aus organisatorischen oder budgetbedingten Gründen den Anforderungen der späteren Nutzer nicht folgen kann.

Literaturverzeichnis

- Horspool, J. 2010: Best and Worst Practices. http://roshaz.com/images/FEA_best_and_worst_practice.pdf, abgerufen am 10.3.2012
- Bathe, K.-J. 2002: Finite-Elemente-Methoden. Springer: Berlin
- Knothe, K. & Wessels, H. 2007: Finite Elemente. Eine Einführung für Ingenieure. Springer: Berlin
- Goering, H., Roos, H.-G. & Tobiska, L. 2010: Die Finite-Elemente-Methode für Anfänger. Wiley-VCH: Weinheim
- Klein, B. 2007: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Vieweg: Wiesbaden
- Nasdala, L. 2010: FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks. Vieweg+Teubner: Wiesbaden

Kontakt

Dr.-Ing. Hans-Peter Prüfer
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Petra Hoske, Günter Kunze, Kai Bürkle,
Martin Schmauder, Mark Brütting & Christian Böser

Interaktiver Simulator für mobile Arbeitsmaschinen – Virtuelle Prototypen im Einsatzkontext erleben

Beim Einsatz mobiler Arbeitsmaschinen bestimmt der Maschinenführer die Arbeitsleistung und -sicherheit wesentlich mit. Er muss in die Lage versetzt werden, die Maschine ohne Gefahr für sich und andere zu steuern und ihr Leistungspotential voll zu nutzen. Deshalb sind Maschinenführer als reale oder virtuelle Bediener frühzeitig in die Maschinenentwicklung mit einzubeziehen.

In einem global härter werdenden Markt reichen den Herstellern empirische Untersuchungen allein nicht mehr aus. Die Zusammenhänge im System Bediener-Maschine-Prozess sollen möglichst objektiv und reproduzierbar erfasst werden. Das kann aufwändige experimentelle Untersuchungen erfordern. Der Bau realer Testmaschinen und ihre Ausstattung mit Messtechnik kosten viel Zeit und Geld. Reale Einsatzversuche sind oft nicht unter gleich bleibenden Bedingungen durchführbar, was die Auswertung erschwert. Hingegen bieten Werkzeuge der Simulation und Virtuellen Realität eine effiziente Möglichkeit, Maschinenführer in frühen Phasen der Produktentwicklung mit einzubeziehen.

1 Interaktiver Maschinensimulator der TU Dresden

Im interaktiven Maschinensimulator der TU Dresden (Abbildung 1) können Testfahrer mit virtuellen Maschinen Arbeitsaufgaben in virtuellen Szenarien erledigen. Dabei lassen sich auch kritische Situationen gefahrlos untersuchen (Gubsch et. al. 2010). Umgebungsbedingungen und Systemparameter werden innerhalb einer gegebenen Variationsbreite festgelegt, was die Wiederholung und Re-

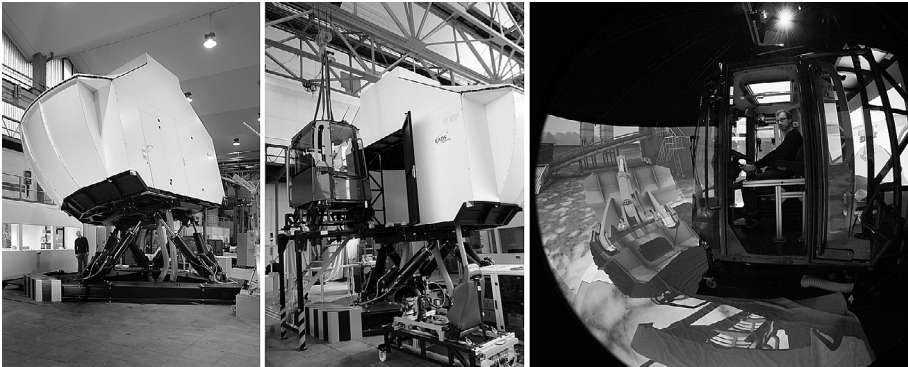


Abbildung 1 (oben): Interaktiver Maschinensimulator der TU Dresden

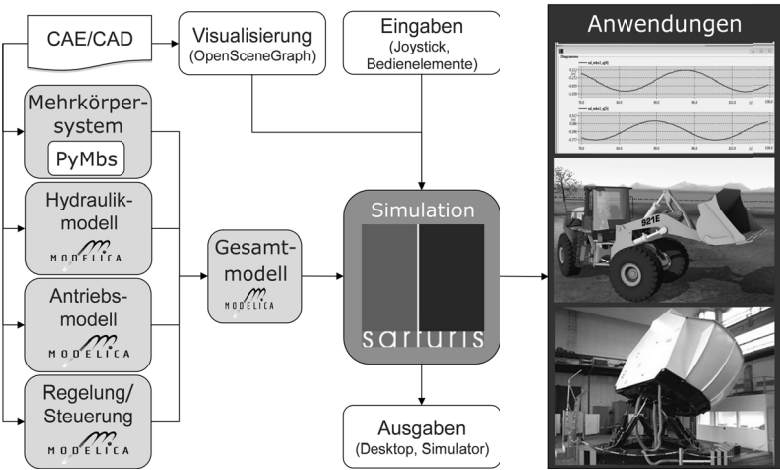


Abbildung 2 (unten): Software-Framework SARTURIS

produktion von Experimenten ermöglicht. Bei den Untersuchungen werden ausgewählte Verhaltensmerkmale der Probanden direkt mit Messtechnik (Blick- und Bewegungsverhalten) und indirekt über aufgezeichnete Maschinendaten (Fahrverhalten) erfasst. Insgesamt ist eine objektivierete Bewertung von Maschinen im Einsatz möglich.

Der Simulator der TU Dresden besteht aus einer Kabine, welche auf einem Bewegungssystem montiert ist. In die Simulatorkabine lassen sich reale Führerhäuser mit originalen oder prototypischen Bedien- und Anzeigeelementen verschiedener Maschinentypen einbauen. Beamer projizieren computergenerierte Darstellungen der Arbeitsumgebung einschließlich sichtbarer Maschinenteile auf eine gewölbte Wand. Ein Soundsystem erzeugt zugehörige Geräusche. Die beim Fahren und Arbeiten auftretenden Bewegungen, Beschleunigungen und Maschinenschwingungen werden über das Bewegungssystem nachgebildet. Somit kann ein Maschinenführer die virtuelle Arbeitsmaschine über seine Sinne für Sehen, Hören, Gleichgewicht und Fühlen erleben. Durch die Interaktion mit der Maschine und der Umwelt bestimmt er den Arbeitsprozess und das Maschinen- sowie Umweltverhalten mit.

2 Eigene Weiterentwicklung des interaktiven Maschinensimulators

Der Maschinensimulator der TU Dresden ist ein Forschungs- und Entwicklungssimulator. Für die interaktive Maschinensimulation in Echtzeit wurde am Lehrstuhl für Baumaschinen- und Fördertechnik das Programmsystem SARTURIS entwickelt (BMBF-Förderung). SARTURIS ist kein abgeschlossenes Simulationsprogramm, sondern bildet den Rahmen für individuelle Softwarekomponenten (Kunze et. al. 2010b, Abbildung 2). Mit PyMbs ist ein Softwarewerkzeug integriert, das Bewegungsgleichungen von Mehrkörpersystemen generiert. Es erzeugt aus einer Modellbeschreibung simulationsfähigen Code für verschiedene Zielplattformen, wie z.B. Matlab/SimulinkR, C/C++, Fortran, Python oder Modelica (Kunze et. al. 2009). Ein MKS-Modell lässt sich damit nativ in ein existierendes Modell anderer physikalischer Domänen einbinden.



Abbildung 3 (obere Reihe): Beispiele für mit SARTURIS entwickelte Maschinen-simulationen, links: Betonspritzmaschine mit originaler Fernbedienung und Stereoprojektion, rechts: Bedienstand Schaufelradbagger

Abbildung 4 (mittlere Reihe): Erweiterung der Fahrersicht nach unten und hinten zur Realisierung typischer Arbeitsprozesse (Y-Spiel beim Radlader)

Abbildung 5 (untere beiden Reihen): Beispiele für neue Arbeitsszenarien im Simulator, oben: Szenario Ladespiel mit realer Szene, Außensicht Simulator, Probandensicht, unten: Szenario Fahrstrecke mit realer Szene, Außensicht Simulator, Probandensicht

SARTURIS simuliert das Verhalten mobiler Arbeitsmaschinen unter Einsatz strukturmehranischer Modelle (MKS) in Kombination mit domänenübergreifenden Modellen für den Antrieb und die Hydraulik, einschließlich der Steuerung und Regelung (Schubert et. al. 2010, 2011). Im Gegensatz dazu bilden spezialisierte Trainingssimulatoren die als bekannt empfundenen Verhaltensweisen des simulierten Systems mit vereinfachten Methoden ab (z. B. Kennfelder). Weitere SARTURIS-Module sind für die Visualisierung (OpenScene-Graph), die Ein- (Joystick, Bedienelemente) und Ausgabe (Desktop, Simulator) zuständig. Mit SARTURIS lassen sich Simulationslösungen für unterschiedlichste Maschinensysteme entwickeln, die unter verschiedenen Hardwarekonfigurationen von VR-Umgebungen laufen (Abbildung 3).

Neben der Forschung an Simulations- und VR-Technologien für mobile Arbeitsmaschinen wird der Simulator für Untersuchungen an den Maschinen selbst eingesetzt. Dazu gehören Analysen zum Fahrverhalten bei Radladern und zu Bedienkonzepten bei Kompaktladern. Weitere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit Methoden zur Bewertung der Fahrersicht im Arbeitsprozess und mit Informationsschnittstellen in Führerkabinen von Schaufelradbaggern. Mit den konkreten Aufgaben wurde es notwendig und mit SARTURIS möglich, den Maschinensimulator kontinuierlich auszubauen. Dazu zählen

- drei Führerkabinen/-stände mit flexiblen Bedienelementen
- weitere Projektionsflächen nach unten und hinten
- eine Methode zur Verzerrungskorrektur bei der Projektion auf eine doppelt gekrümmte Fläche (einschließlich Beamerkalibrierung)
- die indirekte Beleuchtung des Fahrerarbeitsplatzes
- maschinenspezifische Arbeitsszenarien mit Fremdverkehr (Abbildung 5)
- weitere Umweltinteraktionen (Kollisionen, Materialhandhabung)
- eine PyMbs-Eingabeschicht zur visuellen Modellierung kinematischer Systeme
- Messsysteme zur Erfassung des Bedienerverhaltens
- Synchronisationswerkzeuge für Mess- und Log-Daten



Abbildung 6 (obere Reihe): Eine Versuchsszene im interaktiven Maschinensimulator aus verschiedenen Sichten, oben: Seitenansicht und Draufsicht Proband, Eye-Link-Video mit Fixationen, unten: Maschinensimulator, Virtuelle Umgebung, Außensicht auf Arbeitsprozess

Abbildung 7 (untere Reihe): Im Simulator eingesetzte Messsysteme zur Erfassung des Fahrerverhaltens, links: EyeLink-System zur Blickerfassung, rechts: CUELA-System zur Erfassung der Bewegungen über gemessene Körperwinkel, mittig oben: Adaption der CUELA Kopfsensoren am Blickerfassungssystem

3 Messsysteme zur Erfassung des Bedienerverhaltens

Auf Grund der Forderung nach objektiven und reproduzierbaren Untersuchungen zum Bedienerverhalten werden im Simulator verschiedene Messsysteme eingesetzt, während die Probanden vorgegebene Arbeitsaufgaben erledigen (Abbildung 6).

Ein Mehrkammersystem zeichnet die VR-Umgebung (projiziertes Umgebungsmodell, Fahrerkabine) und den Testfahrer aus verschiedenen Perspektiven auf (Bürkle et. al. 2011a). Neben der Dokumentation der Versuche lassen sich damit autarke, nicht vernetzte Messsysteme bildbasiert synchronisieren. In der Regel wird aber die Messtechnik in das Simulatornetzwerk mit eingebunden. Die Synchronisation der Daten basiert dabei auf gesendeten Nachrichten oder elektrischen Signalen.

Die Bewegungen der Probanden werden durch ein mechanisch/elektronisches System über gemessene Körperwinkel erfasst (Abbildung 7 rechts). Das CUELA-System (Computer-Unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems) wird vom Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) entwickelt und betrieben (IFA 2012). Im Simulator kommt eine speziell zur Registrierung der Kopfneigung und -torsion entwickelte prototypische Systemvariante zum Einsatz.

In Zusammenarbeit mit den Ingenieurpsychologen der TU Dresden werden die Blickbewegungen der Bediener mit dem Eye-Tracking-System EyeLink II aufgezeichnet (Abbildung 7 links). Aus Fixationen lassen sich Rückschlüsse auf arbeitsbedingte Sehziele ziehen. Ein weiteres Sichtmerkmal sind Bewegungen des Auges beim Ausrichten auf ein neues Objekt (Sakkaden). Aus Fixationen und Sakkaden leiten die Psychologen Aussagen zur Gefahrenwahrnehmung ab.

Der Simulationsrechner zeichnet die Schaltzustände der Bedienelemente, die Maschinendaten (zeitabhängige Positionen, Beschleunigungen / Geschwindigkeiten, Zylinderkräfte usw.) und Umweltaktionen synchron zu den Messungen auf. Sie ermöglichen die Reproduktion der Arbeitsspiele und erlauben Rückschlüsse auf den Fahrertyp

über Prozessparameter. Damit sind die Grundlagen für eine reproduzierbare Bewertung des Bedienerverhaltens gelegt.

4 Validierung von Untersuchungen in der Virtuellen Realität

Abhängig vom Untersuchungsziel müssen VR-Systeme die Parameter der Realität von physikalisch plausibel bis nahezu physikalisch korrekt abbilden. Diese sind zu validieren. Physikalische Größen, die auf dem Simulationsmodell und der Übertragungsfunktion der Hardwareschicht beruhen, können am Simulator selbst gemessen werden. Auf diese Weise erfolgte eine Analyse des Übertragungsverhaltens für Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Sie dient als Grundlage für Untersuchungen zur Wahrnehmung der Maschinendynamik durch Maschinenführer.

Bis zu 90 Prozent aller Informationen für Fahr- und Arbeitsaufgaben nehmen Bediener über ihren optischen Sinneskanal auf. Sichtuntersuchungen im Simulator sind jedoch von den Rahmenbedingungen abhängig, die das vorhandene Führerhaus und das Projektionssystem für das Umgebungsmodell schaffen. Deshalb kann die Validierung virtueller Untersuchungen nur an Hand des Probandenverhaltens (Körper- und Blickbewegungen) unter vergleichbaren Arbeitsbedingungen erfolgen. Aus diesem Grund wurden Körperhaltungen und Sehziele in gleichen Einsatzszenarien mit realen Maschinen erfasst (Abbildung 8). Es bestand eine hohe Korrelation der Verhaltensmuster im Simulator mit denen in der Realität, wie z. B. bei Körperbewegungen für bestimmte Sehziele (Abbildung 9).

5 Datenauswertung in Entwurfswerkzeugen aus der Produktentwicklung

5.1 Systemüberblick zum Datentransfer in Entwurfswerkzeuge

Bei den Untersuchungen in der Virtuellen Realität ergeben sich durch Messung, Logging und Videoaufzeichnung enorm große Datensätze. Die im Simulator eingesetzten Aufnahmesysteme besitzen selbst Auswertesoftware, die normalerweise zur Datenaufbereitung allein



Abbildung 8 (obere Reihe): Untersuchungen zur Fahrersicht in realen Arbeitsprozessen, links: Aufnahme des Fahrers und der Maschine mit einem Mehrkameranystem, rechts: Bewegungserfassung des Fahrers mit dem CUELA-System



Abbildung 9 (untere Reihe): Überblendung von realen und virtuellen Versuchsszenarien mit markierter Blickrichtung

genutzt wird. Abbildung 10 zeigt Beispiele für die spezifische Auswertung von Maschinen-, Blick- und Körperbewegungen.

In einem DFG-Projekt zur »Fahrersicht-Dynamik« (Kunze et. al. 2008 und 2010a) gehen die TU Dresden (Professuren: Arbeitswissenschaft, Baumaschinen- und Fördertechnik) und das IFA einen Schritt weiter. Die erfassten Daten werden in Entwurfswerkzeugen aus der Produktentwicklung, wie Menschmodellsoftware, 3D-Modellierungsoftware oder CAD-System, zusammengeführt (Abbildung 11). Bedingung dafür ist, dass diese das Gesamtsystem aus Mensch-Maschine-Prozess abbilden können. Die gemeinsame Auswertung von Daten zu Mensch, Maschine und Prozess in einem Entwurfswerkzeug hat folgende Vorteile:



Abbildung 10 (obere Reihe): Auswertung von Maschinen-, Blick- und Bewegungsdaten mit spezialisierter Software: links: xy-Plott der Fahrstrecke mit Gasse, Slalom, Rondell und Y-Spiel / pinacolada , mittig: Fixation auf ein Hindernis im Rückspiegel / SceneLink, rechts: Verteilung der Hals-Torsion bei Fahrten durch das Rondell / WIDAAN (eine Fahrt in Gegenrichtung) (Böser et. al. 2011, Brütting et. al. 2011)

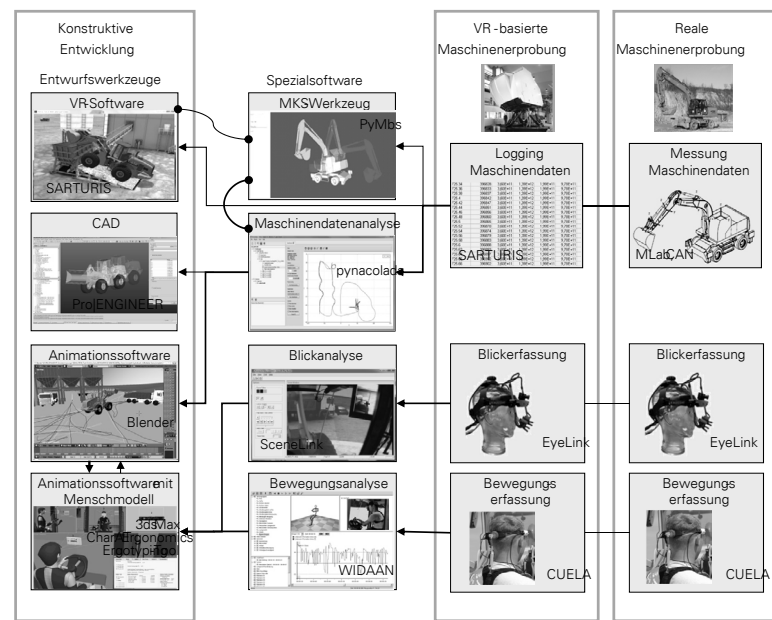


Abbildung 11 (unteres Bild): Werkzeuge für die Prozessanalyse in ausgewählten Stufen der Produktentwicklung am Beispiel des DFG-Projekts „Fahrsicht-Dynamik“ (Kunze et. al. 2008), Eigenentwicklung TU Dresden: SARTURIS, PyMbs, pynacolada, Mitentwicklung durch TU Dresden: CharAT Ergonomics, Ergotyping®-Tool, Eigenentwicklung Institut für Arbeitsschutz: CUELA, WIDAAN

- Komplexe Zusammenhänge im System Mensch-Maschine-Prozess sind analytisch fassbar.
- Einflussparameter sind variierbar und exakt einstellbar.
- Das Potential der Entwicklungswerkzeuge für die Bewertung wird genutzt.
- Durch Ausweitung der Untersuchungsbedingungen auf Nutzerkollektive und andere Maschinenkonstruktionen entsteht ein Mehrwert (Offlinesimulation).
- Die Produktentwicklung ist an der Quelle beeinflussbar. Die in frühen Phasen eingesetzten Entwicklungswerkzeuge werden gleichzeitig weiterentwickelt.

Im Rahmen des DFG-Projekts zur »Fahrsicht-Dynamik« werden Schnittstellen und Workflows für den Datentransfer aus spezifischen Auswerteprogrammen in Entwurfswerkzeuge entwickelt und getestet. Das schließt Synchronisationsmethoden mit ein. Der Transfer erfolgt in drei Etappen:

1. Überführen von Körper- und Blickbewegungen auf ein repräsentatives, exakt positioniertes digitales Menschmodell
2. Aufbereiten von prozessbezogenen Maschinen- und Umgebungsdaten
3. Zusammenführen von prozessbezogenen Mensch-, Maschinen-, und Umgebungsdaten in 3D-Entwurfswerkzeugen

5.2 Überführen von Körper- und Blickbewegungen auf ein digitales Menschmodell

Die im Simulator agierenden Versuchspersonen weisen individuelle Körpermaße und eine für die Sehaufgaben typische Körpermotorik auf. Für weiterführende Untersuchungen mit digitalen Menschmodellen müssen diese Anthropometrie- und Bewegungsdaten auf die Menschmodelle übertragen werden, um ein exaktes virtuelles Abbild der Versuchspersonen zu erzeugen (Bürkle et. al. 2011b). Neben der Vermessung der Probanden (Abbildung 12 links) sind deren individuelle Sitzhaltungen (Abbildung 12 rechts) und die Zuordnung zu Mensch-Maschine-Schnittstellen (Bedienelemente etc.) mess-

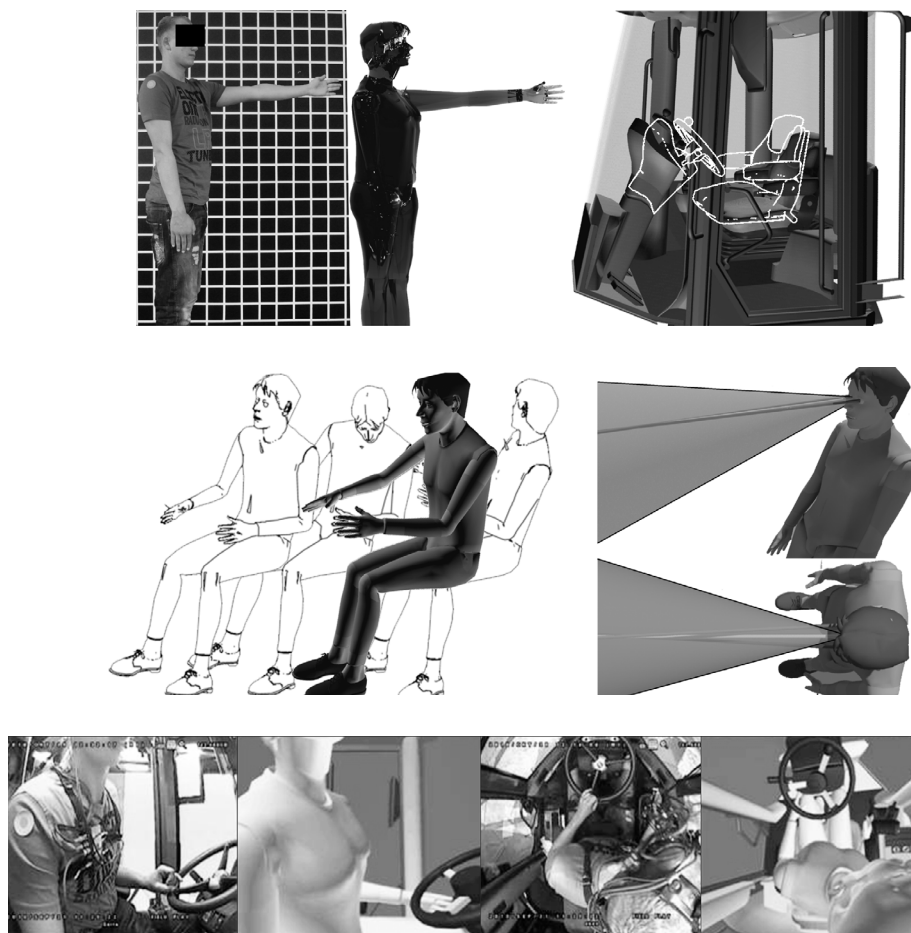


Abbildung 12 (obere Reihe): Übertragen gemessener Körpermaße und der Sitzposition auf Menschmodelle, links: Bildbasierte und iterative Modifikation eines Menschmodells, rechts: Individuelle Einstellungen eines Sitzes

Abbildung 13 (mittlere Reihe): Import von CUELA-Daten in die Bewegungssteuerung des Menschmodells, links: Haltungssequenzen des Menschmodells, rechts: Verknüpfung des Blickfelds mit den Kopfbewegungen

Abbildung 14 (untere Reihe): Gegenüberstellung realer und virtueller Körperbewegungen

technisch zu erfassen und in digitale Modelle zu übertragen. Als Entwicklungsplattform kommt die auf 3ds Max basierende Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics zum Einsatz.

Für den Import der an realen Personen gemessenen Gelenkwinkel auf das Menschmodell wurde ein Skript entwickelt (Böser et. al. 2011). Die mit CUELA aufgezeichneten Daten werden damit in die Bewegungssteuerung des Menschmodells überführt (Abbildung 13 links). Mit dem so konfigurierten Menschmodell ist es möglich, Rückschlüsse auf die Raumkoordinaten der virtuellen Augpunkte zu ziehen. Diese bilden den Startpunkt für das Blickfeld, dass damit direkt mit den Kopfbewegungen verknüpft ist (Abbildung 13 rechts). Das Blickfeld repräsentiert denjenigen Bereich, innerhalb dessen Objekte allein durch die Ausrichtung der Augen in angenehmer Weise fixiert werden können.

Im Ergebnis dieses Bearbeitungsschritts ist die Gegenüberstellung von Bewegungen realer Probanden und denen der Menschmodelle möglich (Abbildung 14). Dabei wurde festgestellt, dass feinste Körperbewegungen, z.B. durch Querbewegungen aufgrund unebener Terrains, hinreichend genau übertragen werden.

Zusätzlich werden Rohdaten des Eye-Tracking-Systems (EyeLink II) für die Augenbewegungen (Okulomotorik) verarbeitet und auf das bereits körperlich animierte digitale Menschmodell übertragen (Abbildung 15). Eine hierfür entwickelte skriptbasierte Datenaufbereitung liefert die von Sakkaden- und Blink-Ereignissen (Blicksprünge, Blinzeln) bereinigten, framegenauen Koordinaten zur Bestimmung der Richtung von Sehstrahlvektoren. Das Skript berücksichtigt dabei unterschiedliche Frameraten der eingesetzten Messsysteme sowie Modellierungssoftware und filtert projektrelevante Arten der Okulomotorik aus enorm großen Eye-Tracking-Datensätzen.

Ergebnis der ersten Etappe des Datentransfers ist eine in die virtuelle Welt übertragene menschliche Verhaltensdynamik, die aber noch keine Rückschlüsse auf den Prozess zulässt.

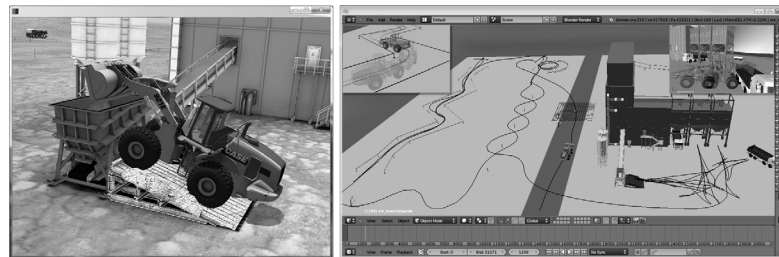
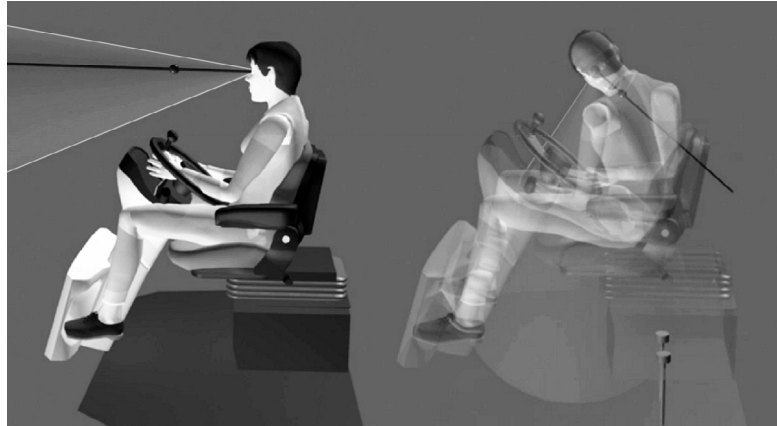


Abbildung 15 (oberes Bild): Animation von Körper- und Blickbewegung in der Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics

Abbildung 16 (untere Reihe): Animation der im interaktiven Maschinensimulator mitgeloggten Testfahrten, links: Maschinenanimation in der VR-Software Sarturis, rechts: Maschinenanimation in der Animationssoftware Blender mit Ortskurve

5.3 Aufbereiten von prozessbezogenen Maschinen- und Umgebungsdaten

In der VR-Software SARTURIS lassen sich aufgezeichnete Maschinenbewegungen unmittelbar abspielen (Abbildung 16 links). Um alle Prozessdaten zusammenführen zu können, müssen Maschinendaten für eine Computergrafik- und Animationsplattform aufbereitet werden. Als Transferwerkzeug wurde Blender (Open Source) aus-

gewählt, da die computergrafische Entwicklung für den Simulator ebenfalls darauf basiert und eine Python-Schnittstelle für die Skriptentwicklung existiert (Abbildung 16 rechts). Zudem bietet Blender eine Exportfunktion für komplette Animationen nach 3ds Max.

Bei der Maschinensimulation im Simulator werden die Werte generalisierter Koordinaten des Mehrkörpersystems mitgeloggt. Damit lassen sich die Systemzustände einer Baumaschine vollständig beschreiben. Für den Import in die Computergrafikplattform werden sie in kartesische Raumkoordinaten der Einzelkörper umgewandelt. Umgebungsdaten liegen bereits in dieser Form vor. Zu weiteren Maßnahmen der Daten-Vorverarbeitung zählen die Interpolation auf eine definierte Framerate, das Splitting in Prozessschritte und die Daten-Synchronisation. Für das Einlesen und Weiterverarbeiten aller Informationen wurden Skripte entwickelt. Ergebnis des Datentransfers ist eine Keyframe Animation von Maschine und Umgebung in Blender, die als Grundlage für den Import in 3ds Max dient.

Zusätzlich wurde der Datentransfer in das CAD-Programm ProENGINEER getestet. Dazu ist der Radlader im CAD aus geeigneten Einzelkörpern abzubilden, die untereinander durch Gelenke verbunden sind. Mit dem internen Dynamik-Tool MECHANISM werden Aktuatoren für die Bewegungsvorgabe definiert. Die Parameterwerte der Aktuatoren entsprechen den im Simulator aufgezeichneten Werten für die generalisierten Koordinaten. Sie werden als Ansi- oder Excel-Datei eingelesen, wobei der Zeitschritt vorzugeben ist. Daraus resultiert eine Maschinenanimation im CAD, die auf Fahrversuchen im Simulator oder mit realen Maschinen beruht.

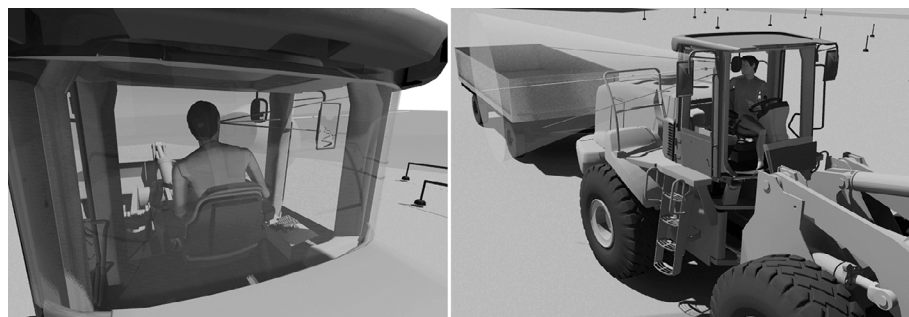
Auch in realen Maschineneinsätzen (Radlader, Bagger) wurden Positionskenngößen ausgewählter Maschinenkomponenten sensorisch erfasst. Die Umwandlung der Messdaten in generalisierte Koordinatenwerte erfolgte per Skript (MATLAB, Python). Damit lassen sich Maschinenbewegungen im Visualisierungstool des Mehrkörpersimulationswerkzeugs PyMbs animieren. Mit den bereits beschriebenen Methoden ist das ebenso im CAD (ProENGINEER) und in Computergrafiksoftware (Blender, 3ds Max) möglich.

5.4 Zusammenführen von prozessbezogenen Mensch-, Maschinen-, und Umgebungsdaten in 3D-Entwurfswerkzeugen

In der dritten Etappe des Workflows sind menschliche und maschinelle Arbeitsprozesse in einer virtuellen Umgebung zusammenzuführen. Dazu werden die animierten Mensch-, Maschinen- und Umgebungsmodelle auf Basis von Synchronisationssignalen in eine gemeinsame Datei der Entwurfsplattform importiert. Abbildung 17 zeigt verschiedene Arbeitsszenarien in 3ds Max und CharAT Ergonomics, die auf Versuchen im interaktiven Maschinensimulator basieren.

Auf die gleiche Weise können Arbeitsprozesse realer Maschinen in virtuellen Umgebungen abgebildet werden. Die Ausrüstung von Maschinen mit Sensoren und der Fahrer mit Messsystemen sind jedoch wesentlich aufwendiger. Der Datentransfer aus dem realen Umfeld in ein Entwurfswerkzeug wurde separat erfolgreich getestet.

In den Entwurfswerkzeugen selbst können durch Variation von Nutzerkollektiven und Veränderung der Maschinenkonstruktion weiterführende Experimente durchgeführt werden. Hintergrund ist die Bewertung von Entwürfen hinsichtlich ihrer globalen Markteignung und eine vorausschauende Betrachtung der Wirkung konstruktiver Änderungen.



5.5 Werkzeuge für die Bewertung des Fahrerverhaltens

Um die Produktentwicklung zu beeinflussen, werden Werkzeuge für die Analyse und Bewertung des Fahrerverhaltens entwickelt.

Die gekoppelte Animation von Mensch- und Maschinenmodellen in 3ds Max und CharAT Ergonomics schafft die Möglichkeit, prozesskritische Sehziele zu identifizieren. Dazu wird ein skriptbasiertes Tool (Scherstjanoi et. al. 2012b) eingesetzt, das Kollisionen dynamischer Sehobjekte (Sehstrahl) mit 3D-Objekten von Maschine und Umgebung markiert und nach Zeit, Ort und Häufigkeit klassifiziert. Beliebige Objekte lassen sich dabei auf ihre prozesskritische Relevanz hinsichtlich direkter und/oder indirekter Sicht untersuchen. Fixationsstrahlen werden nach den Kriterien »Kollision mit sichtverdeckendem Material«, »keine Sichtbehinderung durch Glas« oder »indirekte Sicht über Spiegel« unterschieden und ausgezählt (Abbildung 18 links). Damit ist eine Wichtung von Sehraumabschnitten im Einsatzkontext der untersuchten Baumaschine möglich. Solche Wichtungen können auch für Konstruktionsobjekte selbst ermittelt werden (Abbildung 18 rechts).

Neben den Sehstrahlen müssen auch Körperhaltungsanalysen in die Auswertung einbezogen werden. Kompensationsbewegungen lassen auf ungünstige Sichtbedingungen schließen. Ein Hinweis dazu ergibt sich aus der Rückentorsion bei verschiedenen Arbeits-



Abbildung 17: Import von Daten menschlicher und maschineller Arbeitsprozesse in eine Entwurfsplattform (3ds Max und CharAT Ergonomics)

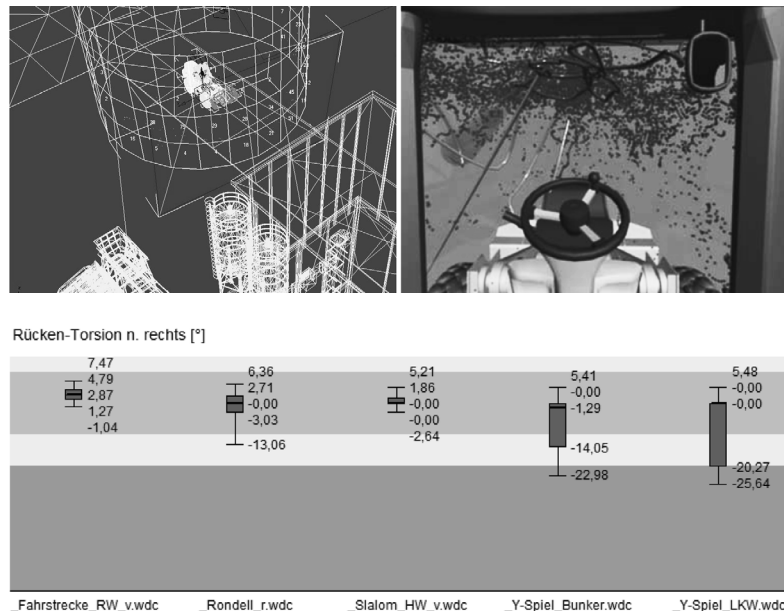


Abbildung 18 (obere Reihe): Auswertung von Sehstrahlen in 3ds Max, links: Max-Script zur Auswertung von Fixationen, Wichtung von Sehraumabschnitten, rechts: Verschneiden von Sehstrahlen mit der Frontscheibe eines Radladers

Abbildung 19 (unten): Boxplot der Rückentorsion nach rechts, Zwischenergebnis (Brütting et. al. 2011)

szenarien eines Radladers (Abbildung 19). Beim Y-Spiel zeigen sich erhöhte Werte. Hintergrund ist der hohe Rückfahranteil. Die Fahrer wollen sich, von der Abwesenheit an Kollisionsgefahren überzeugen. Die direkte Sicht nach hinten oder die indirekte Sicht über den Seitenspiegel erfordern eine tordierte Körperhaltung. Es wird erwartet, dass Assistenzsysteme für das Rückwärtsfahren eine Verbesserung für Ergonomie und Arbeitssicherheit bringen.

Angeregt durch die Arbeiten zur Fahrersicht-Dynamik entstanden neue Module in der Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics. So wurde eine Steuerung implementiert, die einen Sehstrahl über sequentielle Bewegung von Augen, Kopf und Rumpf auf ein Sehobjekt ausrichten kann (Kamusella 2012a, Abbildung 20 links). Dabei ist eine Bewertung der Körperhaltung nach Ampelverfahren möglich

(Kamusella 2012b). Ein anderes Modul erlaubt die Sichtfeldauswertung nach ISO 5006 für beliebige Augpunktlagen eines Nutzerkollektivs (Scherstjanoi et. al. 2012a, Abbildung 20 rechts).

Zur Validierung des Datentransfers und zur Übergabe aufbereiteter Untersuchungsdaten an Dritte, erfolgte ein Rückimport von Augpunktlagen und Blickrichtungen aus dem Menschmodell nach Blender (Abbildung 21).

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Virtuellen Realität des interaktiven Maschinensimulators der TU Dresden lassen sich Zusammenhänge im System Mensch-Maschine-Prozess messtechnisch untersuchen. Die erfassten Daten werden bei der Aufbereitung und Auswertung in Entwurfswerkzeugen des Konstrukteurs (Menschmodellsoftware, CAD) miteinander gekoppelt, um das komplexe Gesamtsystem abbilden zu können.

Auf Grundlage des gesammelten Wissens wurden die in frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzten Entwurfswerkzeuge weiterentwickelt. Für Untersuchungen zur Fahrersicht-Dynamik sind prototypische Datenschnittstellen und Auswertewerkzeuge geschaffen worden. In CharAT Ergonomics wurden die Steuerung des Menschmodells über Sehstrahlen und eine auf Menschmodelle adaptierte Sichtauswertung nach ISO 5006 umgesetzt.

Weitere Entwicklungsansätze liegen in der Aufbereitung ermittelter Prozessdaten für den Konstrukteur. Dazu zählen die voneinander abhängigen prozesstypischen Maschinenstellungen / Körperhaltungen / Blickrichtungen bzw. Maschinen- / Körper- / Blickbewegungen.

Aufgezeichnete dynamische Maschinendaten liefern Aussagen zum Fahrverhalten. Auf dieser Grundlage lassen sich Fahrermodelle entwickeln, um bei der Simulation von Arbeitsmaschinen über Steuerungsparameter unterschiedliches Bedienerverhalten einfließen zu lassen. Damit sind bereits in frühen Entwicklungsphasen Prognosen zu fahrerspezifischen Einflüssen auf die Prozessleistung und Energiebilanz möglich.

Literaturverzeichnis

Böser, C.; Brütting, M.; Ellegast, R. 2011: Einsatz von VR zur Sichtfeldgestaltung von Baumaschinenführern. In IFA-Report 6/2011 – 4. Fachgespräche Ergonomie 2010, S. 19–24. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., Berlin.

Brütting, M; Böser, C.; Ellegast; R. 2011: Präsentation von Teilergebnissen der Körperhaltungsanalyse bei Baumaschinenführern mit CUELA am 21.02.2011 in Dresden, unveröffentlicht.

Bürkle, K.; Kamusella, C.; Hoske, P. 2011a: Methode zur prozess- und nutzerabhängigen Sichtanalyse bei mobilen Arbeitsmaschinen. In: Tagungsband zum Frühjahrskongress 2011 der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. zum Thema „Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess“. Chemnitz 23.-25.03.11

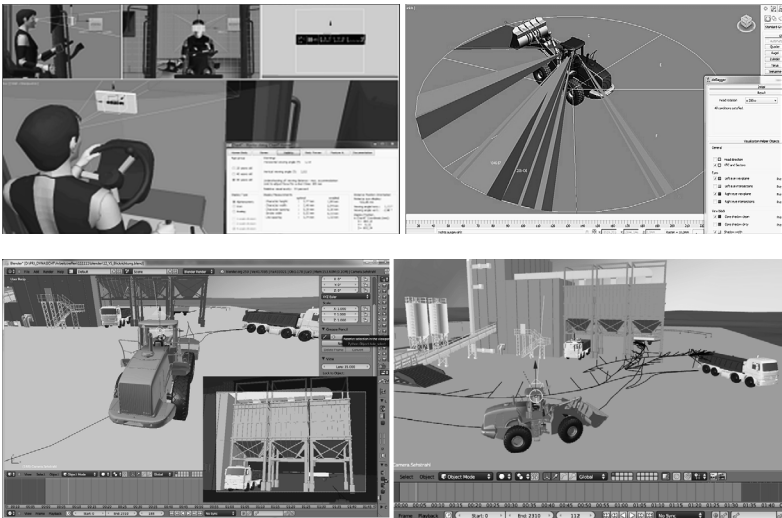


Abbildung 20 (obere Reihe): Neue Module für die Menschmodellsoftware CharAT Ergonomics, links: Steuerung zum Ausrichten eines Sehstrahls auf ein Sehobjekt und Bewertung von Sichtparametern mit dem Ergotyping®-Tool (Kamusella 2012a), rechts: Auswertung von Sichtverdeckungen nach ISO 5006 mit einer Maschine in Prozessstellung und bei der möglichen Kopffrotation (Scherstjanoi et. al. 2012a)

Abbildung 21 (untere Reihe): In Blender importierte und aufbereitete Augpunktlagen und Blickrichtungen, links: Außensicht auf Szene mit Sehstrahl und Fahrersicht, rechts: Außensicht auf Szene mit Sehstrahl und Ortskurve des Mittenauges mit Blickrichtungen

Bürkle, K.; Schmauder, M.; Hoske, P.; Kunze, G. 2011b: Virtuelle Abbildung dynamischer Prozesse zur Sichtbewertung bei Erdbaumaschinen. In: Technische Sicherheit, Heft 4/2011. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf

Gubsch, I.; Hoske, P.; Bürkle, K. 2010: Untersuchung des Bedienerverhaltens in mobilen Baumaschinen durch interaktive Simulationen in virtuellen Umgebungen. In: Tagungsunterlagen zum „Tag der Deutschen Baumaschinentechnik 2010“ des Hauptverbands der Deutschen Bauindustrie e.V. – Anwendungskompetenz Baumaschinentechnik Erfolgsgarant der Deutschen Bauindustrie. Meerane, 26.10.2010

Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA ehemals BIA) 2012: Das CUELA-Messsystem, Information des Berufsgenossenschaftlichen Instituts für Arbeitsschutz – BIA, Sankt Augustin. <http://www.dguv.de/ifa/de/fac/ergonomie/pdf/text1a.pdf>, veröffentlicht 2003, abgerufen am 10.04.2012

Kamusella, C. 2012a: Ergotyping®-Tools zur Unterstützung von Konstrukteuren bei der Umsetzung von Ergonomieaspekten in frühen Entwicklungsphasen. Institutskolloquium TU Dresden, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, S. 40–54

Kamusella, C. 2012b: Ergotyping-Tool „Körperhaltungsbewertung“. In Dokumentation des 58. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft in Kassel, S. 177–180. Dortmund: GfA-Press.

Kunze, G.; Schmauder, M. 2008: Methode zur dynamischen Sichtfelderfassung und -bewertung für mobile Arbeitsmaschinen unter Einbeziehung der Prozess- und Nutzercharakteristik, Antragsunterlagen zum Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft 2009–2012, unveröffentlicht

Kunze, G.; Frenkel, J.; Schubert, C.; Jankov, K. 2009: Using Modelica for Interactive Simulations of Technical Systems in a Virtual Reality Environment. In: Proceedings of the 7th International Modelica Conference, Como (Italy) 2009. Linköping University Electronic Press, 2009.

Kunze, G.; Hoske, P.; Gubsch, I.; Schmauder, M.; Bürkle, K.; Kamusella, C. 2010a: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen (Teile 1 und Teil 2). In: BauPortal – Fachzeitschrift der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU), Heft 9/2010 und Heft10/2010. Erich Schmidt Verlag, Berlin

Kunze, G.; Schubert C.; Esswein E.; Lehmann, S. 2010b: Software Architecture for Interactive Simulation of Mobile Machinery. – Commercial Vehicle Technology 2010 – Proceedings of the 1st Commercial Vehicle Technology Symposium [Shaker], 2010

- Scherstjanoi, E.; Bürkle, K. 2012b: „RayCutVis“ Maxscript-Tool, TU Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft, unveröffentlicht
- Scherstjanoi, E.; Kamusella, C. 2012b: „Computergestützte Sichtüberprüfung von Erdbaumaschinen nach ISO 5006“. Maxscript-Tool, TU Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft, unveröffentlicht
- Schubert, C.; Beitelschmidt, M.; Kunze G. 2010: Handling Kinematic Loops in Mobile Machinery in Real Time – GAMM 2010, Karlsruhe, 2010
- Schubert, C.; Neidhold, T.; Kunze, G. 2011: Experiences with the new FMI Standard Selected applications at Dresden University. In: Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Dresden, Germany 2011

Kontakt

Dipl.-Ing. Petra Hoske
 Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Kunze
 Technische Universität Dresden
 Professur für Baumaschinen und Fördertechnik
 01062 Dresden
<http://tu-dresden.de/bft>

Dipl.-Ing. Kai Bürkle
 Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder
 Technische Universität Dresden
 Professur für Arbeitswissenschaft
 01062 Dresden
<http://tu-dresden.de/mw/tla>

Dipl.-Biol. Mark Brütting
 Dipl.-Ing. Christian Böser
 Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
 der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
 Fachbereich 4 / Referat 4.3: Arbeitswissenschaft/Ergonomie
 Alte Heerstraße 111
 53757 Sankt Augustin
<http://www.dguv.de/ifa/de/>

Ingo Jonuschies & Klaus Brökel

Ansatz für die Modellierung und Simulation von Hybridgleitlagern für Wellen mit großen Durchmessern und geringen Drehzahlen am Beispiel einer Windkraftanlage

Motivation

Am stetig steigenden Anteil der erneuerbaren Energien, der auf der einen Seite durch die ehrgeizigen Ziele der Politik forciert und auf der anderen Seite durch wirtschaftliche Interessen beflügelt wird, stellt die Windenergie den größten und aussichtsreichsten Bestandteil dar (BMU 2012). Setzt sich der gegenwärtige Trend fort, so ist in den nächsten Jahren mit Multimegawattanlagen im mehrstelligen Megawattbereich zu rechnen.

Bei den kontinuierlich wachsenden Windenergieanlagen in der Multimegawattklasse stellt sich die Frage, ob eine einfache Skalierung der bisher verwendeten Maschinenelemente die richtige Wahl ist. Bezug nehmend auf diese Fragestellung wird die Einsatzmöglichkeit von Gleitlagern zur Lagerung der Hauptrotorwelle untersucht. Um die Problematik der mangelnden Kenntnisse der Lagerlasten in Hinblick auf den Einsatz von hydrodynamisch wirkenden als auch von kombiniert hydrostatisch-hydrodynamisch arbeitenden Gleitlagersystemen zu klären, werden Untersuchungsansätze zur Lastverteilung, zu Lastverläufen und Lastgrößen vorgestellt. Der Erkenntnisgewinn über den Zusammenhang zwischen Ort und Größe

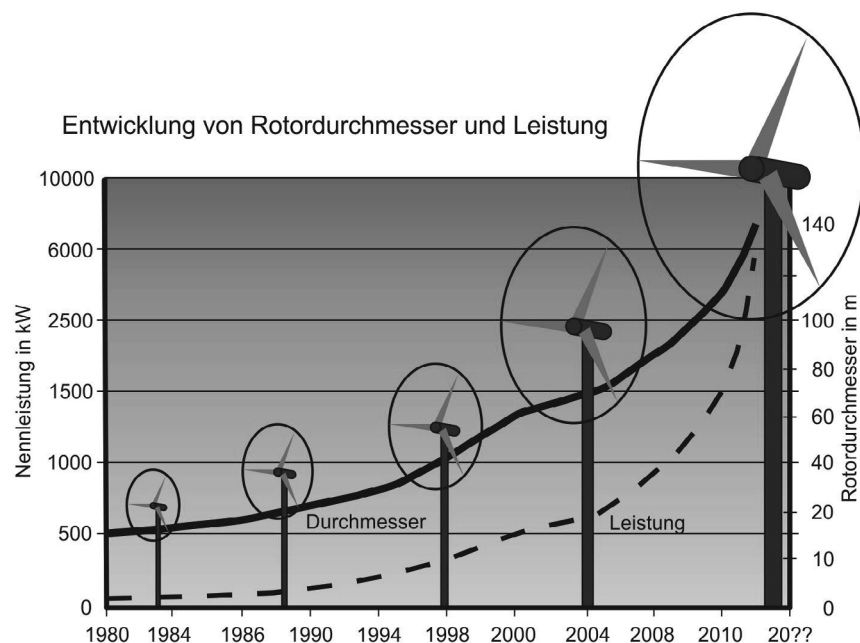


Abbildung 1: Wachstumsprognose Windenergieanlagen

der Lasten ist für den alternativen Einsatz von Gleitlagern in WKA unabdingbar. Weiterführend ist es von großem Vorteil, die Schmier-
nuten und damit den tragenden Schmierkeil genau dort anzuordnen,
wo sie benötigt werden, um eine möglichst hohe Tragfähigkeit zu
gewährleisten und die Ölversorgung des Lagers im Hinblick auf die
Wirtschaftlichkeit so zu gestalten, dass die Reibungsverluste und
die Ölströme minimiert werden.

Simulationsdaten

Die Untersuchungen werden anhand von simulierten Lastdaten
einer Multimegawattanlage vorgenommen. Die Eingangsdaten um-
fassen dabei Auslegungslastfälle nach der DIN-EN 61400 Teil 1 7.4
für den Normalbetrieb sowie Extremfälle. Die Daten liegen dabei
in über 200 ASCII-Datensätzen vor, wobei jeder Datensatz einen
Lastfall darstellt. Die Benennung der Datensätze folgt dabei streng
der Lastfalldefinition nach DIN EN 61400. So ist exemplarisch der

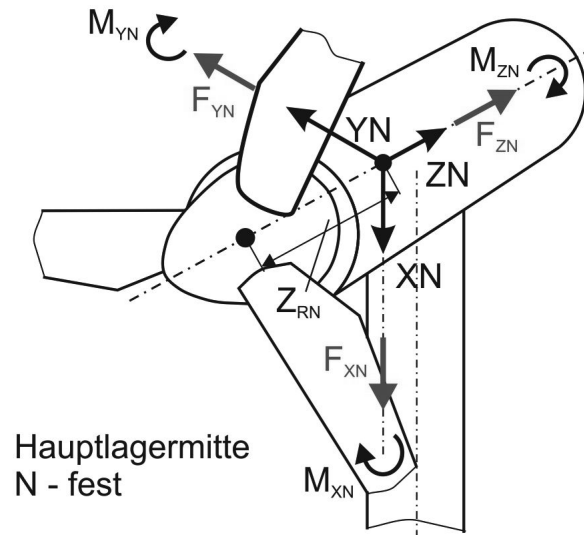
Datensatz 01010102-ZY-A-04-01.asc das Lastspektrum des Last-
falles 1.1 NTM und 1.2 NTM. Dabei stehen 1.1. und 1.2 für den
Produktionsbetrieb und NTM für das normale Windturbulenzmodell.
Man unterscheidet bei der Lastfallangabe in der DIN EN 61400 zwei
Turbulenzmodelle, das normale und das extreme Windturbulenzmo-
dell. Im normalen Turbulenzmodell ist der repräsentative Wert der
Standardabweichung σ_1 der Turbulenz, als 90%-Fraktile für die ge-
gebene Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe anzunehmen und wird
gegeben durch (DIN 2006):

$$\sigma_1 = I_{ref} \cdot (0,75 \cdot V_{hub} + b)$$

Dabei ist I_{ref} der Erwartungswert der Turbulenzintensität in Naben-
höhe und abhängig von der WEA-Klasse, V_{hub} die Windgeschwin-
digkeit in Nabenhöhe und b ein Beiwert der standardmäßig mit
 $b = 5,6 \text{ m/s}$ gegeben ist. Beim extremen Turbulenzmodell muss
das normale Windprofilmodell nach DIN EN 61400 und die Turbu-
lenz mit einer Standardabweichung der longitudinalen Komponente
nach folgender Beziehung verwendet werden (DIN 2006):

$$\sigma_1 = c \cdot I_{ref} \cdot 0,072 \cdot V_{avec} + 3 \cdot V_{hubc} - 4 + 10$$

V_{ave} stellt in diesem Fall das Jahresmittel der Windgeschwindig-
keit in Nabenhöhe dar und c einen Beiwert der mit $c = 2 \text{ m/s}$ stan-
dardmäßig gegeben ist. Die in der weiteren Benennung folgenden
Buchstabenkombinationen geben einen Aufschluss über die Netz-
frequenz, mit der die Anlage betrieben werden soll. Darauf folgt die
Angabe der mittleren Windgeschwindigkeit in m/s, für die die Si-
mulation stattfand. Am Ende steht die fortlaufende Nummerierung
des Simulationsvorganges der jeweiligen mittleren Windgeschwin-
digkeit. Für jede mittlere Windgeschwindigkeit sind mindestens
sechs Simulationsvorgänge vorgeschrieben. Ein Datensatz besteht
aus einer $m \times n$ Matrix der Größe 24000×17 . Hierbei werden die
Anzahl der Zeilen durch die Anzahl der Zeitschritte definiert. Nach
DIN EN 61400 ist ein Mindestzeitintervall von 600 s je Lastfall gefor-
dert, welcher in Zeitschritte von 0,025 s gegliedert ist. Die Spalten
beinhalten die Ergebnisse der Lastenberechnung jeweils für den
Rotormittelpunkt sowie für die Hauptlagermitte.



Hauptlagermitte
N - fest

Abbildung 2: Koordinatensystem Hauptlagermitte

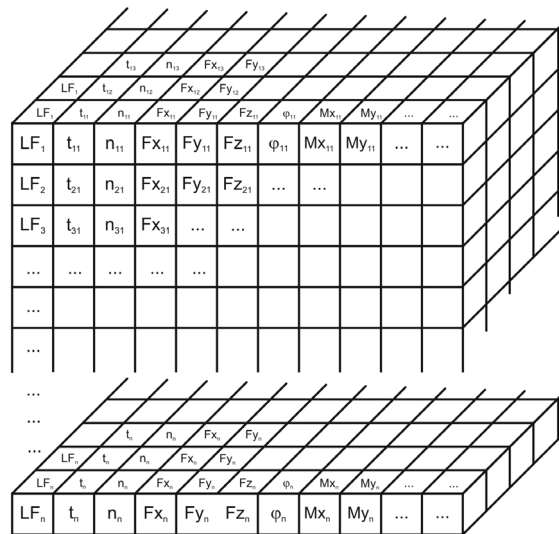


Abbildung 3: Load-Cube für die Lasten einer Windkraftanlage

Lastdatenanalyse

Um eine gesamtheitliche Betrachtung der Lastdaten bzw. eine Möglichkeit des Handlings aller Lastdaten zu ermöglichen, ist in MathWorks MATLAB ein Algorithmus umgesetzt worden, um die Gesamtheit der Lastreihen in einem Load-Cube zu erfassen. Hierbei werden alle Datensätze in eine dreidimensionale $m \times n \times u$ Matrix übertragen, wobei m die Anzahl der Lastfälle, n die Lastdatenkomponenten und u die Zeitschritte darstellen.

Der Vorteil dieses Modells ist es, Auswertungen über einen Lastfall hinaus ableiten zu können. So ergibt sich unter anderem die Frage nach einem Lastverlauf der Maximalkräfte je Lastfall innerhalb der Lager-schale, um eventuelle Aussagen über die Kraftverteilung während eines Lebenszyklus zu erhalten und somit eine dem Kraftverlauf angepasste Schmierung realisieren zu können. Die Kraftkomponenten des kartesischen Koordinatensystems wurden in ein Polarkoordinatensystem transformiert, welches dem des Hauptlagers entspricht. Zu erkennen ist eine Konzentration der Belastungen im $\pm 30^\circ$ Bereich, was vermuten lässt, dass der größte Einfluss der Belastungen aus den Eigengewichten hervorgerufen wird und weniger aus den Anströmkräften, was eine Dominanz der Eigengewichtsbelastung bedeutet. Beim Vergleich der Kraftverläufe der maximalen resultierenden Belastungen F_{\max} und der maximalen resultierenden Belastungsrichtungen σ_{\max} werden unterschiedliche Kraftverläufe erkennbar. Die Unterschiede sind in der Belastungsrichtung nicht signifikant, aber in den daraus resultierenden Belastungsgrößen. Grund hierfür ist eine Reduktion der Eigengewichtsbelastung durch die Auftriebskräfte der Schiefanströmung. Diese Tatsache würde bedeuten, dass mit zunehmender Anströmung d.h. Windgeschwindigkeit die Belastungen sinken müssten, was wiederum höhere Belastungen bei niedrigeren Drehzahlen hervorrufen sollte. Dieser Effekt ist auch so erkennbar. Verstärkt wird er durch die Tatsache, dass bei sicherheitsrelevanten Lastfällen ein Not-Stopp gefahren wird. Immer dann, wenn während des Normalbetriebs Fehler auftreten, die das Weiterbetreiben der Anlage unter sicheren Bedingungen nicht mehr gewährleisten, muss die Anlage schnellstmöglich stillgesetzt werden. Dieses führt zu extrem hohen Belastungen im gesamten Antriebsstrang (Schulze 2008).

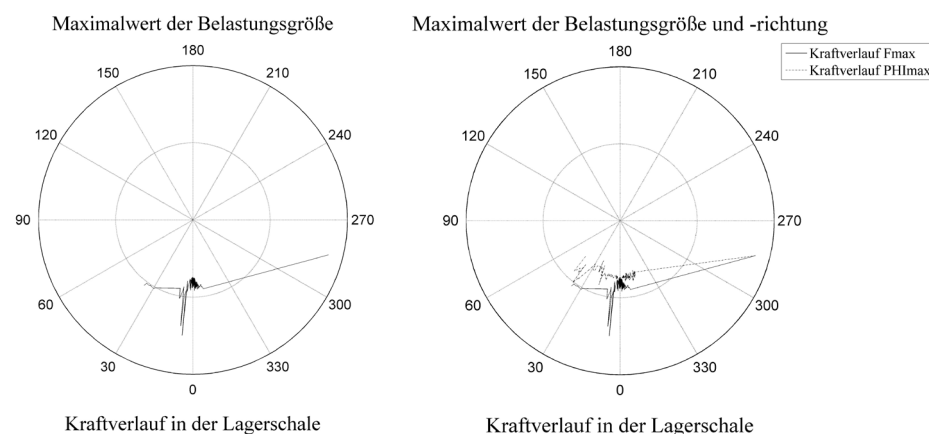


Abbildung 4: Verlauf der maximal resultierenden Kraft F_{max} in der Lagerschale des Hauptlagers

Abbildung 5: Verlauf der maximal resultierenden Belastungsgrößen F_{max} und φ_{max}

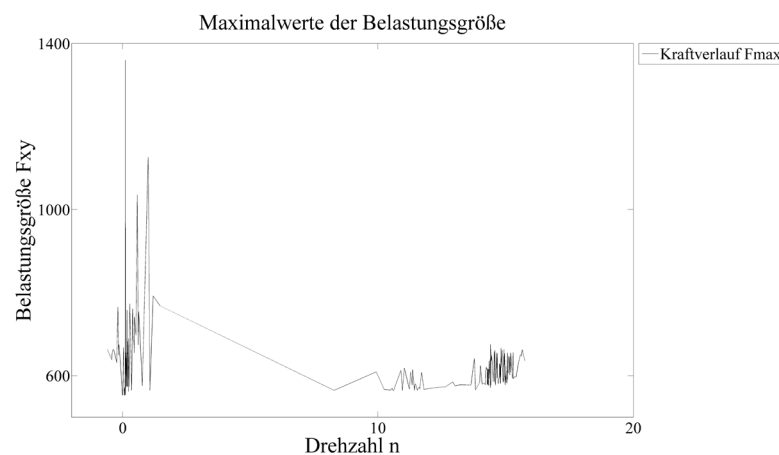


Abbildung 6: Verlauf der Kraft F_{max} in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl

Entwicklung eines Simulationsmodells

Die Berechnung der Tragfähigkeit eines Gleitlagers und die Simulation eines sich ausbildenden Druckverlaufs bzw. einer Schmierspaltausbildung, wird mit SiriusB durchgeführt. SiriusB ist ein Lagerberechnungsprogramm, welches am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik an der Universität Rostock stetig weiterentwickelt wird. Für die ersten Betrachtungen werden die Lastdaten der maximal resultierenden Kräfte je Lastfall herangezogen. Aus dem Load Cube werden die Zeitpunkte des Auftretens der maximal resultierenden Kraft je Lastfall herausgefiltert, inklusive der benötigten Übergabeparameter Winkelgeschwindigkeit, horizontale Kraft und vertikale Kraft, um sie anschließend als Zeitreihe mit einer angenommenen Zeitschrittweite von 1 s an SiriusB zu übergeben. Es ist der Grundgedanke, mit einer Belastungsreihe der maximalen Kräfte den gesamten Lebenszyklus näherungsweise zu beschreiben. SiriusB basiert auf der Lösung der Reynoldsdifferentialgleichung. In den ersten Betrachtungen wird mit den Gümbelschen Randbedingung gerechnet und nicht wie bei der erweiterten Reynoldsdifferentialgleichung mit den periodischen Randbedingung. Die periodischen Randbedingungen erleichtern die mathematische Behandlung des Problems. Sobald sich jedoch negative Drücke einstellen, ist wegen der Unfähigkeit zur Aufnahme größerer Unterdrücke im Schmiermittel die Theorie nur bis zu diesem Punkt gültig. Bei den Gümbelschen Randbedingungen hingegen werden die Unterdrücke nicht betrachtet und auf Null gesetzt (Lang & Steinhilper 1978). Es werden drei Lagermodelle für die ersten Ansätze verglichen. Dabei werden jeweils die Verlagerungsbahn, die Druckverläufe und die Schmierspalthöhen berechnet. Allen Lagermodellen ist ein konstanter Wellendurchmesser, ein konstantes Breiten-Durchmesser Verhältnis und die Annahme, dass keine Wellenbiegung und Wellenverkantung auftritt, gemein. Das erste Modell ist ein vollumschlossenes Lager ohne Schmiernuten und ohne hydrostatische Unterstützung. Dies gilt als klassisches hydrodynamisches Gleitlager. Die Verlagerungsbahn, die nach wenigen Iterationsschritten zu einer sehr großen Exzentrizität läuft und es damit zur Gefahr der Misch- und Festkörperreibung kommt, ist vollkommen instabil und lässt die Vermutung zu, dass nach wenigen Zeitschritten ein Schaben der Welle auf der Lagerschale die Folge wäre.

Aus dem Druckverlauf ist zu erkennen, dass im mittleren Bereich der Lagerschale, im Bereich von $\pm 30^\circ$, die höchsten Belastungen wirken, was die Aussage der Lastdatenanalyse bestätigt. Weiterhin ist an dem steilen Druckanstieg ein Abfall der Spaltgeometrie auf nahe Null zu erkennen, was bei der Verlagerungsbahn zu erwarten ist.

Das Modell II ist ein vollumschlossenes Lager mit zwölf symmetrisch über den Umfang angeordneten Schmiernuten und einer hydrostatischen Ölversorgung. Die Ölversorgung wird als einfache Variante mit einer Schmiermittelpumpe für alle Schmiernuten und je einer Laminardrossel für jede Schmiernut ausgeführt. Die Besonderheit liegt in der schmalen Ausführung der Schmiernut, da im klassischen hydrostatischen Gleitlager Schmiertaschen zum Einsatz kommen. Die Verlagerungsbahn, als Weg der Exzentrizität, konvergiert zu einem früheren Zeitpunkt. Die Konvergenz der Verlagerungsbahnberechnung ist ein numerisches Problem. Je höher die Exzentrizität, desto kritischer wird das Konvergenzverhalten des Verfahrens. Der Grund ist der starke Anstieg der Drücke bei geringen Exzentrizitätsänderungen. Im Modell II und Modell III wird mit hydrostatischer Unterstützung gerechnet, was sich in einem nicht so starken Anstieg der Drücke äußert und ein besseres Konvergenzverhalten zur Folge hat. Weiterhin fällt der Schmier-spalt nicht auf nahe Null ab, was sich in einem wesentlich flacheren Druckverlauf widerspiegelt.

In dem Druckverlauf sind zwei Spitzen im mittleren Sektor und der restliche flache Verlauf auffällig. Die Druckberge basieren auf den Schmiernuten und den vorherrschenden Belastungen in dem Bereich. Daraus wird erkennbar, dass über den gesamten Umfang der Lagerschale keine Schmiernuten benötigt werden, was den Grundgedanken aus der Lastdatenanalyse wieder aufgreift.

Das dritte Modell ist ein vollumschlossenes Lager mit fünf Schmiernuten, wovon je eine bei $\pm 30^\circ$, $\pm 15^\circ$ und eine bei 0° angeordnet ist. Die Ölversorgung wird auch im Modell III, als einfache Variante mit einer Schmiermittelpumpe für alle Schmiernuten und je einer Laminardrossel für jede Schmiernut ausgeführt. Das Konvergenzverhalten der Verlagerungsbahn ist vergleichbar mit dem des Modells II und verläuft genau so instabil. Die Schmier-spaltausbildung

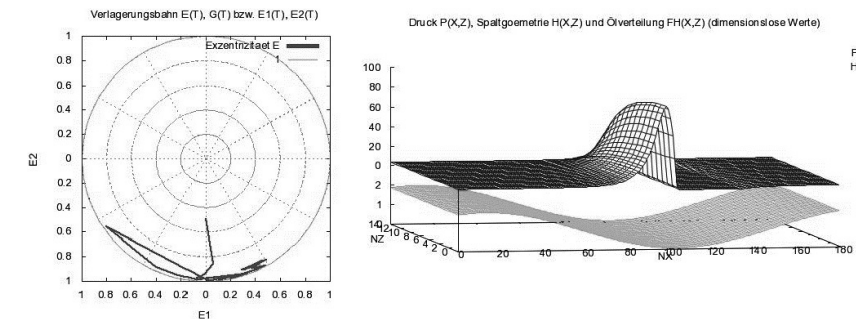


Abbildung 7: Simulierte Verlagerungsbahn und Druckverlauf an einem Zeitpunkt (Modell I)

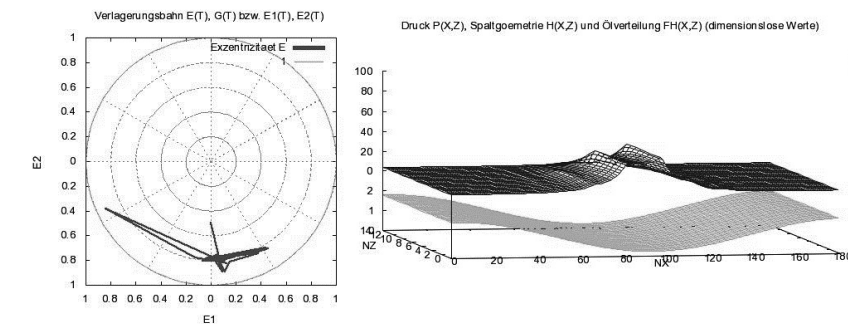


Abbildung 8: Simulierte Verlagerungsbahn und Druckverlauf an einem Zeitpunkt (Modell II)

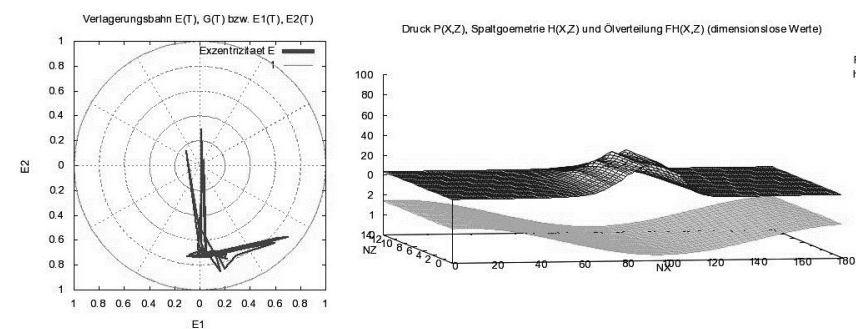


Abbildung 9: Simulierte Verlagerungsbahn und Druckverlauf an einem Zeitpunkt (Modell III)

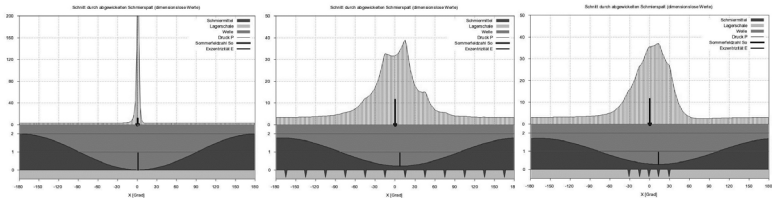


Abbildung 10: Simulierter Schmierpalt und Druckverlauf an einem Zeitpunkt (Modell I, II und III)

| Parameter | Modell I | Modell II | Modell III |
|--------------------------------|----------|-----------|------------|
| Schmierpalthöhe h_{min} [mm] | 0,0008 | 0,0328 | 0,0402 |
| Lagerdruck P_{max} [MPa] | 43,17 | 12,7259 | 8,0759 |
| Reibleistung I_w [kW] | 0,087 | 0,2 | 0,18 |
| Ölstrom \dot{q} [l/min] | 0 | 26 | 7,8 |

Tabelle 1: Auszug variabler Parameter der Modelle I, II und III

und der resultierende Druckverlauf sind ähnlich wie in Modell II und bestätigen daher die Annahme, dass keine Schmiernutanordnung um den gesamten Umfang nötig ist.

Die Schmierpaltausprägung verläuft höher als bei Modell II und der Druckverlauf noch flacher ohne Druckspitzenausbildung. Das liegt an der direkten Anordnung der Schmiernuten im Lastbereich, welcher aus der Lastdatenanalyse gewonnen wurde.

Zusammenfassung und Ausblick

Es ist möglich aus simulierten Lastdaten einer Windkraftanlage durch eine geeignete Lastdatenanalyse eine Aussage über Ort und Größe der Belastungen in Hinblick auf die Verwendung von Gleitlagern abzuleiten. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können daraus Lagermodelle für die Simulation des Tragfähigkeitsverhaltens erstellt werden. Es wurde ein Vergleich der Modelle eines hydrodynamischen Lagers, eines hydrostatischen Lagers mit klassischer Schmiernutanordnung und eines hydrostatischen Lagers mit einer lastabhängigen Schmiernutanordnung, durchgeführt.

Der Grundgedanke, die Schmiernutanordnung anhand von vorherrschenden Belastungsrichtungen und -größen ableiten zu können, wurde bestätigt. Der Vorteil im Modell III mit der lastabhängigen Schmiernutanordnung begründet sich im direkten Anordnen der Schmiernuten im Lastbereich. Das hat einen höheren Schmierpalt h_{min} , einen flacheren Druckverlauf P , einen geringeren Ölstrom q und eine geringe Reibleistung zur Folge.

Es bleibt die Frage zu klären, wie sich das Lagerverhalten während des gesamten Lebenszyklus und bei speziellen Lastfällen mit besonderen Anforderungen darstellt. Dazu werden weitere Lastdatenanalysen vollzogen, um auf der einen Seite aus der Vielzahl an Lastfällen repräsentative Lastfälle herauszufiltern und auf der anderen Seite, auf Grundlage einer statistischen Auswertung der Lastdaten, Belastungskollektive für weitere Untersuchungen erstellen zu können.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Umweltschutz 2012: Erneuerbare Energien in Zahlen
Deutsches Institut für Normung e.V 2006: DIN EN 61400-1 Windenergieanlagen Teil
1: Auslegungsanforderung, Berlin: VDE-Verlag
Schulze, T. 2008: Ganzheitlich dynamische Antriebsstrangbetrachtung von
Windenergieanlagen unter Verwendung modularer Simulationsmodelle,
Göttingen: Sierke Verlag
Lang, O.R.; Steinhilper, W. 1978: Gleitlager, Konstruktionsbücher Band 31, Berlin-
Heidelberg-NewYork, Springer-Verlag,

- Jonuschies, I. 2011: Alternatives Lagerkonzept für die Rotorlagerung von Windenergieanlagen, 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, Aachen, Shaker-Verlag
- Wegmann, R.; Kreja, S.-U.; Brökel, K. 2009: Modernes Verfahren zur Simulation stationärer und instationärer Belastungen beim hydrostatischen und hydrodynamischen Betrieb von Radialgleitlagern unter Berücksichtigung von Ölzufuhr und Wellenbiegung. VDI-Tagung Gleit- und Wälzlagerungen 2009, VDI-Berichte 2069, Wiesloch, VDI-Verlag

Kontakt

Dipl.-Ing. Ingo Jonuschies
 Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Brökel
 Universität Rostock
 Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
 Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD
 Albert-Einstein-Straße 2
 18059 Rostock
www.kt.uni-rostock.de

Christoph Wehmann, Florian Nützel & Frank Rieg

Auslegung von Dehnschrauben bei plastischem Materialverhalten unter Einsatz der Finite-Elemente-Analyse

1 Einleitung

Die Vorteile von Dehnschrauben ergeben sich aus der großen Verformung, die bei der Montage eingestellt und mit Hilfe eines teilierten Schafts ermöglicht wird. Zusätzlich zu dem geringeren Schaftdurchmesser erhöht eine größere Länge die Nachgiebigkeit und damit die Längenänderung. Aufgrund dieser hohen Längenänderung benötigen Dehnschrauben keine Schraubensicherung und sind unempfindlicher gegenüber Setzverlusten.

Die Dehnung und Längenänderung könnte durch Spannungen oberhalb der Elastizitätsgrenze bis in den Bereich plastischer Verformungen erhöht werden, um die positiven Eigenschaften dieses Maschinenelements weiter zu verstärken. Weiterhin führt die im Zuge der plastischen Dehnung auftretende Kaltverfestigung des Schraubenmaterials zu einem Anstieg der Fließ- bzw. Streckgrenze und eröffnet auf diesem Wege zusätzliches Festigkeitspotential. Die Abschätzung dieses Potentials zur Steigerung der Lastkapazität von Dehnschrauben ist wesentlicher Teil dieses Beitrags. Dazu wird eine exemplarische Dehnschraube näher betrachtet, die der Norm DIN 2510 (Beuth 1971) entspricht. Eine Berechnung der in der Dehnschraube herrschenden Spannungen bei Vorliegen pla-

stischen Materialverhaltens ist, insbesondere im Hinblick auf die Berechnung von Kerbspannungen, nur mit numerischen Verfahren möglich. Daher ist vorgesehen, die Untersuchungen unter Einsatz der Finite Elemente Analyse (FEA) durchzuführen.

Von ausschlaggebender Bedeutung für eine präzise Spannungs- berechnung im Bereich plastischen Materialverhaltens ist die Werk- stoffmodellierung im Rahmen der FEA. Diese geschieht mit Hilfe der Materialmatrix, welche bei Inelastizität numerisch bestimmt werden muss. Basis für die hier durchgeführten numerischen Be- rechnungen der Materialmatrix ist ein Algorithmus von Simo und Hughes (Simo & Hughes 1998), welcher für die Erfassung ideal- plastischen Werkstoffverhaltens unter Verwendung eines Mehrfel- dansatzes geeignet ist. Die Erweiterung dieses Algorithmus und der zugehörigen Berechnungsgleichungen zur Beschreibung nichtline- arer Verfestigungsvorgänge ist weiterer Gegenstand dieser Veröf- fentlichung. In diesem Zusammenhang sind neben der Materialma- trix auch die inneren Kräfte und Spannungen zu berechnen. Dabei kommt ein isotropes, nichtlineares Verfestigungsgesetz zum Ein- satz. Für die Erfassung plastischer Verformungen sind neben dem Verfestigungsgesetz noch die Fließbedingung und die Fließregel er- forderlich. Als Fließbedingung findet die bewährte Vergleichsspan- nung nach von Mises (von Mises 1913) Anwendung, hinsichtlich der Fließregel kommt das Prinzip vom Maximum der dissipativen plastischen Arbeit (Betten 2001) zum Einsatz. Das resultierende Plastizitätsmodell wird in das Finite Elemente System Z88 (Rieg & Hackenschmidt 2009) implementiert und derart ausgearbeitet, dass neben den Spannungen und den elastischen Dehnungen die plastischen Dehnungen und die erhöhten Fließgrenzen im Ergebnis vorhanden sind. Dieses Vorgehen ermöglicht die Berücksichtigung der Vorspann- und Klemmkraftverluste infolge von bleibenden De- formationen, die im Betrieb aufgetreten sind.

Die Untersuchungen im Beitrag betreffen die Montage und den Betrieb der Dehnschrauben und zielen auf die Angabe von konkre- ten Handlungsempfehlungen für den Konstrukteur ab, ob und in welchem Maß plastische Dehnungen schon bei der Montage oder im Betrieb zugelassen werden können. Weiterhin enthalten diese

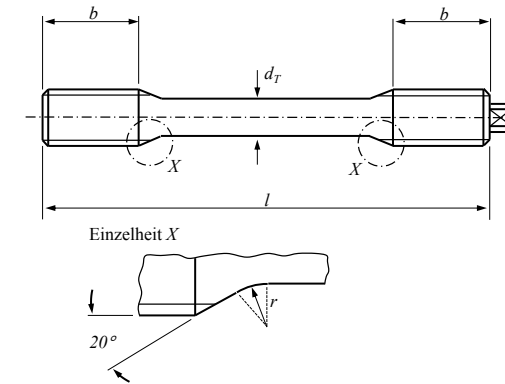


Abbildung 1: Geometrie der Dehnschraube gemäß Norm DIN 2510 (Beuth 1971)

Empfehlungen Angaben über die gesteigerte Lastkapazität auf- grund einer höheren zugelassenen Dehnung. Die dabei zugelassene plastische Dehnung ist werkstoffabhängig und gewährleistet eine definierte Dehnungsreserve. Aufgrund der veränderten Spannungs- berechnung bei Berücksichtigung plastischen Materialverhaltens ist außerdem vorgesehen, die genormten Maße wie den Radius am Dehnschaft zu überprüfen.

2 Geometrie und FE-Modell mit Randbedingungen

Die nachfolgenden Betrachtungen werden vorwiegend an einer Dehnschraube der Standardform L, Bezeichnung

M20 × 200 DIN 2510 – C45,

vorgenommen. Diese besitzt gemäß DIN 2510 (Beuth 1971) eine Gesamtlänge von $l = 200$ mm und ein metrisches M20-Gewinde. Der Werkstoff der Dehnschraube ist der Vergütungsstahl C45 (Werkstoffnummer 1.0503 (Wegst 2007)).

Sämtliche Maßbezeichnungen sind in Abbildung 1 zu sehen. Ferner beträgt das Maß $b = 28$ mm sowie der in der Detailzeichnung ein- gezeichnete Radius 10 mm. Der Taillendurchmesser d_T ist 15 mm. Abbildung 2 zeigt ein Foto der betrachteten Dehnschraube mit zu- gehöriger Mutter der Form NF nach DIN 2510.

Hinsichtlich der Randbedingungen wird angenommen, dass die Dehnschraube auf einer Seite komplett in ein Gewinde eingeschraubt ist und auf der anderen Seite durch eine Mutter gehalten wird. Die eingeschraubte Seite wird in alle Richtungen fixiert, während die Seite der Mutter als Krafteinleitung dient. Dazu wird die Schraubenkraft auf die zugehörige Mantelfläche verteilt, die in Abbildung 3 dunkel markiert ist (rechte Seite).

Abbildung 3 verdeutlicht fernerhin die Vereinfachung der Gewindegeometrie auf zylindrische Körper. Dabei diene der Spannungsdurchmesser als Maß für den Zylinder. Der Spannungsdurchmesser eines M20-Gewindes ist $d_s = 17,655 \text{ mm}$ (Decker & Kabus 2011).

Bezüglich des Elementtyps wurden Tetraeder des Z88-Typs Nr. 16 (Rieg & Hackenschmidt 2009) gewählt. Diese besitzen einen quadratischen Ansatz mit zehn Knoten und zeichnen sich bei adäquater Wahl der Integrationsordnung durch eine sehr genaue Spannungsberechnung aus. Die den durchgeführten Berechnungen zu Grunde liegende Integrationsordnung ist vier.



Abbildung 2: Dehnschraube und Mutter der Form NF

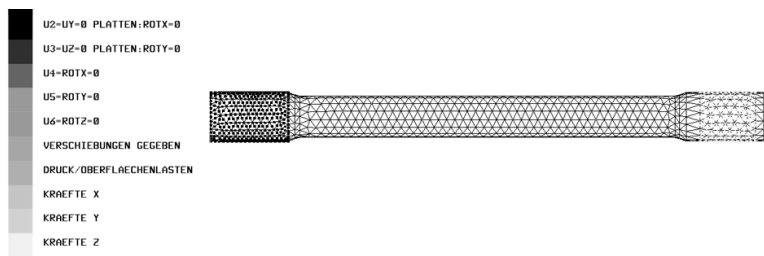


Abbildung 3: Finite-Elemente-Modell mit Randbedingungen

3 Beschreibung des Materialverhaltens

Auf die Modellierung des Werkstoffverhaltens wurde besonderen Wert gelegt, um eine Auslegung der Dehnschrauben im plastischen Bereich sicher vornehmen zu können. Das ausgearbeitete Materialmodell unterscheidet je nach Beanspruchung und Werkstoffzustand am betreffenden Integrationspunkt zwischen elastischem und plastischem Verhalten; im elastischen Fall erfolgt die Verknüpfung von Spannungen und Dehnungen nach dem Hooke'schen Gesetz. Bei Überschreiten der Elastizitätsgrenze bzw. Fließgrenze schließt nach dem elastischen Prädiktorschritt ein plastischer Korrektorschritt im Zuge des hier eingesetzten, sog. Prädiktor-Korrektor-Verfahrens (Wriggers 2001) an. Die plastische Berechnung basiert dabei auf der Fließbedingung nach von Mises (von Mises 1913), in Verbindung mit der Anwendung des Prinzips vom Maximum der dissipativen, plastischen Arbeit (Betten 2001). Die Fließbedingung kann in der Form

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 s_{ij} s_{ij}} - \sqrt{\frac{2}{3}} k_f \quad (1)$$

geschrieben werden. Hier sind s_{ij} die Deviatorspannungen, k_f ist die Fließgrenze. Die zwei Zustände werden dann wie folgt unterschieden:

$$\begin{aligned} f < 0 &\rightarrow \text{elastisch} \\ f = 0 &\rightarrow \text{plastisch} \end{aligned} \quad (2)$$

Grundlage des hier eingesetzten Rechenverfahrens zur numerischen Erfassung der plastischen Verformungen ist ein Algorithmus von Simo und Hughes (Simo & Hughes 1998) zur Beschreibung ideal-plastischer Plastizität mit Fließbedingung nach von Mises. Dieser Algorithmus wurde erweitert, um nichtlineare Verfestigungsvorgänge erfassen zu können.

Die hier zum Einsatz kommende Fließregel des Prinzips vom Maximum der dissipativen, plastischen Arbeit und die Fließbedingung unter Berücksichtigung beliebig nichtlinearer, isotroper Verfestigung führen auf nachstehendes Gleichungssystem.

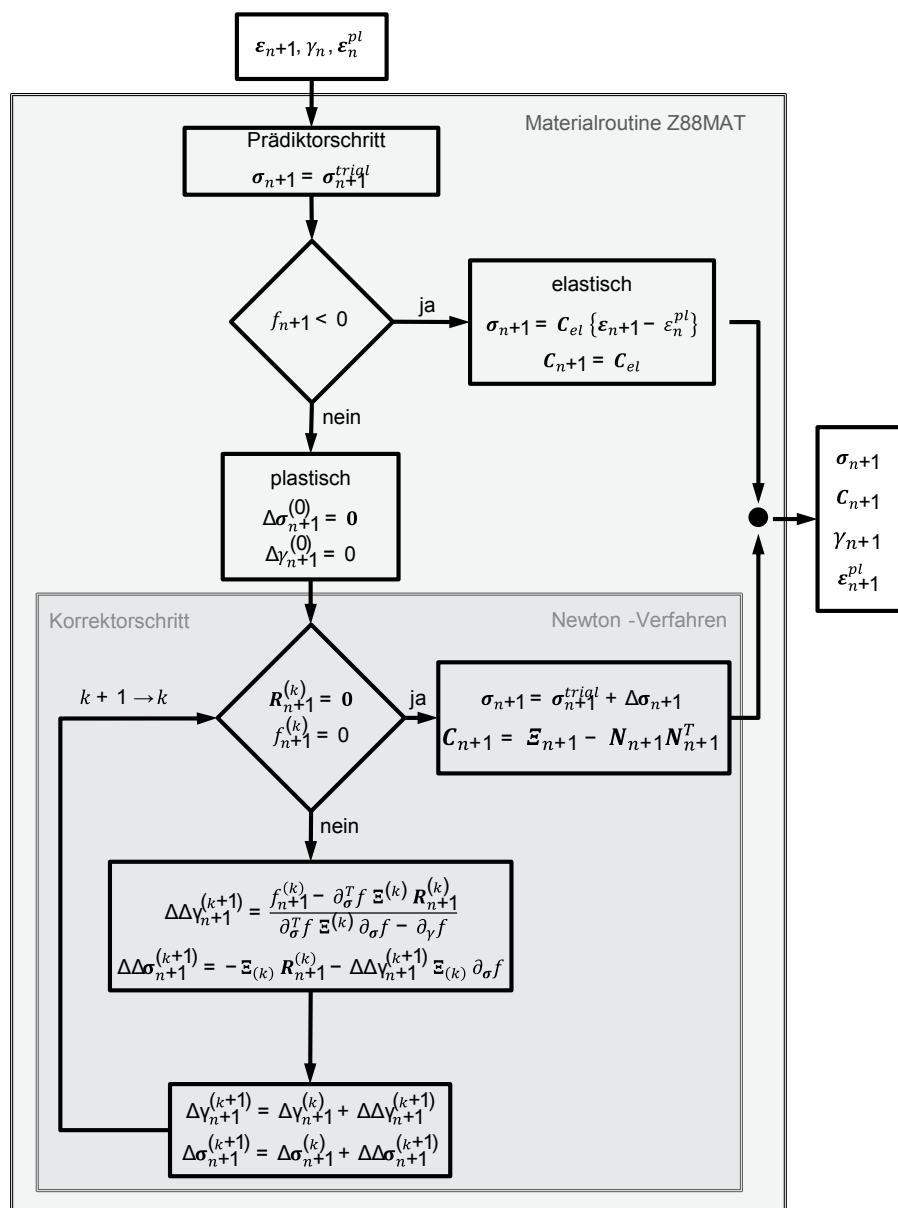


Abbildung 4: Plastische Iteration nach (Simo & Hughes 1998), erweitert für nichtlineare Verfestigung

$$\begin{aligned} R_{n+1} &= -\varepsilon_{n+1}^{pl} + \varepsilon_n^{pl} + \Delta\gamma_{n+1} \partial_{\sigma} f = 0 \\ f_{n+1} &= f(\sigma_{n+1}, k_f(\gamma_{n+1})) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Darin bezeichnet der Index $n+1$ das Ende des momentanen »Pseudo-Zeitschritts«, n den zugehörigen Anfang. Der Begriff Zeitschritt ist an dieser Stelle eigentlich nicht ganz korrekt, da zwar ein wegabhängiges (von der Belastungsgeschichte abhängiges) aber dennoch zeitunabhängiges Materialverhalten vorliegt (Betten 2001). Zur anschaulicheren Beschreibung wird hier aber trotzdem die Bezeichnung Zeitschritt verwendet. Entsprechend der Notation ist $\hat{\alpha}_n^{pl}$ die plastische Dehnung zu Beginn und $\hat{\alpha}_{n+1}^{pl}$ die gesuchte, plastische Dehnung am Ende. Ferner misst $\Delta\gamma_{n+1}$ das plastische Dehnungsinkrement und damit den Betrag der plastischen Dehnung im momentanen Zeitschritt. Die Größe $\partial_{\sigma} f$ symbolisiert einen Vektor mit den Ableitungen der Fließbedingung f nach den Spannungen.

$$\partial_{\sigma} f := \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_3} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_4} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_5} \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma_6} \right)^T \quad (4)$$

Die Lösung des Gleichungssystems (3) wird mit Hilfe des Newton-Verfahrens realisiert. Das gesamte Vorgehen ist in Abbildung 4 zu sehen. Am Ende des Korrektorschritts stehen sämtliche Zustandsgrößen fest. Dies sind der Wert der plastischen Zustandsgröße γ_{n+1} und die plastischen Dehnungen $\hat{\alpha}_{n+1}^{pl}$. Außerdem sind die korrigierten Spannungen $\hat{\sigma}_{n+1}$ bekannt und die Materialmatrix C_{n+1} ist berechnet.

4 Einbettung in das System Z88

Die in Abbildung 4 gezeigte Materialroutine wird während des globalen Lösungsprozesses von den Elementroutinen aufgerufen. Dabei handelt es sich um Routinen des Z88-Typs Nr. 16 (Tetraeder mit zehn Knoten), die einen Mehrfeldansatz nach Simo und Hughes (Simo & Hughes 1998) verwenden. Dieser Mehrfeldansatz interpoliert neben den Verschiebungen zusätzlich die hydrostatische Spannung (den Druck) und den dilatatorischen Anteil der Dehnung. Die zusätzlichen Freiwerte werden allerdings auf Elementebene gelöst, so dass global weiterhin allein die Knotenverschiebungen zu berechnen sind.

In Abbildung 5 ist eine Übersicht über die Einbettung in das Finite-Elemente-System Z88 gegeben. Der gesamte Lösungsprozess bei plastischer Berechnung umfasst bis zu vier ineinander geschachtelte, iterative Lösungsprozesse. Diese sind von außen nach innen:

- Last- bzw. (Pseudo-) Zeitschleife
- Iterationsschleife des globalen Newton-Raphson-Verfahrens
- Ggf. iterative Lösung des linearen Subgleichungssystems
- Iterationsschleife zur lokalen Lösung der Materialgleichungen (Newton-Verfahren)

Die Realisierung des Mehrfeldansatzes erfordert die Einführung von Formfunktionen mit spezieller Fundamentealeigenschaft: abweichend von den Verschiebungsansätzen müssen diese Formfunktionen auf die Integrationspunkte statt auf die Knoten bezogen werden. D.h. sie müssen am jeweiligen Integrationspunkt eins sein und an den anderen null. In (Simo & Hughes 1998) wird allgemein angegeben:

$$\Theta = \mathbf{I}^T \Theta^e \quad (5)$$

Darin ist $\Theta = \Theta(r, s, t)$ die Dilatation, die bei diesem Verfahren ein Freiheitsgrad ist. Bei einem klassischen Verschiebungsansatz würde die Dilatation gemäß nachstehender Formel aus den Verschiebungen berechnet werden.

$$\Theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

Der Vektor $\tilde{\mathbf{A}}$ enthält die Formfunktionen für die Interpolation der Dilatation und $\dot{\mathbf{E}}^e$ die Integrationspunktdilatationen, die dem Analogon der Knotenverschiebungen entsprechen. Die Interpolation des Drucks kann mit dem gleichen Ansatz realisiert werden (Simo & Hughes 1998):

$$\mathbf{p} = \tilde{\mathbf{A}}^T \mathbf{p}^e \quad (7)$$

Ausgehend von diesem allgemeinen Ansatz ist als nächstes die Anzahl an Freiheitsgraden für Druck bzw. Dilatation festzulegen, um die Implementation vornehmen zu können. Hughes empfiehlt,

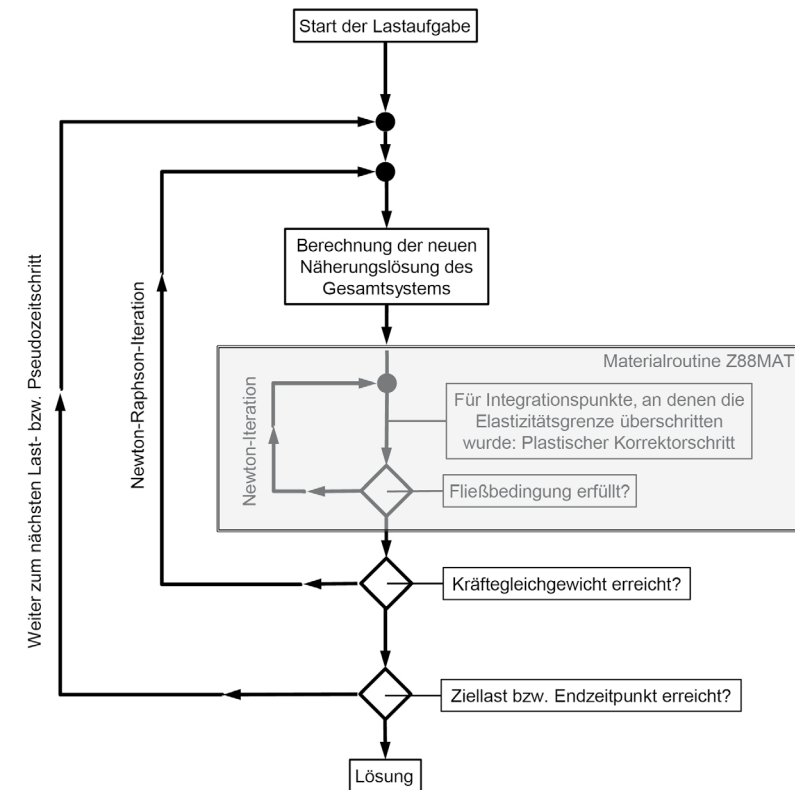


Abbildung 5: Schachtelung der Lösungsprozesse

bei Mehrfeldansätzen die Polynomordnung der Formfunktionen von Spannungen und Dehnungen (Größen, die allgemein auf den Ableitungen der Verschiebungen beruhen) eine Stufe niedriger zu wählen, als die Polynomordnung der Verschiebungsinterpolation (Hughes 2000). Weil hier Tetraeder mit quadratischem Ansatz eingesetzt werden, fällt die Wahl auf lineare Polynome zur Interpolation der Dilatationen und Drücke. Es ist also eine Integrationsordnung von vier Integrationspunkten festzulegen. Um die Analogie zur Verschiebungsinterpolation deutlich zu machen, sind in (8) noch einmal sämtliche Interpolationen aufgeführt, hier als Summenformel anstelle von Vektor-Skalarprodukten.

$$\Theta = \sum_{i=1}^4 \Gamma_i \Theta_i^e \quad (8a)$$

$$p = \sum_{i=1}^4 \Gamma_i p_i^e \quad (8b)$$

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{10} N_i \mathbf{u}_i \quad (8c)$$

Weil bei einem solchen Ansatz die Anzahl der Integrationspunkte die Formfunktionen Γ_i bestimmt, ist eine einfache Einstellung der Integrationsordnung nicht möglich – es muss eine komplett andere Elementroutine aufgebaut werden. Daher bieten FE-Programme vielfach nur eine mögliche Integrationsordnung pro Elementtyp an und besitzen zum Ausgleich verschiedene Elementtypen, die sich nur durch ihre Integrationsordnung unterscheiden. Die Abbildung 6 verdeutlicht noch einmal die Unterschiede zwischen den verschiedenen Form- oder Ansatzfunktionen. An den mit Kreisen markierten Knoten erfüllen die Formfunktionen N_i die Fundamenteigenschaft, an den mit Kreuzen markierten Integrationspunkten erfüllen die Formfunktionen Γ_i die Fundamenteigenschaft.

Die Formfunktionen Γ_i bestimmen sich auf Grundlage der Gauß'schen Integration in Tetraederkoordinaten mit Hilfe der Integrationsstützstellen (Rieg & Hackenschmidt 2009) wie nachkommand gezeigt.

$$\begin{aligned} \Gamma_I &= 1,92705097 - 2,23606795 \cdot (r + s + t) \\ \Gamma_{II} &= -0,309016989 + 2,23606795 \cdot r \\ \Gamma_{III} &= -0,309016989 + 2,23606795 \cdot s \\ \Gamma_{IV} &= -0,309016989 + 2,23606795 \cdot t \end{aligned} \quad (9)$$

Es ist zu beachten, dass die Formfunktionen Γ_i auf das dasselbe, natürliche Koordinatensystem r, s, t bezogen sind wie die Formfunktionen der Verschiebungsinterpolation.

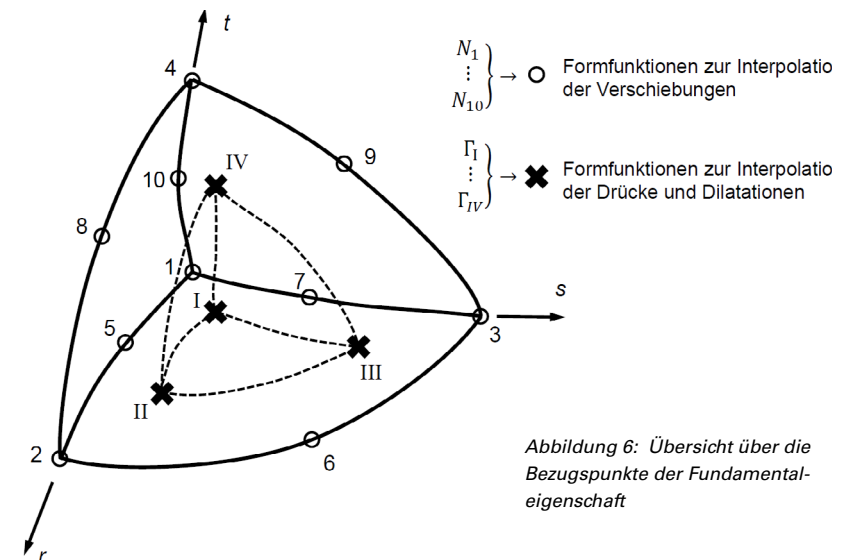


Abbildung 6: Übersicht über die Bezugspunkte der Fundamenteigenschaft

5 Vergleich mit konventioneller Auslegung anhand der Einzelschraube

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Berechnung einer Einzelschraube dargestellt. Neben den Berechnungen unter Berücksichtigung plastischen Materialverhaltens sind stets Vergleichsberechnungen konventioneller Materialmodellierung durchgeführt worden. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse und verdeutlicht den Fehler der elastischen Berechnung bei großen Dehnungen. Die konventionelle Auslegung verwendet hier die Elastizitätsgrenze als Werkstoffkennwert: Aus der Abbildung liest man einen Wert von $F = 105 \text{ kN}$ ab. Für den entsprechenden Kennwert der Auslegung unter Berücksichtigung plastischen Materialverhaltens ist zu entscheiden, welche Dehnungs- bzw. Kraftreserve vorgehalten werden soll.

Der Doppelpfeil in Abbildung 7 mit der Bezeichnung ΔF_{rm} kennzeichnet die maximale Kraftreserve, die bis nahe an die Zugfestigkeit R_m herangeht. Sie beträgt in diesem Beispiel 120 kN . Bei Zulassung der Hälfte der Reserve und damit einem Sicherheitswert von 2 ergibt

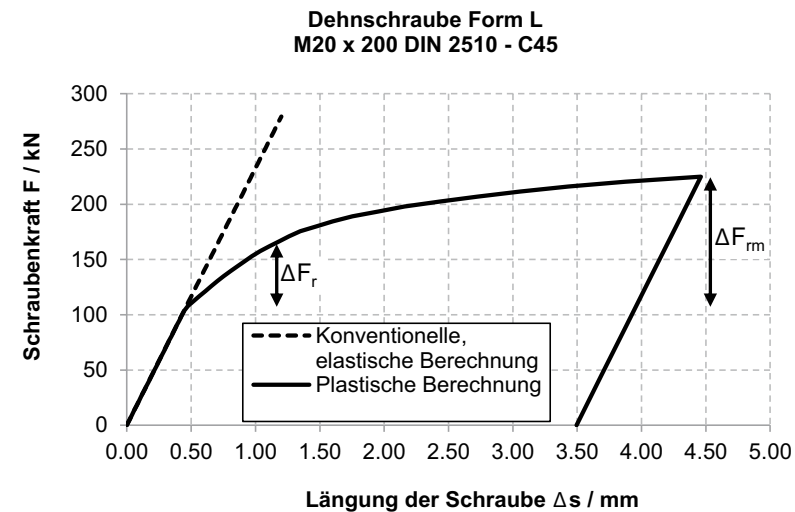


Abbildung 7: Kennlinien der Einzelschraube

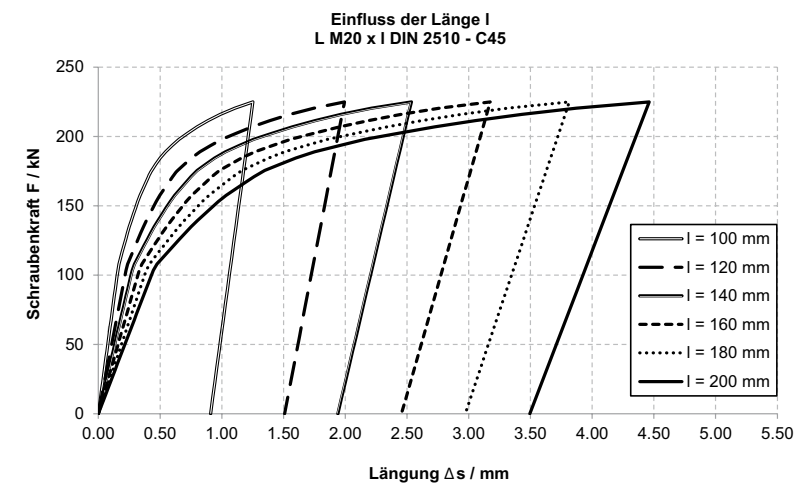


Abbildung 8: Ergebnisse der Berechnungen mit verschiedenen Schraubenlängen

sich ein Wert von 60 kN, der in Abbildung 7 als ΔF_r eingetragen ist. Aufgrund der bei metallischen Werkstoffen in der Regel im Laufe der plastischen Deformation abnehmenden Steifigkeit der Materialtangente sind die Dehnungs- und die Längungsreserve bei 50 % Kraftreserve sehr viel höher als 50 %. In dem Beispiel ist die maximale Längungsreserve ca. 4,02 mm, die Längungsreserve bei 50 % Kraftreserve beträgt ca. 0,74 mm. Daraus ergibt sich eine prozentuale Reserve von 82 %.

Eine Alternative mit noch höherem Potential zur Steigerung der Lastkapazität wäre also, den Sicherheitsfaktor auf die Längungs- bzw. Dehnungsreserve zu beziehen. Jedoch ist es in der Regel praktischer mit Unsicherheiten der Belastung zu rechnen, da im Entwicklungsprozess meistens zunächst Belastungswerte vorhanden sind. Bei der Auslegung druckführender Komponenten oder der Entwicklung von Brennräumen in der Motorentechnik beispielsweise werden Druckgrenzen vor den (daraus resultierenden) Verformungsgrenzen bekannt sein. Außerdem gewährleistet dies stets eine sicherere, konservativere Auslegung.

Das Vorgehen unter Beachtung einer Kraft- und somit Spannungsreserve von 50 % ermöglicht damit die Steigerung der Auslegungsgrenze von 105 kN (konventionelle, plastische Auslegung) auf 165 kN (plastische Auslegung). Dies entspricht einer Steigerung der Lastkapazität um 57 %.

Abschließend wurden Berechnungen durchgeführt, die den Einfluss der Schraubenlänge verdeutlichen sollen. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen für Schraubenlängen von 100 mm bis 200 mm. Da die Elastizitätsgrenze bei diesem einfachen Belastungsfall unabhängig von der Länge ist, führt die gleiche Kraftreserve zu einer gleichen Steigerung der Lastkapazität. Die Längungsreserve nimmt allerdings mit steigender Länge zu. Daher ist auch bei plastischer Auslegung eine möglichst lange Dehnschraube vorteilhaft.

6 Vergleich mit konv. Auslegung anhand eines Anwendungsbeispiels

Die Betrachtungen an der Einzelschraube werden hier erweitert auf die Betrachtung eines Zylinderkopfes, der mit Dehnschrauben fixiert ist. In Abbildung 9 ist das Zylinderkurbelgehäuse eines Motorradmotors (Honda CBR 600F) gezeigt, welches zehn Bohrungen zur Befestigung des Zylinderkopfes besitzt. Die zehn Dehnschrauben besitzen ein Gewinde der Größe M9 und einen Taillendurchmesser von $d_T = 6,7$ mm. Die folgenden Betrachtungen erfolgen exemplarisch anhand der vorhandenen Werkstoffdaten von C45.

Die Elastizitätsgrenze von 600 N/mm^2 wird im Falle von M9-Schrauben bei $21,6 \text{ kN}$ erreicht. Eine Auslegung bis zur Elastizitätsgrenze führt bei der Wahl von kleineren Schrauben sofort zur Überschreitung des elastischen Bereichs. Eine Auslegung bis in den plastischen Bereich erlaubt hier den Einsatz von M8-Schrauben mit einem Taillendurchmesser von $d_T = 6,2$ mm; bei gleicher Belastung ($21,6 \text{ kN}$) wird die Elastizitätsgrenze, die im Falle von M8-Schrauben dem Kraftwert $18,4 \text{ kN}$ entspricht, um $3,2 \text{ kN}$ überschritten. Die Berechnungen ergaben, dass M8-Schrauben dann immer noch ca. 85% der maximalen Kraftreserve ΔF_m als Sicherheit aufweisen. Somit erlaubt die Auslegung bis in den plastischen Bereich bei diesem Anwendungsbeispiel die Wahl einer geringeren Schraubenstärke. Auch wenn die Gewichtsparsnis dabei nicht sonderlich hoch sein wird, kann eine kleinere Schraube möglicherweise durch Bauraumgewinne Vorteile in konstruktiver Hinsicht bringen.

7 Einfluss des Radius am Dehnschaft

Schließlich ist die Untersuchung des Einflusses vom Radius am Dehnschaft vorgesehen. Aufgrund des Kerbeffekts werden hier die höchsten Spannungen auftreten. Die Norm DIN 2510 (Beuth 1971) schreibt einen Radius von 10 mm bei der hier betrachteten Dehnschraube ($M20 \times 200 \text{ DIN 2510 - C45}$) vor. Die Vereinbarkeit dieses Werts mit einer Auslegung im plastischen Bereich soll nachfolgend überprüft werden. Dazu werden elastische und plastische Rechnungen zu Schrauben mit zwei verschiedenen Radien durchgeführt.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse dieser Rechnungen; dargestellt ist jeweils der Spannungsverlauf im Kerbgrund.

Die Kurven verdeutlichen, dass wie erwartet in der Mitte des Querschnitts die niedrigsten Spannungen auftreten. Aufgrund der Kerbwirkung nehmen diese nach außen hin zu. Im Falle der linearen Berechnung steigen sie bis zur Oberfläche auf ein Maximum an. Die Erfassung des plastischen Bereichs in der numerischen Analyse zeigt jedoch ein unerwartetes Maximum mit anschließendem Abfall bis zur Oberfläche. Dies wird damit zusammenhängen, dass außen als erstes die Elastizitätsgrenze erreicht wird und hier somit die ersten plastischen Dehnungen auftreten. Diese führen zu einer Veränderung des sich einstellenden Spannungsverlaufs und ergeben auf diese Weise ein anderes Resultat des Kerbwirkungseffekts. Dies muss bei der Auslegung im plastischen Bereich berücksichtigt werden.

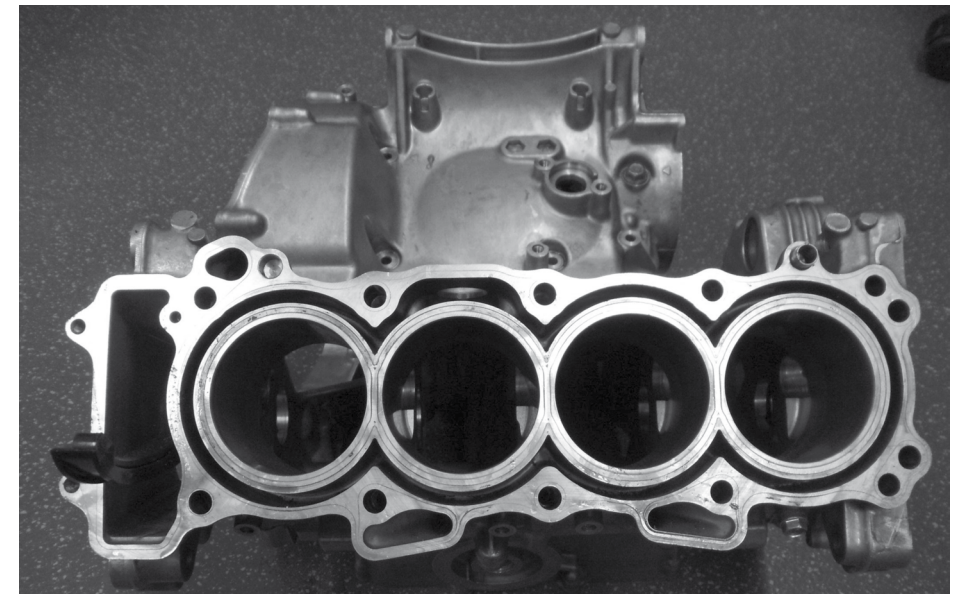


Abbildung 9: Zylinderkurbelgehäuse mit zehn Bohrungen zur Verschraubung

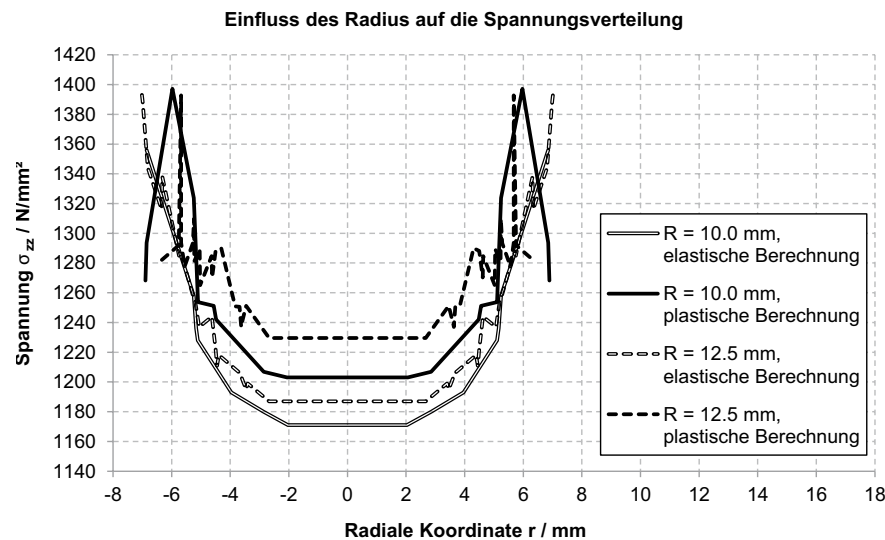


Abbildung 10: Spannungsverläufe im Kerbgrund, aufgetragen über der radialen Koordinate

8 Fazit und Ausblick

Die Berechnungen unter Berücksichtigung plastischen Materialverhaltens zeigten das Potential der erweiterten Auslegung zur Laststeigerung auf. Bezogen auf die Einzelschraube ergab sich eine mögliche Steigerung der Lastkapazität von +57% für den betreffenden Stahl. Die Betrachtung eines Anwendungsbeispiels verdeutlichte, dass die Ausschöpfung einer höheren Lastkapazität zu mehr Freiheiten bei der Schraubenwahl führt. Die Ausführungen belegen aber auch den numerischen und modellierungstechnischen Mehraufwand, der sich bei Erfassung plastischen Materialverhaltens ergibt. Inwiefern dieser für den Ausnutzungsgewinn gerechtfertigt ist, muss der Konstrukteur je nach Anwendungsfall entscheiden. Das Vorgehen zum Erreichen einer diesbezüglichen Entscheidungsbasis wurde im vorliegenden Aufsatz skizziert. Schließlich ergaben die Untersuchungen der Spannungsverteilung im Kerbgrund einen gegenüber der elastischen Berechnung veränderten Verlauf aufgrund des Kerbeffekts. Dies ist bei der Auslegung zu berücksichtigen.

9 Literaturangaben

- Betten, J. 2001: Kontinuumsmechanik. Elastisches und inelastisches Verhalten isotroper und anisotroper Stoffe. 2. Auflage, Berlin u. a.: Springer Verlag.
- Beuth 1971: DIN 2510, Blatt 3: Schraubenverbindungen mit Dehnschaft. Schraubenbolzen. Berlin: Beuth Verlag.
- Decker, K.-H. & Kabus, K. 2011: Maschinenelemente, Funktion, Gestaltung und Berechnung. München: Carl Hanser Verlag.
- Hughes, J. R. 2000: The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. Mineola (NY): Dover Publications.
- Mises, R. E. v. 1913: Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. In: Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, S. 582–592.
- Rieg, F. & Hackenschmidt, R. 2009: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. 3. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Simo, J. C. & Hughes, T. J. R. 1998: Computational Inelasticity. New York, Berlin, Heidelberg u. a.: Springer Verlag.
- Wegst, C. & Wegst, M. 2007: Stahlschlüssel. Marbach: Verlag Stahlschlüssel Wegst.
- Wriggers, P. 2001: Nichtlineare Finite-Element-Methoden. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.

Kontakt

Dipl.-Ing. Christoph Wehmann
Dipl.-Ing. Florian Nützel
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universität Bayreuth
Universitätsstraße 30
95447 Bayreuth
Tel.: 0921 / 55 – 7258
E-Mail: christoph.wehmann@uni-bayreuth.de
www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de
www.z88.de

Design Process Management

1 Einleitung

Arbeitsabläufe werden in der Regel durch eine jahrzehntelange Praxis geprägt. Eine Vielzahl von individuellen Gewohnheiten und Aspekten bildet oft eine hermetische Abgrenzung gegenüber allen Versuchen, organisatorische Veränderungen herbeizuführen. Dies gilt in besonderem Maße für die Konstruktion. Die unvoreingenommene Betrachtung heutiger Konstruktionsabläufe lässt uns feststellen, dass der Arbeitsprozess an sich seit Anbeginn vor vielen tausend Jahren fast unverändert geblieben ist. Abgesehen von einer Reihe mehr oder weniger voneinander isolierter Computer-Aided Software-Tools, die den Konstrukteur bei der Modellierung, Simulation und Datenspeicherung unterstützen, bekommt er keine weiteren Hilfestellungen. Eine Ausnahme bilden hier automatisierte Verfahrensketten, die auf der Basis fest definierter Produktmodelle in parametrisierten Verfahren Fertigungsunterlagen automatisch erstellen können. Prozessorientiert sind auch neuere Benutzeroberflächen zur Kopplung von Simulationsanwendungen. Hiermit können Anwendungen über mehrere Softwareapplikationen hinweg geschaffen werden (ModelCenter, modeFrontier). Das Wissensmanagement hingegen ist so gut wie gar nicht in die Abläufe integriert, lässt man die Fülle der FreigabeprozEDUREN einmal außen vor. Während die Produktion durch Mechanisierung und Automatisierung zu einem großen Teil fließend organisiert ist, und aufgrund der damit gegebenen Transparenz neue Technologien jederzeit integrieren kann, hat die Produktentwicklung das volle Potenzial virtuel-

ler Workflows bei weitem noch nicht erkannt und ausgenutzt. Seit die ersten Personalcomputer in den frühen achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts gebaut wurden, ist die Methodik der Konstruktion durch die Einführung von Computer Aided Design stark beeinflusst worden. Bald folgten Softwareprodukte zur Analyse und numerischen Simulation, die dazu beitrugen, Funktionalität und Geometrie von Komponenten und Systemen zu optimieren und zu überprüfen. Daneben wurde besonderes Augenmerk auf die Verwaltung von Dokumenten und Produktdaten gelegt, so dass heute die Konstruktionsabteilungen einen direkten Zugriff auf fast alle Daten und Dokumente ihres Unternehmens besitzen. In den nächsten Jahren erwarten wir, dass eine der größten Lücken in der Kette der technischen Informationen geschlossen werden soll: das Fehlen von elektronisch verfügbaren Daten und Informationen aus externen Quellen von Herstellern, Normungsgremien und Universitäten. Heutzutage ist dieses Wissen überwiegend noch auf Printmedien beschränkt. Die Umwandlung in digitale Formate wird diese Medienlücke schließen und einen kräftigen Vorschub für das Wissensmanagement bewirken. Da alle Ressourcen und Werkzeuge in der IT-Produktentwicklung früher oder später in automatisierte Prozesse eingebunden werden müssen, werden die Hersteller dieser Hilfsmittel ihre Integration in automatisierte Abläufe nicht aufhalten können. Dies gilt auch für eine neue Business-Prozess-Methodik in der Konstruktion, mit der neben dem Grundlagen-, dem Normen- und dem Produktwissen nun auch die Vorgehensweisen in der Konstruktion transparent und überprüfbar gestaltet werden können. Unter diesen Bedingungen der modernen Informationstechnologien wird sich die projektorientierte Konstruktion allmählich zu einer prozessorientierten Konstruktion wandeln.

2 Business Process Management als Vorbild

Produktentwicklung als die intellektuelle Bearbeitung eines virtuellen Modells durch ein Team unterschiedlicher Fachleute gleicht in seiner prinzipiellen Vorgehensweise jahrtausendealter Handwerkskunst, die einen Rohling mit den unterschiedlichsten Werkzeugen ganz allmählich in ein wohlgeformtes und funktionelles Erzeugnis verwandelt. Der Unterschied besteht allein darin, dass die benutz-

ten Werkzeuge von unterschiedlicher Natur und Funktionalität sind. Maßband, Feile, Hammer und Meißel einerseits und CAD, Taschenrechner und rechnergestützte Informationsspeicher auf der anderen Seite. Als Ergebnis sehen wir in beiden Fällen Unikate. In dem einen Fall ein virtuelles Computermodell und zahlreiche Zeichnungen und Dokumente, in dem anderen Fall einen Gegenstand aus Holz, Metall oder Stein und daneben einige Skizzen und Beschreibungen. In jedem Fall entsteht die geometrische Repräsentation einer technischen Vision plus einer Anzahl von Dokumenten.

Diese offensichtliche Analogie zwischen der mechanischen Konstruktion und bewährtem Handwerk mag verdeutlichen, dass die Herangehensweise an technische Aufgaben grundsätzlich immer dieselbe geblieben ist. Zwar hat sich der Erfahrungshorizont erweitert, die Hilfsmittel und Berechnungsalgorithmen wurden immer weiter verbessert und man hat bestimmte Routineabläufe auf Rechner übertragen. Das eigentliche Moment konstruktiver Tätigkeit aber blieb handwerklich und intuitiv, andererseits aber auch weder transparent noch nachvollziehbar. Damit waren und sind diese Vorgänge natürlich auch nicht reproduzierbar. Jedes Konstruktionsergebnis kommt vielmehr auf einzigartige Weise zustande und alle Versuche, die Prozesse effizienter zu gestalten, gehen bei dieser intuitiv-individuellen Vorgehensweise ins Leere.

Man hat neben der Einführung der Informationstechnik auch weitere Anstrengungen unternommen, die Produktivität in der Konstruktion zu erhöhen, diese betrafen jedoch in erster Linie die Kreativität und Systematik der Ingenieurstätigkeit. Bis heute sind deshalb hunderte von Katalogen mit Strategien und Lösungen für Konstruktionsaufgaben entstanden, die sich in ihrer Gesamtheit zu einer Zierde vieler Institutsbibliotheken entwickelt haben. Die kreativitätsfördernde Wirkung dieser konstruktionssystematischen Ansätze auf die täglichen Arbeitsergebnisse blieb dagegen ebenso überschaubar wie ihr Einfluss auf die Konstruktionsproduktivität und wird wohl erst dann einsetzen, wenn man sich ihre Erkenntnisse in Werkzeugen nutzbar macht, mit denen die Formen und Funktionen von Komponenten und ihren Beziehungen zueinander auch unabhängig von konkreter Geometrie definiert werden können.

Wer sich die Aufgabe stellt, Arbeitsabläufe in der Produktentwicklung zu beschleunigen, muss zuvor eine Kommunikations- und Tätigkeitsanalyse vornehmen. Nur sie kann uns Hinweise auf mögliche Rationalisierungspotentiale geben. Und in der Tat zeigen die Untersuchungen, dass trotz umfassenden Rechneinsatzes immer noch ca. fünfzig Prozent der Aktivitäten eines Konstrukteurs mit Kommunikations- und Handlingsaufgaben verbracht werden. Sie könnten ebenso von digital arbeitenden Assistenten erfüllt werden. Und diese Erkenntnis führt uns direkt zu einer Methode, dem Business Process Management (BPM), die bereits in vielen Unternehmensbereichen angewendet wird, um Kommunikationsaufgaben, Wiederholktivitäten, Datentransfers zwischen Programmen und die Formularbearbeitung im Rahmen automatisierter Prozesse auf ein Minimum zu reduzieren.

Mithilfe der Business Process Modelling Notation (BPMN) werden Geschäftsprozesse unterteilt in Ereignisse, Aktivitäten, Entscheidungspunkte, Verbindungsobjekte, Datenobjekte (Artefakte) und Projektteilnehmer (Swimlanes). Sie können sequentiell oder parallel ablaufen und menschliche Aktivitäten ebenso wie IT-Prozesse beinhalten. Eine der wichtigsten Funktionen von BPM ist neben der Analyse und Strukturierung von Prozessen ihre Umsetzung in rechnerunterstützte Abläufe und die Erstellung von Benutzersystemen. Ziel ist die nahtlose Kombination von manuellen und intellektuellen Tätigkeiten mit IT-Anwendungen und Kommunikationsaufgaben sowohl am Arbeitsplatz wie zwischen Abteilungen, Teams und Einzelpersonen in verteilten Entwicklungsprojekten.

Business Process Management ist ein relativ neuer Ansatz im Geschäfts- und Prozess-Reengineering, das erst mit der Einführung der objektorientierten Modellierung in der Software-Programmierung Fahrt aufnahm. Die einmal interaktiv modellierte Workflow-Logik kann in lauffähige Programme umgewandelt werden. Diese wiederum verlinken die Benutzeroberflächen mit den Mail-Systemen, Datenbanken, Anwendungen, Informationsquellen, Event-Handlern und der Projektleitung. Die Verlinkung erfolgt über eine flexible Kommunikationsinfrastruktur. Traditionelle Verfahren, Arbeitsmethoden und Gewohnheiten können mit dieser Technologie in einer sehr flexiblen Umgebung verbunden werden.

3 Design Process Management in der praktischen Anwendung

In der technischen Produktentwicklung wird heute eine Vielzahl konstruktionsunterstützender Werkzeuge eingesetzt, denn für die Auslegung und Gestaltung von Maschinen gibt es für fast alle Problemstellungen spezialisierte Berechnungs- oder Simulationsprogramme. Die Struktur sowie die Geometrie eines neuen Produktes werden bei mechanischen und mechatronischen Produkten schließlich in einem dreidimensionalen CAD-Modell abgebildet. Davon abgeleitet werden Listen für die Planung und Fertigungsdokumente für die Herstellung und Montage. Als Wissensbasis und Integrationsdrehscheibe für Daten dienen Systeme für das Produktdaten-Management.

Zwischen erster Inaugenscheinnahme der Aufgabenstellung und Fertigstellung eines Entwicklungsergebnisses können viele Monate liegen, Dutzende von Konstrukteuren mitgearbeitet haben, tausende von Entscheidungen getroffen und ebenso viele Berechnungen durchgeführt worden sein. Zwar liegen am Ende die Ergebnisse vor, wie sie zustande gekommen sind, bleibt den nachfolgenden Abteilungen dagegen meistens verborgen. Gründe liegen einerseits im Regelwerk, dessen Unverbindlichkeit regelmäßig zu nicht dokumentierter Kreativität führt, andererseits aber auch in detailreichen Untersuchungen, deren Nachvollziehbarkeit schon allein durch die Fülle der Einzelaktivitäten unmöglich ist.

Hierzu zählen insbesondere auch die Maschinenelementeberechnungen (MEB). Sie repräsentieren nicht nur einen wichtigen Teilprozess in der Konstruktion, sondern können selbst wiederum aus vielen Teilprozessen und Schritten zusammengesetzt sein. So besteht die Berechnung eines Antriebsstranges fast immer aus mehreren Berechnungsmodulen (Getrieberechnung, Wellenberechnung, Kupplungsberechnung usw.), welche häufig unabhängig voneinander angewendet werden, einander aber unter Umständen beeinflussen. In einem Getriebe z. B. werden die an einem Zahnrad angreifenden Kräfte an ein zweites Zahnrad und von diesem über eine Welle-Nabe-Verbindung an eine Welle übertragen, anschließend auf ein oder mehrere Wälzlager und schließlich auf das umgebende Gehäuse. In dieser Kette von Berechnungen stellt sich immer wieder das Problem der Konsistenz der Teilberechnungen, wenn man

an einer Stelle im Prozess Anpassungen vornimmt. Sofort müssen die Auswirkungen in allen anderen Teilberechnungen überprüft werden. Der dabei auftretende Iterationsbedarf kann beträchtlich sein und man programmiert deshalb regelmäßig problembezogene Verfahrensketten, die den Optimierungsprozess automatisieren helfen.

Diese Vorgehensweise stößt immer dann an Grenzen, wenn neben großen Serien immer mehr Form- und Funktionsvarianten entwickelt werden müssen. Starre Programme, die zudem mit alten Technologien entwickelt wurden, erweisen sich dann als unflexibel und können oft auch nicht mehr umprogrammiert werden. Dies gilt im Übrigen nicht nur für Getriebe, sondern für alle Baugruppen, in denen mehrere Komponenten in ihrem Zusammenwirken analysiert werden müssen. Wie die Erstellung von Berechnungs-Baugruppen mit Hilfe des Design Process Management flexibilisiert und auch dem Konstrukteur ohne Programmiererfahrung ermöglicht werden kann, soll am Beispiel der Auslegung eines Antriebsstrangs demonstriert werden. Gleichzeitig bringt die Methode die folgenden Vorzüge mit sich:

- Nachvollziehbarkeit aller Einzelaktivitäten,
- Vollständige Dokumentation der Abläufe und Ergebnisse,
- Definierte Daten- und Kommunikationsflüsse,
- Zwang zur tätigkeitsbezogenen Aufbereitung von Informationen und Wissen

4 Beispiele der praktischen Anwendung

Bei der Auslegung eines Antriebsstranges besteht die Aufgabe darin, einen optimalen Motor im Hinblick auf die Energieeffizienz, den Bauraum und den Wirkungsgrad für einen vorhandenen Antriebsstrang zu finden (siehe Abbildung 1).

Wie oben beschrieben, müssen die Berechnungsroutinen zunächst in kleinere, handhabbare Bausteine zerlegt werden. Dafür braucht man allerdings eine Datenarchitektur, welche ein Zusammenspiel mehrerer Akteure (Berechnungsmodule) zulässt. Weiterhin müssen Gruppierungen mehrerer Bausteine möglich sein. Gruppierungen

sollen dazu dienen, Maschinenelemente mit Hilfe einzelner Grundbausteine abbilden zu können. Dies kann die Modellierung eines komplexen Systems deutlich vereinfachen und beschleunigen, da der Konstrukteur nicht jedes Mal die häufig verwendenden Maschinenelementeberechnungen von Anfang an selber zusammenstellen muss. Diese werden einmal in einer Berechnungs-Bibliothek abgelegt und stehen dann jederzeit zur Verfügung.

Die Grundstruktur einer Berechnungsroutine kann von der Definition eines Prozesses abgeleitet werden (siehe Abbildung 2). Genauso wie ein Prozess besitzt eine Maschinenelemente-Berechnung bestimmte Eingabe- und Ausgabeparameter sowie Ressourcen und Informationen (siehe Abbildung 3).

Nun kann man den komplexen Berechnungsablauf einer Aufgabe »Motor für den Antriebsstrang auslegen« folgendermaßen aus Teilaufgaben und Aktivitäten zusammensetzen. Die Teilaufgaben wurden in die mechanischen und elektrischen unterteilt. So ergibt sich für die mechanische Seite des Antriebsstranges folgendes Gebilde: In Abbildung 5 wird gezeigt, wie die Trägheiten von den Strangkomponenten zu einem Gesamtträgheitsmoment, welches an Motorwelle anliegt, zusammengefasst werden. Die Berechnung

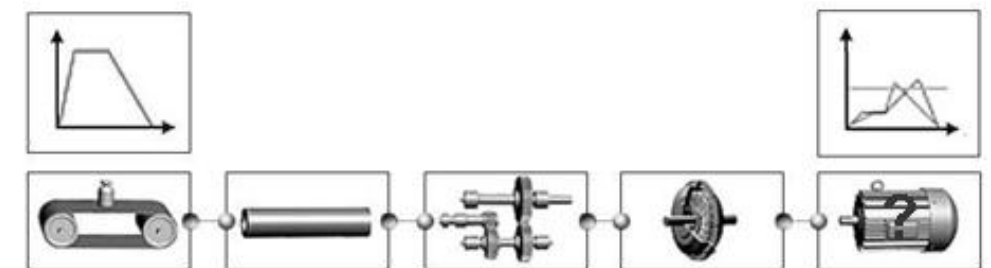


Abbildung 1: Flexibler Konstruktionsprozess eines Antriebsstranges mit MDESIGN drive.

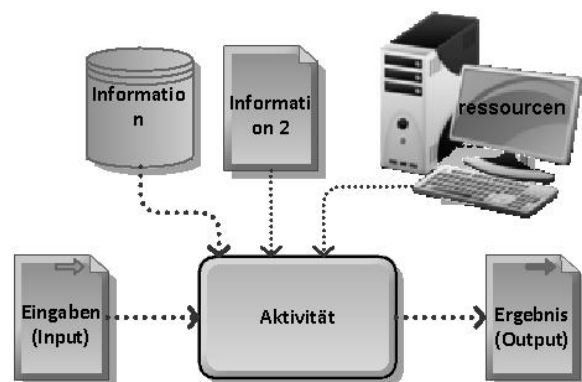


Abbildung 2: Definition eines Prozesses.

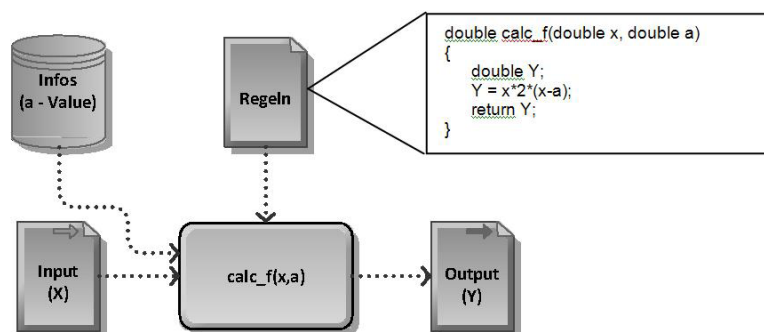


Abbildung 3: Definition einer Berechnung.

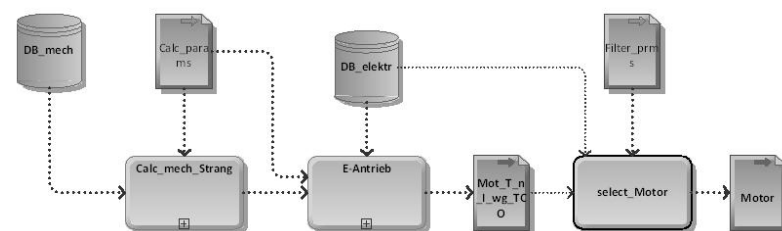


Abbildung 4: Aufgabe „Motor für den Antriebsstrang auslegen“

der elektrischen Seite des Antriebes ist in diesem Fall ein wenig komplexer. Hier sind neben den sequentiellen Datenflüssen noch die Rückkopplungen zu finden (siehe Abbildung 6).

Ein Konstruktionsprozess, der sich mit der Auslegung eines Maschinenelementes befasst, weist in der Regel viele Rückkopplungen auf, welche in Form von Schleifen bzw. Zyklen abgebildet werden. Dies passiert deshalb, weil bei einer Auslegung die Randbedingungen meistens vorhanden und die Ziele bekannt sind, die Eingabeparameter aber erst noch bestimmt werden müssen. Viele dieser Konstruktionsaufgaben werden deshalb iterativ gelöst. Dabei stellt sich sofort die Frage nach der Reihenfolge der Abarbeitung? Abbildung 6 zeigt nur die Datenflüsse. Um die richtige Reihenfolge zu bestimmen, müssen aber die Abhängigkeiten der Prozesse untereinander bekannt sein. Diese Abhängigkeiten werden bei Strukturen ohne Rückwirkungen automatisch mit Hilfe von Design Struktur Matrizen ermittelt (siehe Abbildung 7).

Die Design Struktur Matrix (DSM) ist eine Methode zur Erfassung, Modellierung, Analyse und Synthese (in gewissen Grenzen) der Vernetzung von Elementen in hochvernetzten Systemen. Typische Beispiele für solche Systeme sind komplexe, hochintegrierte Produktarchitekturen, Aufbauorganisationen oder Prozesse. Die Design Struktur Matrix erlaubt es, bei solchen Systemen Elemente derselben Art miteinander in Bezug zu setzen, wenn sie über eine vergleichbare Beziehungsart untereinander verbunden sind.

Als Modellierungsgrundlage wird eine quadratische Matrix verwendet, die auf der Hoch- und Querachse die einzelnen Elemente des Systems abbildet, und von der jede einzelne Zelle dazu genutzt werden kann, die Beziehung zwischen jeweils zwei Elementen abzubilden. Dabei kann eine solche DSM als »Zeile hat Einfluss auf Spalte« modelliert werden oder als »Spalte beeinflusst Zeile«. während sich die erste Modellierungsart eher im europäischen Sprachraum etabliert hat, findet letztere besonders in Nordamerika und Asien Anwendung. Dabei hat keine der beiden Methoden einen funktionellen Vorteil gegenüber der anderen.

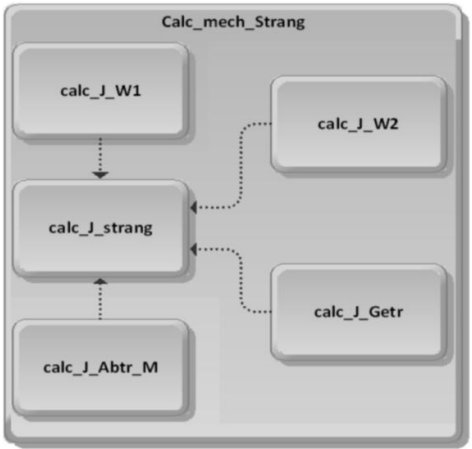


Abbildung 5: Mechanische Seite des Antriebsstranges

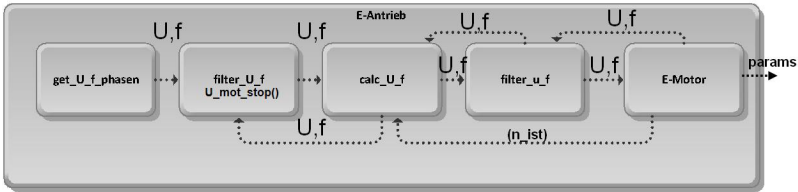


Abbildung 6: Elektrische Seite des Antriebsstranges

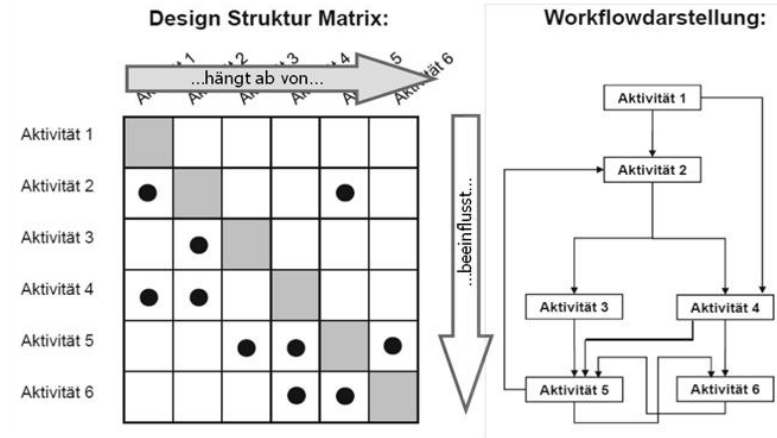


Abbildung 7: Design Struktur Matrix (Gärtner 2008)

Da, die Modellierungsgrundlage nur eine Verwendung von Elementen gleicher Art (Aufgaben oder Teilaufgaben, keine Mischung) vorsieht, wird für jede Aufgabe eine eigene Matrix erstellt, wobei die Teilaufgaben die Rolle der Elemente übernehmen (siehe Abbildung 8).

Die Ursprungsmatrix soll zunächst in eine Dreiecksmatrix überführt werden. Falls dies möglich ist, ergibt sich sofort die Reihenfolge für den Berechnungsablauf. Aus Abbildung 8 (rechts) folgt: Reihenfolge: calc_J_W1, calc_J_W2, calc_J_Getr, calc_J_Abtr_M, calc_J_Strang. Analog werden die Design Struktur Matrizen für alle anderen Teilaufgaben sowie für die Hauptaufgabe erstellt und optimiert, wobei die Elemente jetzt die Teilaufgaben bzw. die Aktivitäten sind.

Für den Fall, dass sich eine Matrix nicht in eine Dreiecksmatrix überführen lässt, weil sie eine Wechselwirkung von Elementen beinhaltet (z. B.: Zyklus), werden Werkzeuge aus der Graphentheorie, wie zum Beispiel die »Breiten-, Tiefen-, oder Zyklussuche« oder die »Suche nach zusammenhängenden Komponenten« verwendet, um die berechenbaren Komponenten und die entsprechende Reihenfolge herauszufiltern, für welche dann die Design Struktur Matrizen erstellt und optimiert werden. Zur Veranschaulichung ist auf den nachfolgenden Bildern (siehe Abbildung 10, 11) ein Auszug aus dem vereinfachten Getriebestufen-Modell (siehe Abbildung 9) mit den zusammenhängenden Komponenten am Beispiel der Aufgabe »Getriebe auslegen« schematisch dargestellt. Die Änderung des Zahnrades (zum Beispiel des Schrägungswinkels) ruft die Änderung der Lagerkräfte hervor, damit der Lagergröße und evtl. des Typs, welches wiederum einen Einfluss auf die Geometrie der Welle hat. Aus Abbildung 11 wird ersichtlich, dass die Datenflüsse der Aufgaben Lager, Zahnrad und Welle eine zyklische Abhängigkeit besitzen. Sie werden deshalb zu einer Komponente gruppiert. Sobald sich alle zyklischen Abhängigkeiten nur innerhalb einer übergeordneten Aufgabe befinden, werden die Komponenten nacheinander abgearbeitet. Für die Auflösung einer zyklischen Abfolge von Aktivitäten bzw. Teilaufgaben kann zum Beispiel mit Hilfe von bedingten Datenflüssen realisiert werden. Die bedingten Datenflüsse werden nur unter bestimmten Voraussetzungen ausgeführt.

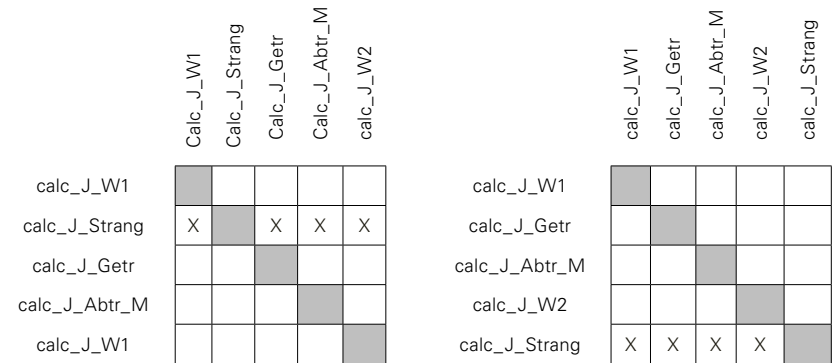


Abbildung 8: Ausgangsmatrix(links) und modifizierte Matrix(rechts).

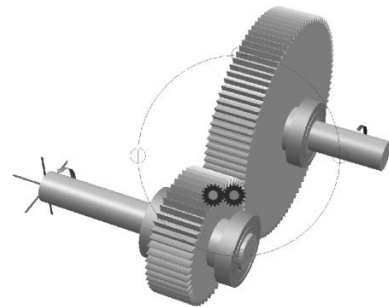


Abbildung 9: Stirnradgetriebestufe (erstellt mit MDESIGN gearbox).

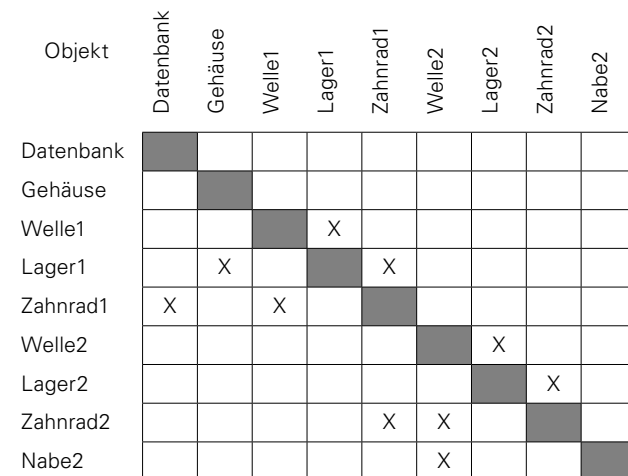


Abbildung 10: Beispiel einer Abfolge mit Zyklen.

Im vorher beschriebenen Fall der Antriebsstrangauslegung werden die Rückflüsse bei der Berechnung der elektrischen Seite des Stranges mit Hilfe von bedingten Datenflüssen realisiert (siehe Abbildung 12), d.h. dass zum Beispiel die Datenübergabe vom E-Motor zum Umrichter (filter_U_f) nur bei negativer Spannung erfolgen kann. Nachdem alle Aufgaben inkl. Teilaufgaben abgearbeitet sind, werden die Ergebnisse und Eingabeparameter aus denen auf der Eingabe- bzw. Ausgabeseite zusammengefasst (siehe Abbildung 13).

Somit erhält ein Konstrukteur ein interaktives Modellierungswerkzeug für die Gestaltung von elektromechanischen Antrieben, was ihn in die Lage versetzt, auch sehr komplexe Aufgaben zeitsparend, qualitativ und kreativ lösen zu können.

5 Fazit und Ausblick

Bislang ist die Verbreitung von Business-Process-Management in der Produktentwicklung sowie in den Konstruktionsabteilungen gering. Hier dominieren, abgesehen von prozessorientierten Funktionen im Product Lifecycle Management eher Anwendungen des Projektmanagements. Allerdings hat die Automobilindustrie damit begonnen, BPM-Methoden von der Verwaltung in die technischen Abteilungen zu portieren. Zusätzliche Dynamik wird die prozessorientierte Dynamik aber auch in der mittelständischen Industrie erhalten. Denn die auch hier zunehmende Verbreitung strukturierter Produkt-Modelle als Mittelpunkt der Konstruktion und der Teamarbeit lässt mit ihren definierten Entwicklungszielen eine konsequente und stringente Planung auch der dazwischen liegenden Teilschritte zu. Das erlaubt die Standardisierung und Modularisierung einer Vielzahl von Teilprozessen. Jede von ihnen kann schließlich zum Gegenstand eines automatisierten Workflows werden. Die Einführung dieser neuen Technologie in Konstruktion und Produktentwicklung hat das Potential, die folgenden Verbesserungen zu bewirken:

- Nachvollziehbarkeit individueller Tätigkeiten sowie der Zusammenarbeit
- Vollständige Dokumentation der Abläufe und Ergebnisse

- Definierte Daten-, Dokumenten- und Kommunikationsflüsse
- Aufgabenbezogene Bereitstellung von Informationen und Wissen
- Basis für kontinuierliche Verbesserungsstrategien
- Schnellere Integration von internen und externen Teammitgliedern
- Schnellere Aufnahme neuer Aktivitäten, Verfahren und Ressourcen
- Grundlage für ein besseres Zeitmanagement
- Qualitatives und quantitatives Monitoring für Projekt- und Qualitätsmanagement

Durch ein an BPM-Methoden angelehntes Design Process Management können viele der heute noch individuell geprägte Verfahren, Tätigkeiten und Prozesse rechnerunterstützt im Sinne verbindlicher Konstruktionsrichtlinien ablaufen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Tätigkeiten in der Konstruktion nach genauer Analyse in allgemeingültige Arbeitsschritte zerlegt werden und analog zur Fertigung und Montage zu einem Katalog von Arbeits- und Kommunikationsaktivitäten führen, der die von Menschen und IT-Systemen in der Produktentwicklung ausgeführten Aktivitäten festhält und in klar definierten Workflows festhält.

Der vorliegende Beitrag stellt Untersuchungen darüber vor, welche Randbedingungen man bei der Anwendung dieser Methode auf vernetzte Berechnungen zu beachten hat. Es wurde dargestellt, durch welche Komponenten die derzeit eher monolithisch verfassten Berechnungsprogramme zukünftig repräsentiert werden müssen, um in automatisierten Workflows miteinander zu interagieren. Anhand der Beispiele »Antriebsstrang« und »Getriebe« wurden überdies Ansätze erläutert, wie man beim Zusammenwirken einer großen Anzahl von Programmen die Komplexität der Strukturen und die Vielzahl der Variablen im Hinblick auf eine Konvergenz der Ergebnisse begrenzen kann.

Abbildung 11: Beispiel der vereinfachten Abfolge.

| Komp.Nr.: | 4 | 5 | 3 | 2 | 1 |
|-----------------|---|---|---|---|---|
| beeinflusst ... | | | | | |
| Komponente 4 | | | | | |
| Komponente 5 | | | | | |
| Komponente 3 | X | X | | | |
| Komponente 2 | | | X | | |
| Komponente 1 | | | | X | |

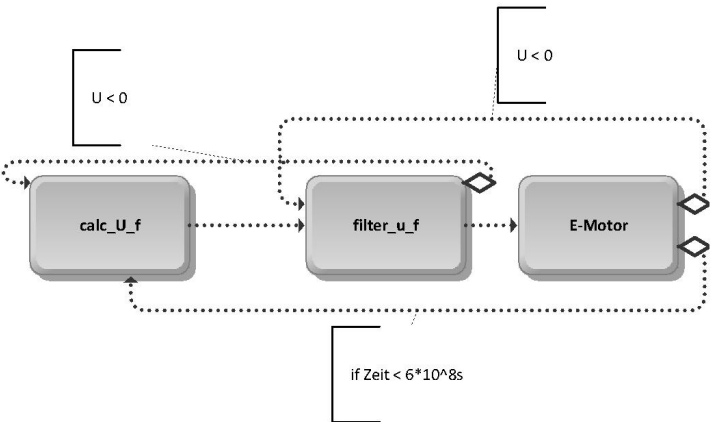


Abbildung 12: Zusammenfassung von Systemparametern

Das Ziel der Arbeiten ist allerdings nicht nur der Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit, sondern die Bewährung der informationstheoretischen und mathematischen Methoden in der Praxis detaillierter Berechnungs- und Entscheidungsprozesse. Denn damit wäre ein konsequent umgesetztes Design Process Management im Maschinenbau nicht nur in der Lage, eine Komplexität beherrschbar zu machen, die gewachsene Interdisziplinarität und Globalisierung mit sich bringen, sondern mit der workfloworientierten Vernetzung von Berechnungsaufgaben einer Herausforderung zu begegnen, die den Konstrukteur unter dem wachsenden Druck der Variantenvielfalt vor immer größere Probleme stellt.

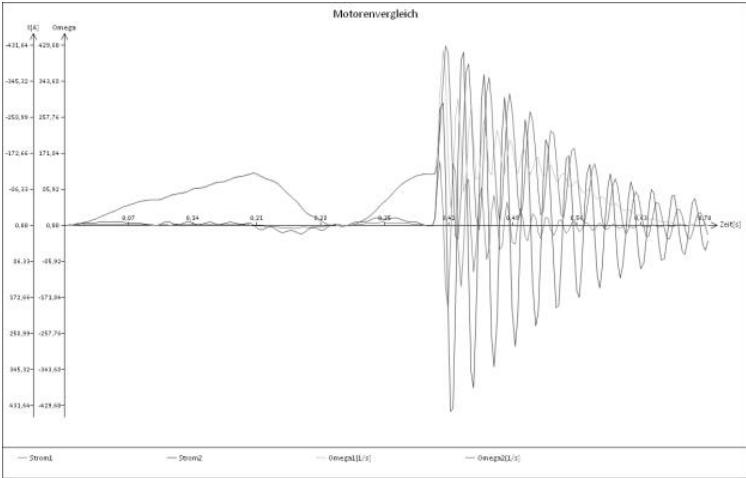
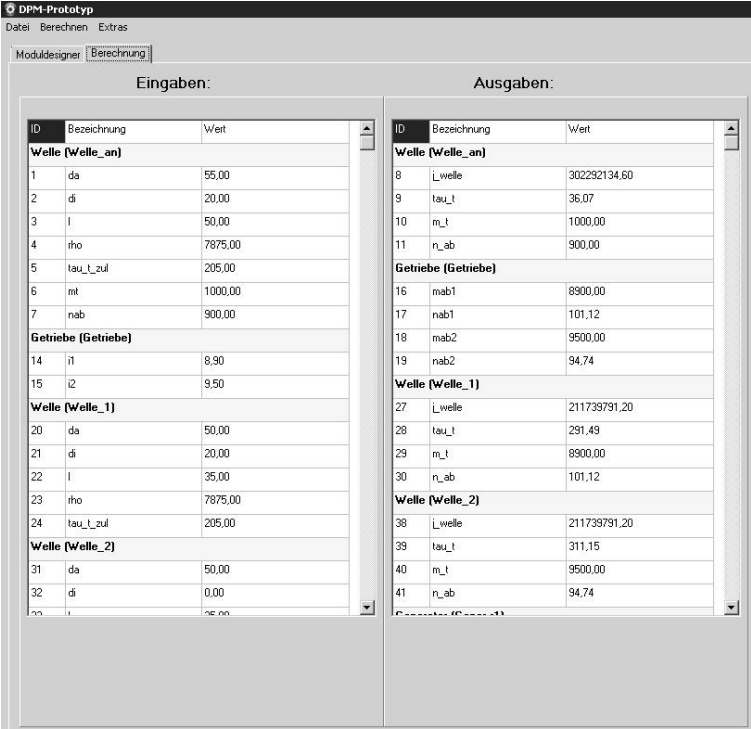


Abbildung 13: Beispiel der Darstellung von Eingabeparameter und Ergebnissen

6 Literaturverzeichnis

McDonough, W. & Partners, 1999, The Hannover Principles Design for Sustainability, www.mcdonough.com/principles.pdf

Schmidt, W.-P.: 2007, Ford of Europe's Product Sustainability Index. Proceedings of OECD Workshop on Sustainable Manufacturing Production and Competitiveness

Gründer, W.: 2010, Holistic Approach in Automotive and Mechanical Design requires Structured but Flexible Workflows, Proceedings of CONAT 2010, Brasov

Richtlinie VDI 4500, 2006, Berlin – Wien – Zürich: Beuth-Verlag.

Modelled with ARISexpress, 2010, Business Process Modeller, product of Software AG

Pahl, G. et al.: 2007, Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Springer, Berlin

Maurer, M.: 2010, Komplexitätsmanagement für die industrielle Praxis, Technische Universität München

Gärtner, T.: 2008, Simulation der Dauer von Produktentwicklungsprozessen auf Basis von Design Struktur Matrizen, RWTH Aachen

Dyla, A.: 2002, Modell einer durchgängig rechenbasierter Produktentwicklung, Technische Universität München

Freund, J., Rücker, B., Henninger, T.: 2010, Praxishandbuch BPMN, München: Hanser

Frei, N.: 2002, Der Konstruktionsprozess: Wirkmodelle basierend auf Constraints, Eidgenössischen technischen Hochschule Zürich

MDESIGN drive, 2010, Software for dimensioning and recalculation of drive trains, www.tedata.com

MDESIGN gearbox, 2012, Modular gearbox design integrates machine element calculation, www.driveconcepts.com

Kontakt

Dipl.-Ing. Denis Polyakov
TEDATA GmbH, NL Dresden
Wettiner Platz 10
01067 Dresden
www.tedata.com

Prof. h. c. Dr.-Ing. Willi Gründer
TEDATA GmbH
Königsallee 45
44789 Bochum
www.tedata.com

Christine Schöne & Ralph Stelzer

Reverse Engineering in der Produktentwicklung – Aktuelle Herausforderungen

1 Einleitung

Im Modell und Formenbau des Maschinenbaus beschreibt Reverse Engineering den Prozess der 3D-Erfassung eines Objektes, die Aufbereitung der Digitalisierungsdaten zu CAD-Modellen und die weitere Nutzung dieser Daten in einer CAD/CAM-Umgebung. Ziel dieser Arbeiten ist es dann weiterführend, physische Objekte durch CNC-Fräsen oder mittels Generativer Fertigungsverfahren herzustellen. Die Maßkontrolle der gefertigten Produkte gegenüber dem CAD ist ebenfalls eine Aufgabestellung des Reverse Engineering (Schöne 2009, Wang 2011).

20 Jahre nach den ersten Lösungen zum Reverse Engineering gibt es anstelle von Stagnation geradezu einen Boom von neuen Entwicklungen, die damit verbunden auch neue Herausforderungen darstellen. Diese Entwicklungen werden durch mehrere Faktoren hervorgerufen, die nachfolgend erläutert werden.

2 Aktuelle Einflussfaktoren und abgeleitete Herausforderungen

Die aktuellen Herausforderungen im Reverse Engineering ergeben sich aus der Weiterentwicklung der Gerätetechnik, aus den gestiegenen Anforderungen an die Bauteilqualität und aus neuen Gesichtspunkten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit.

Einflussfaktor Gerätetechnik:

1. Die optische 3D-Scanntechnik wird immer genauer und erreicht heute Messunsicherheiten von $\pm 0,005$ mm. Auflösungen von 10 μ m werden heute von handelsüblichen Scannern realisiert. Die Zeiten für die Erfassung werden laufend reduziert und betragen nur noch Bruchteile traditioneller Messtechnik. Aus diesem Grunde werden optische Scanner zunehmend für Messaufgaben eingesetzt, die bisher von klassischen Koordinatenmessmaschinen realisiert wurden. Dies hat Auswirkungen hinsichtlich der Erfassungsstrategie, die bei Serienteilen mit komplizierter Geometrie Optimierungspotenzial besitzt. (Holzhausen et al. 2010).
2. Leistungsfähige Industrie-CT liefern hohe Auflösungen mit deren Hilfe auch innere Bauteilgeometrien detektiert und rekonstruiert werden können. Neben der Geometrierfassung von Hohlräumen dienen diese Anlagen zur Kontrolle von Löt- und Schweißverbindungen sowie zur Detektion von Lunkern (Rauh 2006). Die Herausforderungen bestehen nun in einer effizienten Datenverarbeitung und nutzergerechten Bereitstellung von Ergebnissen.

Einflussfaktor Werkstückcharakteristik:

3. Durch die Entwicklung neuer Materialien und deren Verwendung im Produktionsprozess werden Verformungs- oder Schwindverhalten sichtbar, das noch nicht oder nur ungenügend erforscht ist (CFK, flexible Kunststoffe, Blechmaterialien). Daher müssen diese Zusammenhänge anhand von aufwendigen 3D-Erfassungsstrategien nach der Bauteil- oder Werkzeugherstellung ergründet werden (Schöne et al. 2010a).

4. Die Anforderungen an die Bauteilqualität hinsichtlich Passfähigkeit zu Partnerbauteilen und zum CAD steigen. Daher sind effiziente Mess- und AuswerteprozEDUREN erforderlich um Werkzeuge und Bauteile während der Entwicklungs-, Erprobungs- und Produktionsphase zu überprüfen (Schöne et al. 2010b).

Einflussfaktor Wirtschaftlichkeit:

5. Durch die Globalisierung der Märkte gewinnt der Handel mit Ersatzteilen und damit verbunden deren Herstellung mittels effektiver Prozessketten an Bedeutung. Im Spannungsfeld zwischen Produktentwicklung und dem Nachbau von Ersatzteilen ohne verfügbare konstruktive und technologische Unterlagen, werden mehrere baugleiche Teile von Ersatzteilen ausgewählt und einem Reverse Engineering unterzogen (Wang 2011).
6. Sowohl im handwerklichen Sektor als auch in anderen Branchen sucht man nach kosteneffizienten Methoden zur Herstellung von Produkten oder deren Werkzeugen, für die keine technologischen Unterlagen vorhanden sind und die folglich bisher nicht rechnergestützt gefertigt werden konnten (Schöne et al. 2008) (Schetelich & Schöne 2008). Neben der Ergründung der Geometrie müssen nachfolgend die technologischen Unterlagen erarbeitet werden.

Diese Einflussfaktoren und abgeleiteten Herausforderungen befruchten sich gegenseitig in der täglichen Praxis. Anhand von drei aktuellen Anwendungsszenarien, die am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD erfolgreich bearbeitet werden, können diese Zusammenhänge näher dargestellt werden.

3 Reverse Engineering in der Ersatzteilefertigung des Mittelstandes – für die HARMONA Akkordeon GmbH

Mobile 3D-Scanntechniken ermöglichen 3D-Messungen direkt im Unternehmen. Dieses Vorgehen ist insbesondere dann notwendig, wenn es um die Erfassung von großen und schweren oder zeitlich

nur begrenzt verfügbaren Bauteilen geht. Das trifft zum Beispiel auf ältere Umformwerkzeuge zu, die nach einem längeren Einsatz in der Serienproduktion kurz vor dem Standzeitende stehen, nahezu verschlissen oder bereits zerbrochen sind. Hauptsächlich bei alten Werkzeugen in der Serienproduktion existieren von den Werkzeugen keinerlei Zeichnungen oder CAD-Modelle. Ein weiteres Szenario zeigt sich bei realen Werkzeugen die einer Einarbeitungsphase unterzogen wurden und damit den Zeichnungsdaten der Bauteile nicht mehr übereinstimmen. In diesem Kontext stehen auch die nachfolgend dargestellten Arbeiten.

Im Musikinstrumentenbau, speziell auch im Handzuginstrumentenbau wird teils historisch, teils aber auch wirtschaftlich bedingt seit vielen Jahrzehnten noch auf die gleiche Weise gefertigt – zum Großteil



Abbildung 1: Tiefziehwerkzeug für ein Aluminiumverdeck in der Firma Harmona Akkordeon GmbH

handwerklich oder mit oft sehr veralteter Technik. Die Firma Harmona Akkordeon GmbH fertigt Akkordeons verschiedenster Varianten und Größen. Dabei werden die Akkordeonverdecke aus ebenen Aluminiumplatten durch Tiefziehen hergestellt und anschließend variantenspezifisch beschnitten. Für jede spezielle Verdeckform gibt es einen eigenen aus Werkzeugstahl bestehenden Werkzeugsatz. Dieser setzt sich aus Stempel, Niederhalter und Matrize zusammen. Diese Werkzeuge und die für die Umformung verwendete Presse sind mehr als 40 Jahre alt und verschlissen (Abbildung 1) (AiF ZIM 2011).

Zeichnungen, CAD-Modelle und technologische Unterlagen für den Ersatz oder die Reparatur der Werkzeuge fehlen vollständig. Somit besteht keine Möglichkeit bei einem Defekt schnell einen Ersatz zu bekommen.

Diese Ausgangslage erfordert in jedem Fall die 3D-Erfassung (Abbildung 2) der Aktivteilgeometrie der Werkzeuge. Die umgeformten Blechteile aller Größen werden gegenwärtig noch nachfolgend beschnitten und einer weiterführenden handwerklichen Umformung unterzogen. Daher müssen auch die gefertigten Blechteile erfasst werden, um daraus dann wiederum die endgültigen Werkzeugkonstruktionen mit Hilfe von Simulationsverfahren ableiten zu können. Damit sollen die gegenwärtig noch anfallenden handwerklichen Nacharbeiten an den Blechteilen entfallen. Das Ziel ist es nun, für das vorhandene Doppeltiefziehverfahren neue Werkzeuge als Baukastenelemente aus alternativen Materialien wie bspw. Kunst- oder Verbundstoffe zu entwickeln und herzustellen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Werkzeuge (Hard- und Software) und die Methoden des Reverse Engineering in Verbindung mit Simulationsrechnungen die Grundlage für einen effektiven Werkzeugsatz darstellen.

Das Vorhaben wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen eines AiF ZIM Vorhabens (Laufzeit 01.08.2011–31.07.2013, Förderkennzeichen KF2138507CK1)



Abbildung 2: 3D-Scannen eines tiefgezogenen Verdeckbleches im Messrahmen mit 3D-Scanner ATOS II TripleScan (Reverse Engineering Labor, TU Dresden, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD)

4 Reverse Engineering für eine Änderungskonstruktion im Werkzeugbau

Aufgrund der rasanten Entwicklung optischer Sensoren mit immer genauer werdenden Messergebnissen, besteht heute die Möglichkeit 3D-Scanner, die nach dem Streifenprojektionsverfahren arbeiten, als 3D-Messmaschinen einzusetzen. Das enorme Potenzial optischer Messtechnik für die Änderungskonstruktion großer Werkzeuge ergibt sich aus der gestiegenen Genauigkeit, der hohen Erfassungsgeschwindigkeit und der Portabilität. Die Messtechnik kann quasi zum Werkstück gebracht werden.

Die Firma Ammer, Quick & Partner Werkzeugbau GmbH, welche sich mit der Entwicklung, Konstruktion und dem Bau von Folgeverbund- und Transferwerkzeugen für anspruchsvolle Blechformteile beschäftigt, war mit diesen Problemen konfrontiert. Für ein bereits vorhandenes, außerhalb gefertigtes Presswerkzeug sollten die Aktivteile

neu konstruiert werden. Neben dem physischen Bauteilen Stempel und Matrize waren die CAD-Daten vorhanden. Nach einer Anpassungskonstruktion und Fertigung einzelner Aktivteile stellte sich heraus, dass diese teilweise nicht mit den im Werkzeuggrundkörper vorhandenen Befestigungen und Aussparungen übereinstimmten. Die Ursache dafür konnte zum einen in einer fehlerhaften Fertigung der Aktivelemente oder zum anderen an dem vorhandenen Basiswerkzeug mit Stempel und Matrize liegen, die mit den Vorgaben aus der Konstruktion nicht übereinstimmen. Ersteres konnte durch eine bereits nach der Fertigung vollzogene Qualitätsprüfung relativ schnell ausgeschlossen werden. Somit war ein Abgleich der CAD-Daten mit der realen Bauteilgeometrie von Stempel und Matrize notwendig. Durch die großen Abmessungen der beiden Teile des Werkzeuggrundkörpers sowie auch durch deren hohes Gewicht konnten die Bauteile nicht mit einer in der Firma vorhandenen Koordinatenmessmaschine vermessen werden. Um nicht unnötige Zeit verstreichen zu lassen, musste schnell eine Lösung gefunden werden, denn mit dem Abgleich zwischen physischen und digitalen Modell, der Neukonstruktion und Fertigung der neuen Aktivelemente war gegenüber dem Kunden eine Zeitspanne von sechs Wochen veranschlagt worden. Zur erfolgreichen Abnahme ist außerdem ein Dauertest über eine bestimmte Losgröße problemlos nachzuweisen. Diese musste ebenfalls noch mit berücksichtigt werden (Sembdner & Hofmann 2012).

Nach entsprechender Vorbereitung am Werkstück, wie dem Entfernen von Schmutz und Ölen von Fertigung und Transport, dem Mattieren glänzender Stellen sowie dem Präparieren mit Hilfe von Registrierungsmarken (Abbildung 3) konnte mit der Datenerfassung begonnen werden.

Dazu wurde das Werkzeug photogrammetrisch vermessen (Abbildung 4). Dieser etwas aufwendigere und nicht immer notwendige Schritt dient mithilfe eines Einmessen und Registrierens zur besseren Orientierung des digitalen Modells und einer flexibleren Erfassung im Verlaufe des Scannens. Dadurch konnte anschließend das eigentliche Scannen der Werkstücke relativ unkompliziert durchgeführt werden (3D-Scanner ATOS Triple Scan, GOM Braunschweig). Da insbesondere die Gewinde- und Bohrpositionen mit Hilfe der

Messung überprüft werden mussten, diese wiederum durch optische Messungen nur begrenzt erfasst werden können, wurden in die Gewinde Schrauben mit rundem Kopf und in die Bohrungen Passstifte eingebracht.

Nach Abschluss dieses Schrittes und dem damit vollständigen Erfassen der Werkstücke erfolgt die Aufarbeitung der Daten mithilfe softwareseitiger Unterstützung. Dabei gibt es mehrere Wege-von der Rückführung einzelner für die Konstruktion wichtiger Elemente bis hin zum vollständigen CAD-Modell (Abbildung 5). Im vorliegenden Beispiel wird das als Punktwolke aufgenommene Modell mit den bereits vorliegenden CAD-Daten verglichen. Dazu erfolgte zunächst eine Ausrichtung der Messdaten am CAD-Modell. Durch eine geeignete Sichtbarkeitsoption (z. B. nur Kanten) werden Abweichungen zwischen beiden Modellen sichtbar. Anhand dieser ersten Analyse konnte nun festgestellt werden, dass eine vollständige Datenaufbereitung zum CAD-Modell nicht nötig war. Man verständigte sich auf ausgewählte Elemente. Dabei wurden nur die für eine Konstruktion der Aktivteile wichtigen Abweichungen noch einmal separat in Form von Achsen (Bohrungs-) und Ebenen (Bezugs-, Konstruktions-) anhand der Messdaten ermittelt und als neutrale Datenformate wie IGES oder STEP aus geleitet. Diese konnten somit als Basis für die Anpassungskonstruktion der Aktivelemente verwendet werden sowie auch zum Aufbau einer Neukonstruktion des gesamten Werkzeuges. Weiterhin können mit den Daten ebenfalls die weiteren Schritte der Fertigungsverfahren sowie der Qualitätskontrolle planbarer und weiter flexibel nutzbarer aufbereitet werden. Dieses Beispiel zeigt, dass mithilfe von Reverse Engineering sowie deren flexible Prozesskette als eine Art optische Messmaschine für extreme Anforderungen fungieren kann.

5 Bewertung von Lötverbindungen mittels Computertomografie

Um zu 3D-Informationen von Objekten mit innerer Geometrie zu gelangen, werden im technischen Umfeld zunehmend Computertomografie (CT) (Rauh 2007) eingesetzt. Diese Gerätetechnik entstammt der medizinischen Praxis und dient ursprünglich der Diagnostik innerer organischer Strukturen.

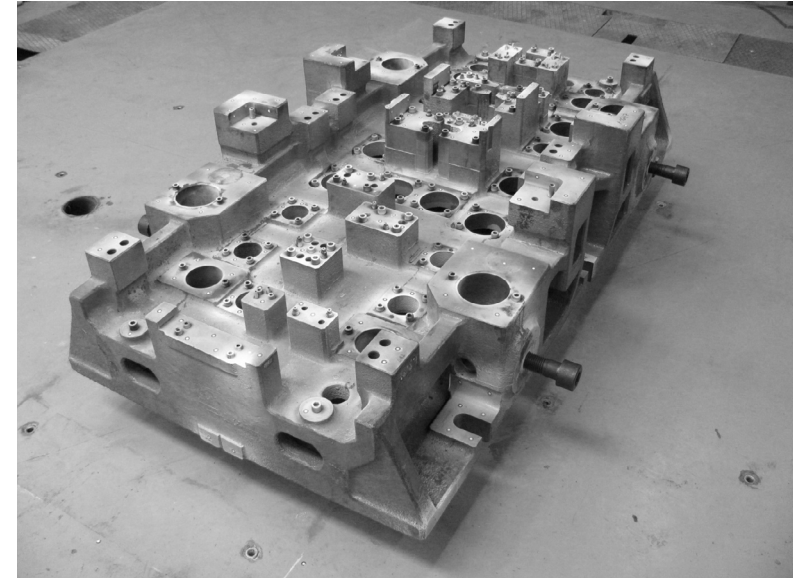


Abbildung 3: Zum 3D-Scannen vorbereitetes Oberteil eines zweiteiligen Presswerkzeuges (ca. 1 t)

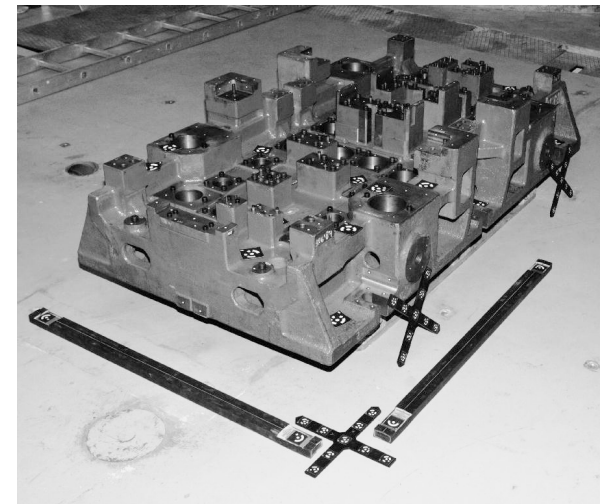


Abbildung 4: Bauteil mit kodierten Marken, Orientierungskreuzen und Maßstäben für die Photogrammetrische Aufnahme

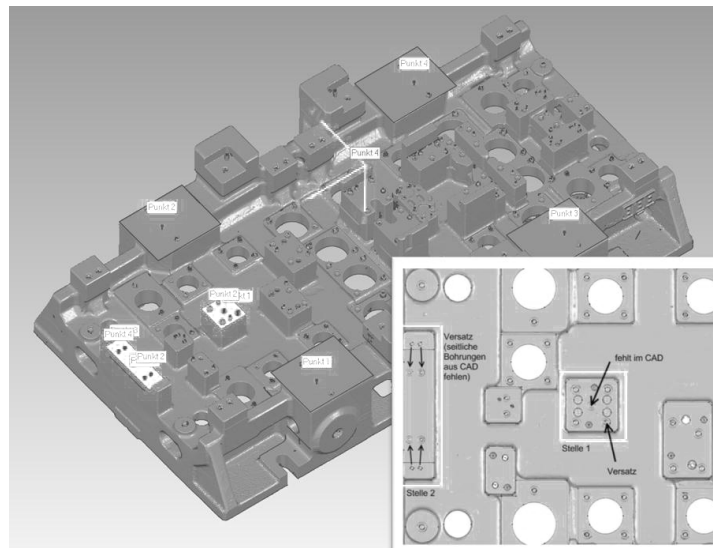


Abbildung 5: Vergleich zwischen Messdaten und CAD-Modell zeigt Abweichungen bei bestimmten Bohrpositionen

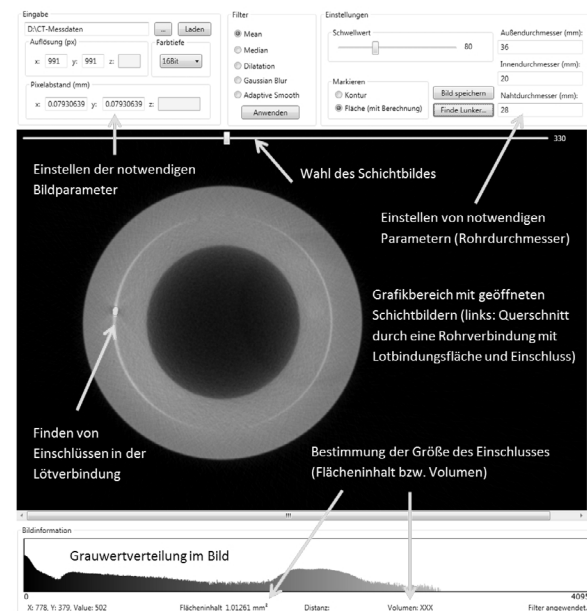


Abbildung 6: Schichtbild eines CT einer Lötverbindung mit Einschluss

Allen Verfahren eigen ist die schichtweise Erfassung und sequenzielle Bereitstellung von digitalen Bilddaten des Objektes. Diese Bilddaten, die Grauwerte im jeweiligen Querschnitt widerspiegeln, werden entlang einer zuvor definierten Achse aufgezeichnet.

Die industrielle Computertomographie (CT) hat sich in den letzten Jahren zunehmend in dem Umfeld der Produktentwicklung etabliert. Die CT-Anwendungen reichen von materialbezogenen Aufgaben wie Material- und Porositätsanalyse über einen Soll-Ist-Vergleich und Erstmusterprüfung bis hin zum Reverse Engineering. Im Ergebnis der CT-Untersuchungen werden Schichtbildstapel in einem standardisierten Austauschformat bereitgestellt (DICOM). Neben geometrischen Informationen beinhaltet das Format i.d.R. zusätzlich Angaben zum Aufnahmegerät und zu den Parametern der Messung (Schichtbildabstand und Pixelgröße). Gegenüber medizinischen sind industrielle CT durch eine höhere Strahlungsleistung gekennzeichnet, um dichtere Materialien analysieren zu können. Weiterhin zeichnen sich diese Geräte gegenüber medizinischen Anwendungen durch eine höhere Auflösung aus, die bis in den Bereich von wenigen μm Auflösung reicht (Christoph 2006). Anhand einer Aufgabenstellung einer Firma, die Lötverbindungen von Bauteilen zu prüfen hat, wird das verdeutlicht. Vor einer Serienfertigung von Flanschen, die durch Löten miteinander verbunden werden, sollen diese überprüft werden. Dazu wurden die Bauteile mittels hochauflösendem Industrie-CT erfasst und einer Auswertung zugeführt. Die besondere Herausforderung besteht nun in der Verarbeitung der großen diskreten Datenmengen von oft mehreren Gigabyte. Im konkreten Fall wurden pro Lötstelle 850 Bilder mit einer Auflösung von ca. 1000x1000 Pixel pro Bild erstellt.

Die am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD erarbeitete Software mit Plugin-Schnittstelle zur Bereitstellung individueller Softwarelösungen wurde für das Einlesen der CT-Daten, zur Visualisierung und Berechnung angepasst. Im Ergebnis können Lunker und Einschlüsse detektiert und deren Flächeninhalt im Einzelbild bzw. deren Volumen über den gesamten Bildstapel bestimmt werden. Somit ist auch eine Aussage bezüglich der Dichte der Rohrverbindungen oder die Prüfung auf einen geschlossenen Lötkeis möglich.

Literaturverzeichnis

- AiF ZIM 2011, Kleinserientaugliche Kunststoffwerkzeuge im Handzuginstrumentenbau; Modellierung und Simulation von Verdeckbauteilen und zugehöriger Umformwerkzeuge für innovative Fertigungstechnologie im Unternehmen Harmona, Förderkennzeichen: KF2138507CK1
- Christoph, R, Neumann, H.J., 2006, Multisensor-Koordinatenmesstechnik, Verlag Moderne Industrie
- Holtzhausen, S., Schöne, C., Stelzer, R., 2010, Berechnung des sichtbaren Bereiches einzelner Posen beim Streifenprojektionsverfahren, Tagungsband 13. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, Berlin, ISBN: 978-3-942709-00-2
- Holtzhausen, S.; Schreiber, S.; Schöne, C.; Stelzer, R., 2009, Highly accurate automated 3D measuring and data conditioning for turbine and compressor blades. In: Proceedings of Turbo Expo 2009, Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air; June 8-12, 2009, Orlando, Florida, USA
- Schetelich, F., Schöne, C., 2008, Rechnergestützte Konstruktion, Simulation und Fertigung von Musikinstrumenten. Markneukirchen: Musicon Valley, 2006. ISBN 10: 3-00-019671-4.
- Sembdner, P., Hofmann, D., 2012, Messung eines Werkzeuggrundkörpers eines Schneidwerkzeuges für eine Änderungskonstruktion, interne Dokumentation, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
- Schöne, C., Stelzer, R., Jung, R., 2008, Spezifik von Reverse Engineering in der Kleinserienfertigung des Streichinstrumentenbaus – Produktionstechnische Aspekte, 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Aachen, ISBN 978-3-8322-7544-0
- Schöne, C., 2009, Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik, Dr. Hut, München, ISBN 978-3-86853-103-9
- Schöne, C., Stelzer, R., Schmidt, U., Süße, D., 2010, Reverse Engineering for Spotting of Sheet Metal Forming Parts, Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2010, Montreal, Quebec, Canada
- Schöne, C.; Stelzer, R.; Süße, D.; Schmidt, U., 2010, Reverse Engineering in der Einarbeitungsphase der Blechumformung, ZWF Jahrg. 105(2010)6, Carl Hanser Verlag, München, 2010
- Rauh, W., 2007, Computertomographie in der Koordinatenmesstechnik. Stuttgart : IPA Stuttgart, 12. Anwenderforum Volumenmesstechnik und Rapid Prototyping
- Wang, W., 2010, Reverse Engineering: Technology of Reinvention, ISBN-10: 1439806306

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer
 Dr.-Ing. habil. Christine Schöne
 TU Dresden
 Lehrstuhl Konstruktionstechnik CAD
www.re-dresden.de

CAE Methoden in der Einarbeitungsphase der Blechumformung

1 Einleitung

Um Kosten in der Produktentwicklung weiter zu minimieren und gleichzeitig die Qualität der zu fertigenden Produkte zu gewährleisten, nehmen virtuelle Methoden in der Produktentwicklung einen immer größeren Stellenwert ein (Stelzer & Eigner, 2009). An die Maßhaltigkeit von umgeformten Blechteilen werden ständig höhere Anforderungen gestellt. Die Ursachen für Maßabweichungen an gefertigten Blechteilen resultieren maßgeblich aus den Berechnungsmodellen, die das System Werkzeug-Blechteil-Umformmaschine bisher in der Virtuellen Produktentwicklung noch nicht vollständig und exakt abbilden können. Mehrere Zyklen händischer Änderungen an den Umformwerkzeugen sind heute noch die Regel. Dieser Prozess wird bei der Blechumformung als Einarbeitungsphase bezeichnet und wird von Spezialisten des Werkzeugbaus unter Nutzung von unscharfem Erfahrungswissen durchgeführt. Der Zyklus der manuellen Einarbeitungsphase im Bereich des Werkzeugbaus steht den wirtschaftlichen Forderungen zum schnelleren Serienanlauf und zur Kostensenkung entgegen. Hier kann die Verkürzung des Einarbeitungsprozesses dienlich sein.

Deshalb stehen Forderungen nach entsprechender Absicherung der Werkzeugkonstruktion mittels einer prognosesicheren und damit notwendig qualitativ erweiterten numerischen Simulation des Umformprozesses. Dieses Ziel wird im Rahmen eines Forschungsvor-

habens durch den Ansatz erreicht, wesentliche bisher notwendige »Nacharbeiten« vorab in der Werkzeugplanungsphase im Virtuellen zu berechnen und damit bereits bei der Herstellung des »Rohwerkzeuges« zu berücksichtigen. Die Geometrie des Rohwerkzeuges soll damit wesentlich näher an der des Fertigwerkzeuges liegen. Damit wird künftig der notwendige Nacharbeitsaufwand verringert.

2 Zielstellung und Lösungsweg

Ergebnisse vorangegangener Forschungsvorhaben (Großmann 2006) zur FEM-Prozesssimulation haben prinzipiell folgende Aspekte gezeigt:

- Mit welchen Modellstrukturen und Parametrierungen ist die Einbeziehung der elastischen Einflüsse aus Maschine und Ziehkissen in der Prozesssimulation möglich.
- Die elastischen Maschinen- und Werkzeugeinflüsse können in ihrem Einfluss auf das Ziehergebnis mittels Simulation bestimmt werden (»erweiterte Methodenplanung«).
- Das erweiterte Prozessmodell kann zur virtuellen Anpassung der Werkzeuggeometrie prinzipiell angewendet werden.

Zur industrietauglichen Anwendung dieser erarbeiteten Methoden besteht schwerpunktmäßig noch folgender Forschungsbedarf, der gleichzeitig die Hauptaufgaben des vorgestellten Lösungsweges darstellt (Abbildung 1):

- Nachweis der »erweiterten Methodenplanung« am realen Einarbeitungsprozess durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Werkzeugen und Blechteilen (Abbildung 1, Punkt 1),
- Modellbewertung hinsichtlich der erreichbaren Realitätsnähe (Abbildung 1, Punkt 2) sowie
- automatisierte Topologieanpassung entsprechend der Werkzeugeinarbeitung durch Applikation von kommerziell verfügbaren Optimierungsalgorithmen auf die Prozesssimulation mit elastischen Maschinen- und Werkzeugeinflüssen (Abbildung 1, Punkt 3).

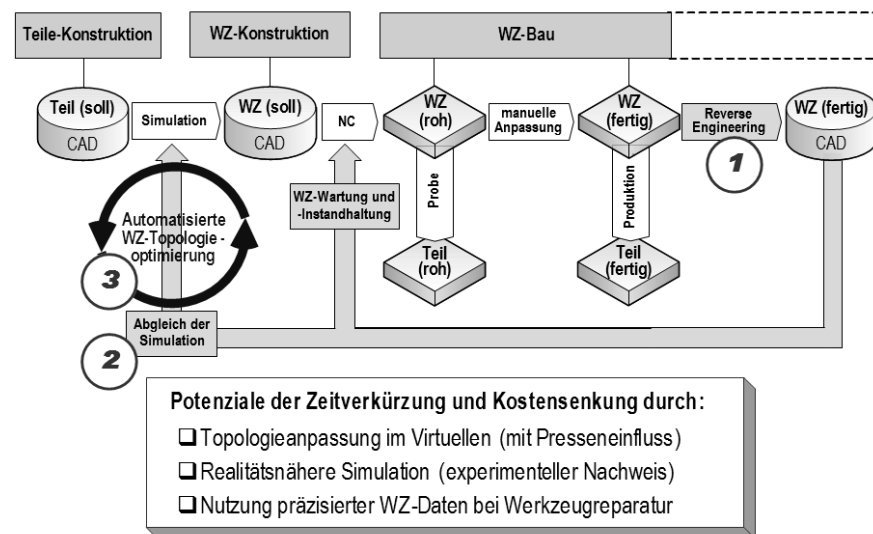


Abbildung 1: Planung und Durchführung von Umformprozessen sowie mögliche Effekte beim Einsatz von CAE-Methoden

Das Forschungsziel besteht in der Verknüpfung der Umformprozesssimulation (Thoms et al 2002) mit innovativer Mess- und Auswertetechnik (Reverse Engineering) (Schöne 2009), um die der Simulation zugrunde liegenden Modelle weiterzuentwickeln und damit die Einarbeitung von Umformwerkzeugen wissenschaftlich zu durchdringen und effektiver gestalten zu können.

Mit den vorgestellten Arbeiten wird ein Beitrag zur Verkürzung des Einarbeitungsprozesses und damit zum schnelleren Serienanlauf sowie zur Kostensenkung geleistet, indem die notwendige Geometrie-anpassung der Werkzeugeinarbeitung vorab in der Methoden- und Werkzeugplanung berechnet wird. Dies wird mit der Berücksichtigung der Werkstoff-, Maschinen- und Werkzeugeinflüsse möglich. Somit entsteht eine neue Basis für die Fräsdatengenerierung für den Bau des »Rohwerkzeuges«. Da die Geometrie des Rohwerkzeuges auf diese Weise wesentlich näher an der des Fertigwerkzeuges liegt, kann mit der untersuchten Methodik und deren Überführung in die Praxis der Nacharbeitsaufwand verringert werden.

3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung orientiert sich an realen praxisrelevanten Aufgabenstellungen und Beispielwerkstücken eines ausgesuchten Industrieunternehmens. Als problematisches Element erweist sich die lückenlose prozessbegleitende Datenerfassung aller Zwischenzustände der Werkzeuge und Blechteile. Vielfach unterliegen gerade in den Anlaufphasen neuer Modelle im Automobilsektor die Daten enormen Geheimhaltungen hinsichtlich geometrischer und technologischer Besonderheiten sowie relativ großen Änderungen. Ausgewählt wird eine PKW-Rückwand.

Als Eingangsdaten aller geometrischen Vergleiche stehen zunächst CAD-Modelle des Stempels, der Matrize, des Niederhalters und des zu fertigenden Blechteils zur Verfügung. Alle weiteren CAD-Daten der Einarbeitungszustände werden aus 3D-Scandaten ermittelt. Weiterhin steht im Ergebnis der Umformsimulation die virtuelle Blechgeometrie mit der Blechdickenverteilung zur Verfügung (PAM-STAMP 2009).

Folgende konkrete 3D-Datensätze werden für die Untersuchungen herangezogen:

- ACAD-Modell Werkzeug Matrize nach Konstruktion
- BCAD-Modell Werkzeug Stempel nach Konstruktion
- CCAD-Modell Werkzeug Niederhalter nach Konstruktion
- DCAD-Modell Blechteil nach Konstruktion konkav
- ECAD-Modell Blechteil nach Konstruktion konvex
- F3D-Scandaten Werkzeug Matrize nach 1. Einarbeitung
- G3D-Scandaten Werkzeug Stempel nach 1. Einarbeitung
- H3D-Scandaten Werkzeug Niederhalter nach 1. Einarbeitung
- I3D-Scandaten Werkzeug Matrize nach 2. Einarbeitung
- J3D-Scandaten Werkzeug Stempel nach 2. Einarbeitung

- K3D-Scandaten Werkzeug Niederhalter nach 2. Einarbeitung
- L3D-Scandaten Blechteil ohne Werkzeugeinarbeitung, konkav
- M 3D-Scandaten Blechteil ohne Werkzeugeinarbeitung, konvex
- N3D-Scandaten Blechteil 1. Einarbeitung, konkav
- O3D-Scandaten Blechteil 1. Einarbeitung, konvex
- P3D-Scandaten Blechteil 2. Einarbeitung, konkav
- Q3D-Scandaten Blechteil 2. Einarbeitung, konvex
- R3D-Simulationsdaten Blechteil konkav
- S3D-Simulationsdaten Blechteil konvex.

Als 3D-Scanverfahren wird ein 3D-Streifenprojektionssensor (GOM 2003) angewendet. Die erreichbare Genauigkeit hängt vom verwendeten Messfeld der Kameras ab. Der Scanner verfügt über drei unterschiedliche Messfelder. Für die Werkzeuge und Blechteile wird das mittlere Messfeld mit 350 × 350 mm gewählt, um alle Details der Oberfläche erfassen zu können. Der Hersteller gibt für diesen Messbereich eine Messunsicherheit von $\pm 0,04$ mm an. Dabei sind ungefähr 20 Einzelmessungen erforderlich, um das gesamte Bauteil zu erfassen. Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass bei großen Werkzeugen und Blechteilen eine vorgelagerte photogrammetrische Erfassung der Referenzmarken auf dem Objekt notwendig ist, um den Fehler bei der Zusammensetzung der Einzelansichten zu minimieren. Im Falle der Anwendung der vorgelagerten photogrammetrischen Messung ergibt sich eine Messunsicherheit von $\pm 0,04$ mm für das gesamte Werkstück. Ohne photogrammetrische Messung ergibt sich allerdings eine Messunsicherheit von $\pm 0,50$ mm. Zur Gewährleistung einer verzugsarmen Spannung der Blechteile für die Messung wird ein vertikaler Spannrahmen verwendet (Abbildung 2).

Auf Grund des umfangreichen Datenmaterials ergibt sich ein großes Potenzial von Vergleichen zwischen den Datensätzen. Die Anzahl möglicher Vergleiche kann nach Gleichung (1) berechnet werden:

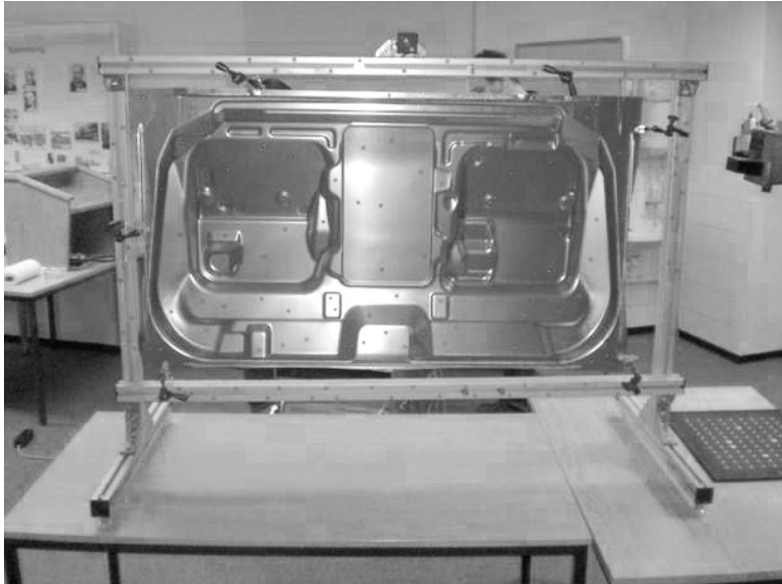


Abbildung 2: Blechteil im vertikalen Spannrahmen zur Messung von 2 Seiten, LaborTU Dresden

Abbildung 3: Auswertepotential für Geometrische Vergleiche zwischen den Datensätzen

| Test Referenz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Anzahl möglicher Vergleiche: Z=(a²-a)/2 | | |
|------------------|---------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | Objektanzahl: a =19 Vergleichsmöglichkeiten: Z =171 | | |
| A | Matrize CAD | 0 | AB | AC | x | AE | AF | x | x | A | x | x | x | AM | x | AO | x | AS | <div>Werkzeugvergleich: =9 Blech mit Blech: =20 Blechkickenanalyse: =10 Blech mit Werkzeug: =30 Nicht durchgeführt: (Blech mit Werkzeug) =15 Ausschluss: 0 Nicht sinnvoll: x =87 Wiederholung: / =171</div> | | |
| B | Stempel CAD | / | 0 | x | DB | x | x | BG | x | x | BJ | x | BL | x | BN | x | BP | x | | | |
| C | Niederhalter CAD | / | / | 0 | CF | x | x | CH | x | x | CK | CL | x | CN | x | CP | x | CR | | | |
| D | Blech CAD konkav | / | / | / | 0 | x | x | DG | DH | x | DI | DK | DL | x | DN | x | DP | x | | DR | |
| E | Blech CAD konvex | / | / | / | / | 0 | EF | x | x | EL | x | x | EM | x | EO | x | EQ | x | | ES | |
| F | Matrize P1 | / | / | / | / | / | 0 | FG | FA | x | x | x | FM | x | FO | x | FS | | | | |
| G | Stempel P1 | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | GL | x | GM | x | GP | x | GS | | | | |
| H | Niederhalter P1 | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | HL | x | HN | x | HP | x | HS | | | |
| I | Matrize P2 | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | IL | x | IO | x | IS | | | | |
| J | Stempel P2 | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | IL | x | JP | x | JS | | | |
| K | Niederhalter P2 | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | KL | x | KP | x | | KS | |
| L | Blech P0 konkav | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | LN | x | LP | | x | LS |
| M | Blech P0 konvex | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | MO | x | | MP | x |
| N | Blech P1 konkav | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | NP | | x | NS |
| O | Blech P1 konvex | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | x | | OP | x |
| P | Blech P2 konkav | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | x | | x | PS |
| Q | Blech P2 konvex | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | 0 | | x | x |
| R | Blech SimCAD konkav | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | | 0 | x |
| S | Blech SimCAD konvex | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | | / | 0 |

Anzahl der Vergleiche = $(19 \times 18) / 2 = 171$ (1)

Der Aufwand für die Durchführung aller Vergleiche ist somit erheblich und nicht alle bieten auch ein Potenzial für die Auswertung. Deshalb werden auch nicht alle Vergleiche ausgeführt. In Abbildung 3 ist das reale Auswertepotenzial aufgezeigt.

In einem ersten Schritt werden CAD-Modelle der Werkzeuge mit den Scandaten unterschiedlicher Einarbeitungsphasen verglichen. Die Ergebnisse der Vergleiche zeigen beispielsweise die Abtragtiefe der manuellen Einarbeitungsphase. Die 3D-Scandaten der eingearbeiteten Werkzeuge bilden danach auch die Grundlage für die geänderten CAD-Modelle der Werkzeuge für die Reparatur. Zu diesem Zweck werden basierend auf den Scandaten nachfolgend Flächenmodelle generiert (Geomagic 2009). Damit erhält man für die NC-Programmierung und Fräsbearbeitung qualitativ hochwertige Modelle. Anschließend werden die Geometrien der Werkzeuge und der Blechteile pro Einarbeitungsphase miteinander verglichen. Für diese Vergleiche ist eine Transformation der 3D-Scandaten in das Koordinatensystem der CAD-Modelle der Werkzeuge ohne Einarbeitung erforderlich. Für alle Transformationen wird zunächst eine grobe Best-Fit-Registrierung verwendet. Nachfolgend werden die Modelle so transformiert, dass an technologischen Basen oder anderen geeigneten ebenen Bereichen ausgerichtet wird. In Abbildung 4 wird der Vergleich zwischen den CAD-Daten des Niederhalters mit den Scandaten nach der Einarbeitung dargestellt und in Abbildung 5 der Vergleich zwischen CAD-Daten der Werkzeuge und Blechteile ohne Einarbeitung. Die Abweichungen in Abbildung 4 demonstrieren deutlich die großen Maßabweichungen infolge Einarbeitung. Ohne Einarbeitung sind die Abweichungen zwischen Werkzeugoberfläche und Werkstückoberfläche sehr hoch (Abbildung 5). Die geometrischen Abweichungen sind ein Maß für die Rückfederung des Blechs (Großmann 2007) Nach der ersten Einarbeitungsphase konnte die Rückfederung des Blechs deutlich verringert werden.

Für numerische Vergleiche unterschiedlicher Einarbeitungszustände und für Vergleiche zwischen Blechteil und Werkzeug sind die 3D-Scandaten in Form von triangulierten Oberflächen aufzubereiten.

Abbildung 4: Vergleich der CAD-Daten des Niederhalters mit Scandaten der 2. Einarbeitungsphase, Abweichung in mm

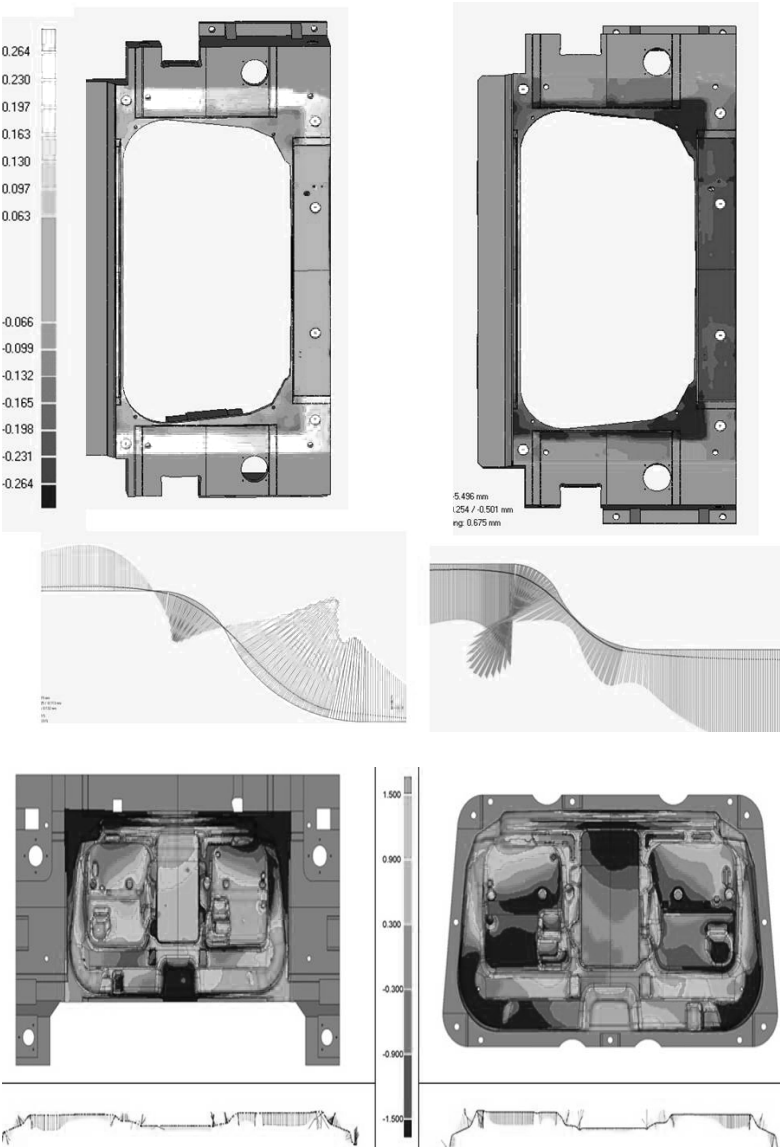


Abbildung 5: Vergleich der CAD-Daten der Werkzeuge mit den 3D-Scandaten der Bleche ohne Einarbeitung

Gilt es, die 3D-Scandaten von Blechteilen für die Umformsimulation zu nutzen, müssen diese in Flächendaten zurückgeführt werden. Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse mit den realen Umformergebnissen werden weiterhin die Werkstoffkennwerte der realen Blechchargen im Labor ermittelt und zur Berechnung genutzt.

Die Ergebnisse der Umformsimulationsrechnungen werden anschließend ebenfalls mit den realen Blechdaten verglichen. Hierbei geht es neben der Analyse der Geometrie insbesondere um die Blechdickenanalyse und deren Vergleich mit den gemessenen Blechdicken pro Einarbeitungszustand (Abbildung 6). Es wird deutlich, dass zwischen den theoretischen und den realen Werten der Blechdicke deutliche Unterschiede bestehen. Diese realen Blechdicken werden letztendlich für die Bewertung der Simulationsrechnungen herangezogen.

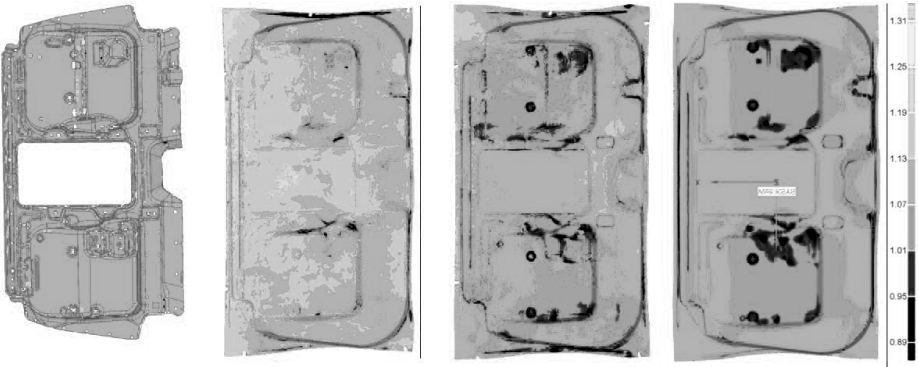


Abbildung 6: Analyse der Blechdicke aus den Werkzeugdaten, v.l.n.r. aus CAD-Daten, aus Blechdaten ohne Einarbeitung, nach 1. Einarbeitung, Simulationsergebnis basierend auf CAD-Werkzeugdaten

4 Ergebnisse

Das Vorhaben leistet für das Verständnis der Simulation von Umformprozessen einen wichtigen Beitrag. Zur Ermittlung erforderlicher Modellabstraktionen, Randbedingungen und technologischer Parameter werden Zusammenhänge verdeutlicht. Nunmehr ist es möglich, eine hohe Prozesssicherheit, eine hohe Qualität in Bezug auf die Maßhaltigkeit sowie eine sichere Reproduzierbarkeit bei der Herstellung von Umformteilen planerisch abzusichern. Durch Berücksichtigung von elastischen Maschinen- und Werkzeugeinflüssen in der »erweiterten Methodenplanung« werden folgende Ergebnisse angestrebt:

- Systematisch entwickelte Modelle zur »erweiterten Methodenplanung«,
- Schaffung einer messtechnisch im Realprozess ermittelten Vergleichsbasis zum Nachweis und zur Bewertung der »erweiterten Methodenplanung«,
- Vergleichende Modellbewertung mit der Antwort auf die Frage »Welches Modell kann die Effekte der Werkzeugeinarbeitung am besten abbilden?«,
- Methode zur automatisierten Optimierung der Werkzeugtopologie unter den Einflüssen der Werkzeugverlagerung und -deformation auf Basis von kommerziell verfügbaren Optimierungsalgorithmen,
- Schlussfolgerungen für den weiterführenden Einsatz des verwendeten fotogrammetrischen Messverfahrens beispielsweise zur In-Prozess-Messung der Blechteile oder zur Qualitätssicherung im Werkzeugbau.
- Mit der weiteren theoretischen und experimentellen Untersuchung und der Anwendung der Methodik der »erweiterten Methodenplanung« sind Firmen in der Lage:
 - die Zeit bis zur Einführung neuer Werkzeuge zu verkürzen,
 - Umformwerkzeuge und Umformteile wirtschaftlicher herzustellen,
 - die Wartung und Instandhaltung effizienter zu organisieren und damit
 - eine stabile Position als Zulieferer für die weiterverarbeitende Industrie einzunehmen.

Der Nachweis und die Bewertung der »erweiterten Methodenplanung« wurde im Vergleich mit bekannten 3D-Messmethoden ermittelten Geometrien (nach dem Fräsen und nach der Einarbeitung) der realen Werkzeuge und der zugehörigen Blechteile vorgenommen. Dazu wurde die 3D-Scantechnik (Streifenprojektionsverfahren) in Verbindung mit photogrammetrischen Messungen für den Einsatz im Werkzeugbau- und -einarbeitungsprozess angepasst. Dabei wurde insbesondere die Instabilität der zu messenden Blechteile beachtet. Eine geeignete Strategie wurde abgeleitet und validiert. Für die Bewertung der Simulationsmethoden konnten ins CAD rückführbare Flächen generiert werden, mit denen:

- die Soll-Ist-Abweichung zur Ausgangs-CAD-Geometrie ermittelt wurde,
- die Ist-Kontaktgeometrie für die Nachweis-Simulation verwendet wurde und
- die Simulationsergebnisse mit den realen Ziehergebnissen vergleichend bewertet wurden.

Die vor und nach der Einarbeitung gemessenen Werkzeugtopologien wurden in die Umformprozessmodelle zurückgeführt. Außerdem werden künftig die Parameter der zugehörigen Pressen in die »erweiterte Methodenplanung« einbezogen. Damit ist die Bewertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Realitätsnähe der erweiterten Modelle möglich. Die Frage, welches Modell dem Realprozess am nächsten kommt, kann letztlich beantwortet werden. Weiterführend können nun Optimierungsstrategien zur Rückfederungskompensation auf die Problematik der Werkzeugeinarbeitung zur automatisierten Topologieoptimierung appliziert werden.

Literaturverzeichnis

- GOM ATOS HR, 2003, 3D-Scanner, GOM mbH, Braunschweig
- Großmann, K.; Hardtmann, A.; Wiemer, H., 2006, Simulation des Blechumformprozesses unter Berücksichtigung des statischen Verhaltens der Pressmaschine. ZWF 101, 10, S. 600-605
- Großmann, K.; Hardtmann, A.; Wiemer, H.; Ulbricht, V.; Süße, D., 2007, Vergleichende Bewertung der Simulation von Umformprozessen mit elastischen Randbedingungen. Forschungsbericht Nr. 264, AiF/EFB, Hannover, 2007

Raindrop Geomagic Studio, 2009, V 10
 Schöne, C., 2009, Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik. Verlag Dr. Hut, München
 Stelzer, R.; Eigner, M., 2009, Product Lifecycle Management. Springer: Berlin
 Thoms, V.; Voelkner, W.; Süße, D., 2002, Methoden zur Kennwertermittlung für Blechwerkstoffe. Forschungsbericht Nr. 187, AiF/EFB 2002
 Umformsimulationsprogramm PAM-STAMP 2G v2009.0.1 Hersteller/Lieferant: ESI GmbH, Eschborn bzw. ESI Group

Kontakt

Jörg Szyszka
 Karosseriewerke Radeberg
 CAD/Werkzeugbau
 Heinrich-Gläser-Straße 20
 01454 Radeberg
 Jorg.szyszka@kwd-dd.de

Dr.-Ing. Dietmar Süße
 TU Dresden
 Fakultät Maschinenwesen
 Institut für Festkörpermechanik
 01062 Dresden
 Dietmar.Suesse@tu-dresden.de

Dr.-Ing. habil. Christine Schöne
 TU Dresden
 Fakultät Maschinenwesen
 Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
 01062 Dresden
 www.re-dresden.de

Petra Aswendt

Mikrospiegel basierte 3D Scannersysteme für Reverse Engineering Lösungen in einem weiten Skalenbereich

Einführung

In der Historie erforderte die komplette dreidimensionale Aufnahme eines Objektes mittels Streifenprojektion einen hohen Zeitaufwand aufgrund der Realisierung der zeitlichen Abfolge von Streifensequenzen mit analogen Mitteln, mehrere Sekunden sind der übliche Standard für eine 3D Aufnahme. Damit einher geht die Notwendigkeit des während der Aufnahmezeit ruhenden Objektes. Das bedeutet Einschränkungen für eine Vielzahl von Anwendungen insbesondere bei dynamischen Prozessen und lebenden Objekten. Neue Möglichkeiten eröffneten sich mit der Einführung digitaler Lichtmodulatoren.

Seit 2001 bietet Texas Instruments unter dem Namen DLP® Discovery™ digitale Spiegelarrays als Entwicklungsplattform an. Diese Mikrospiegel, auf einem Chip befinden sich zum Beispiel 1024 x 768 Einzelspiegel, arbeiten als binärer räumlicher Schalter mit außerordentlich hoher Taktfrequenz. Die Größe eines Spiegelpixels beträgt 13.6 µm und alle 800.000 Spiegel eines 0.7" großen XGA Chips können mit einer Frequenz von bis zu 22.227 Hz schalten. Eine solche Bildwiederholrate im kHz-Bereich eröffnet für die Lichtmodulation völlig neue Möglichkeiten. Als ein Beispiel sind DLP® Projektoren zu nennen, in denen DMDs in millionenfacher Stückzahl verbaut werden.

ViALUX hat unmittelbar nach Einführung der DLP® Discovery™ Mikrospiegelchips mit der Integration dieser neuen Komponente in die ViALUX 3D Scannerprodukte begonnen und seit 2004 basieren die zSnapper® Systeme durchgängig auf dieser neuen Technologie. Durch eine eigene Elektronikentwicklung zur Ansteuerung der Spiegel ist es gelungen, die Leistungsfähigkeit dieses Mikroelektromechanischen Systems (MEMS) voll auszuschöpfen und für die Methodik der Streifenprojektion in der 3D Vermessung zu nutzen. Alle ViALUX 3D Scanner verfügen damit über eine schnelle, langlebige und zuverlässige Projektionseinheit, die das 3D Scannen auf eine neue Qualitätsstufe hebt.

Die ViALUX 3D Scanner bieten durch die enorme Verkürzung der Scanzeit auch die Erweiterung für solche bisher nicht realisierbaren Anwendungen. Die Aufnahmezeit der zSnapper® beträgt 22ms, das entspricht einer 3D Bildrate von 45 Hz. Zum Vergleich, die PAL Videotaktfrequenz ist 25 Hz. 3D Aufnahmen enthalten die x, y, z-Koordinaten des Objektes und als Zusatzinformation die Grauwert- oder Farbtextur. Durch die Fähigkeit, diese Daten in kürzester Zeit generieren zu können, gelingt es mit den ViALUX 3D Scannern instabile Objekte wie zum Beispiel menschliche Körperteile zu vermessen.

zSnapper® Scannersysteme

Die zSnapper® 3D Scanner der ViALUX bilden eine Produktfamilie, die für ein weit gefächertes Spektrum von Aufgaben zum Einsatz kommt. Grundlegend sind zwei Modelle zu unterscheiden

- zSnapper® portable und
- zSnapper® 4M

die jeweils für verschiedenen Applikationsfelder optimiert sind. Das System zSnapper® *portable* ist ein kompakter, handlicher 3D Scanner, der 3D Objekte in kürzester Messzeit auf unkomplizierte Weise erfasst. Der handgehaltene Betrieb, mit dem maximale 3D Bildraten von 46 Hz erzielt werden, ist besonders für medizinische Applikationen vorteilhaft. In wenigen Millisekunden ist die Einzelaufnahme aufgenommen und zeitgleich am PC visualisiert.

Abbildung 1:
zSnapper® portable
im handgehaltenen
Betrieb



Abbildung 2:
zSnapper® 4M mit
Stativ und Messobjekt
auf Drehteller



Um komplette 360° Modelle zu erstellen, sind mehrere Ansichten nacheinander zusammenzusetzen. Verschiedene Methoden sind dafür in der Messsoftware implementiert. Referenzierte Marken in der Umgebung des Objektes ermöglichen das automatische Generieren der kompletten Punktwolke gepaart mit Echtzeitvisualisierung des Scanfortschritts. Die zSnapper® erkennen auch regellose Marken, direkt auf das Objekt appliziert. In diesem Fall werden zunächst alle Ansichten des Objektes erfasst und danach in einem Schritt automatisch zusammengesetzt. Als dritte Variante steht optional die Best Fit Methode als Postprocessing-Schritt zur Verfügung. Verschiedene Exportformate werden dem Nutzer angeboten. Neben dem offenen ASCII-Export hat ViALUX das auf Zylinderkoordinaten basierende AOP Format implementiert. Letzteres ist ein Standard Datenformat in der Orthopädie.

Insbesondere für den technischen Einsatz wurde das Modell zSnapper®4M eingeführt. Bei der technischen Realisierung dieses Systems wurde das erfolgreiche ViALUX Konzept speziell angepas-

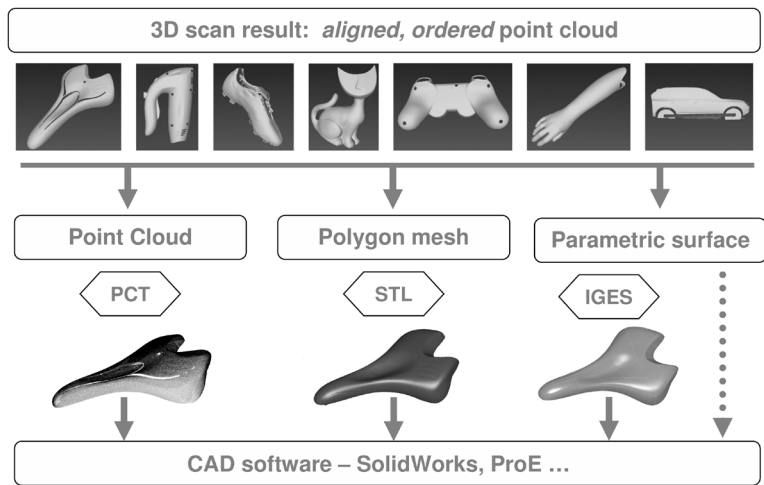


Abbildung 3: Datenfluss bei Reverse Engineering Anwendungen

ster DLP® Discovery™ Mikrospiegelsysteme zur Streifenprojektion kontinuierlich fortgesetzt und auf höchste Punktdichte hin optimiert. Die eingesetzten großflächigen CCD Sensoren gewährleisten ein herausragendes Signal/Rauschverhältnis und liefern in nur 3 Sekunden Scanzeit 200 Millionen Bildpunkte, aus denen die hochparallele Multiprozessor-Software in nur 4 Sekunden 4 Millionen unabhängige x,y,z Koordinaten rekonstruiert.

Ein Einzelscan erfasst Objekte bis zu einem Durchmesser von 240 mm. Der laterale Punktabstand beträgt dabei 1/10 mm, so dass auch für Teile von 100 × 100 mm² Größe noch 1 Million Messpunkte erzielt werden. Für Anwendungen bei noch kleineren, detailreichen Objekten bietet ViALUX eine Gerätevariante zSnapper® 4M XS an, bei dem der laterale Punktabstand in einem 120 × 90 mm² Messfeld nur 6/100 mm beträgt.

Für die Weiterverarbeitung der hoch aufgelösten 3D Messdaten stehen dem Nutzer verschiedene Datenformate zur Verfügung. Neben der binären Speicherung einer kompletten Scan-Sitzung mit allen Einstellungen hat ViALUX ein offenes ASCII Format (PCT) implementiert, das von führenden Softwareprodukten (Geomagic, PolyWorks) direkt importiert wird. Die zSnapper® Postprocessing Software unterstützt alle üblichen CAD Formate (STL, OBJ, IGES etc.) für die Anbindung an anwendungsspezifische Programme. Die unterschiedlichen Varianten des Datenflusses sind in der Abbildung 3 im Überblick dargestellt.

Im folgenden werden Beispiele aus drei Anwendungsfeldern vorgestellt, die sich sowohl hinsichtlich des Skalenbereiches als auch der Messbedingungen stark unterscheiden.

Anwendung Körperscan

Das Messen von Körpern bzw. Körperteilen stellt eine besondere technische Herausforderung dar, wenn die dabei erfassten Daten zuverlässig und genau sein müssen. Die Instabilität des Messobjektes spielt in diesem Zusammenhang eine große Rolle und erfordert zwingend kurze Messzeiten.

Dem wird zSnapper® *portable* gerecht, das Gerät kommt in zahlreichen klinischen und orthopädischen Applikationen zum Einsatz. Abbildung 4 zeigt das Vorgehen am Beispiel der Komplettfußvermessung.

Mit Hilfe einer Referenzplatte und unter Verwendung des in der Orthopädie-Schuhtechnik üblichen Trittschaums kann der Fuß mit wenigen Aufnahmen komplett gemessen werden. Die Teilmodelle der unterschiedlichen Ansichten werden sofort automatisch zusammengesetzt und der Scan-Fortschritt für das 3D Modell in Echtzeit dargestellt. Abbildung 5 zeigt das aus einem solchen Scan gewonnene 3D- Modell.

Anwendung Schmuckelemente

Viele Designelemente in der Schmuckbranche weisen sehr feine Details auf, deren präzise Erfassung und Übernahme in des 3D Modell besonders hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen des 3D Scanners stellen. Die Punktwolke des Systems zSnapper®4M XS misst Objekte mit einer Datendichte von 290 Messpunkten je mm² und wird damit höchsten Ansprüchen gerecht. Das Beispiel einer Ringfassung demonstriert eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit dieses 3D-Scanners für die Digitalisierung von Schmuckgegenständen.

Anwendung Architekturelemente

Im Bereich der Architektur sind oft sehr stark strukturierte und komplexe Designmodelle zu erfassen, und die schnelle, unkomplizierte Arbeitsweise des zSnapper® *portable* erweist sich hier als vorteilhaft. Viele verschiedene Ansichten lassen sich mit Hilfe geeigneter Referenzkörper automatisch in Echtzeit kombinieren, ohne Hilfsmarken direkt auf dem Designobjekt anbringen zu müssen. So werden noch offene Lücken im 3D Modell sofort sichtbar und können durch weitere Aufnahmen geschlossen werden. Zwei Beispiele sind in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt. Sie demonstrieren die Vielfalt der Aufgaben, die sich mit diesem 3D Scanner effektiv lösen lassen.



Abbildung 4: zSnapper® *portable* zum Messen der kompletten Fußform

Abbildung 5 (links): 3D-Modell eines Fußes – frontale Ansicht (zSnapper® *portable*)

Abbildung 6 (rechts): 3D-Modell eines Fußes – plantare Ansicht (zSnapper® *portable*)



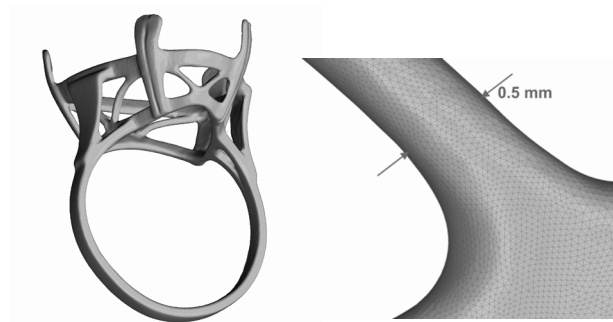


Abbildung 7 (links):
3D Modell einer
Ringfassung –
Gesamtansicht
(zSnapper®4M XS)

Abbildung 8 (rechts):
3D Modell
einer Ringfassung –
Detailausschnitt
(zSnapper®4M XS)

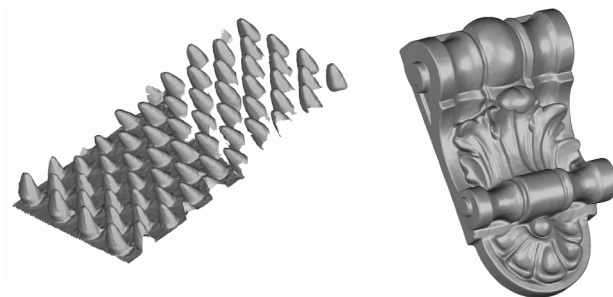


Abbildung 9 (links):
3D Modell des
Designmodells eines
Fassadenelements
(zSnapper® portable)

Abbildung 10 (rechts):
3D Modell eines
Stuckelements
(zSnapper® portable)

Kontakt

Dr. Petra Aswendt
ViALUX Messtechnik + Bildverarbeitung GmbH
Am Erlenwald 10
09128 Chemnitz
www.vialux.de

Gunter Sanow, Oliver Erne & Hagen Berger

Optische 3D-Messtechnik zur Schwingungsanalyse an Windkraftanlagen

1 Einleitung

Der Anteil erneuerbaren Energien in der Energieversorgung soll auch in den kommenden Jahren weiter ausgebaut werden. Dadurch steigt der Bedarf an großen und effizienten Windkraftanlagen (WKA) mit immer höheren Anforderungen an Materialien und Strukturen. Die hohen Belastungen und limitierenden Faktoren in Bezug auf die Lebensdauer solcher Anlagen sind meist dynamisch und abhängig von Strukturschwingungen und Belastungsanregung. Hierzu werden vermehrt Simulationstechniken eingesetzt, die in der Praxis durch den Mangel an genauen Randbedingungen unpräzise sind bzw. als Modell durch Messungen validiert werden müssen. Während typischerweise zur Erfassung von Schwingwegen Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt werden, gestaltet sich die Implementierung solcher Messtechnik in drehenden Strukturen meist komplex und aufwändig (Ozbek et al. 2010). Der Einsatz optischer Messtechnik ist im Vergleich einfacher und kann potentiell die Optimierung von Simulationsmodellen unterstützen (Ozbek et al. 2010, Schmidt-Paulsen et al. 2009, 2011).

Die optische Messtechnik wird im Folgenden an Beispielen aufgezeigt. Ergebnisse dieser Projekte wurden in Teilen schon veröffentlicht.

2 Optische 3D-Messtechnik

Das PONTOS System (siehe Abbildung 1) der Fa. GOM wurde in den vorliegenden Applikationsbeispielen eingesetzt. Basierend auf dem Prinzip des kalibrierten Stereokameraaufbaus bestimmt das System 3D-Koordinaten anhand von aufgeklebten Messmarken (Erne et al. 2005). Die Berechnung der 3D-Koordinaten erfolgt in der PONTOS Software automatisch. Mit einer zeitlich getriggerten Bildaufnahme können nun zu jedem Zeitpunkt die Ortskoordinaten und über einen Zeitraum Bewegungen und Objektverformungen präzise bestimmt werden. Durch den Einsatz diverser Kameraauflösungen mit typ. 1,3 bis 12 Megapixel und möglichen Aufnahmefrequenzen bis typ. 500 Hz kann das System flexibel an verschiedene Applikationen angepasst werden. Die Beleuchtung erfolgt bei höheren Aufnahmefre-

Abbildung 1: PONTOS System mit Sensor und Auswertestation



quenzen mit synchron zur Kamera angesteuerten LEDs, welche in Verbindung mit retroreflektiven Markermaterialien auch bei sehr großen Messvolumen zu einer optimalen Ausleuchtung des Messfeldes und sehr kurzen Belichtungszeiten führt. Die kurzen Belichtungszeiten sind insbesondere bei der Erfassung von schnellen Objektbewegungen zur Vermeidung von Bewegungsunschärfen zu beachten. Die Anpassung auf das Messfeld erfolgt über den Abstand des Systems zum Objekt, den Abstand zwischen den Kameras und den Einsatz von Messobjektiven mit diversen Brennweiten. Typische Messfeldgrößen reichen von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ bis ca. $100 \times 100 \text{ m}^2$. Die Messergebnisse können grafisch überlagert auf den aufgenommenen Bildern dargestellt oder über entsprechende Schnittstellen Systemen zur weiteren Schwingungsanalyse zugeführt werden.

3 Erfassung der Turmbewegung im Not-Stop

Die Belastungen auf eine WKA sind während des Not-Stops extrem und sollten erfasst werden. So wurden die Schwingform und Schwingamplitude an einer WKA mit ca. 40m Durchmesser während eines Not-Stopp Programms durchgeführt. Hierzu wurden Messmarken basierend auf retroreflektierendem Material an Turm und Rotorblätter aufgebracht. Die Kameras und Beleuchtung wurden im Feld auf der Luvseite so positioniert, dass der komplette Rotor im Blickfeld beider Kameras erschien (siehe Abbildung 2). Die Anlage wurde betrieben und im Not-Stop-Betrieb abgebremst. Dabei wird Rotor der WKA mit einer Bremse abgebremst. Die ermittelten 3D-Koordinaten, welche mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet wurden, konnten mit Hilfe der PONTOS Software in das Bauteilkoordinatensystem transformiert und in Verschiebungswerte umgerechnet werden. In den Abbildungen 3 und 4 sind jeweils die Ergebnisse zweier Messreihen dargestellt. Abbildung 3 beschreibt die Bewegung des Turms der WKA bei der Einleitung des Bremsvorgangs, während Abbildung 4 die Bewegung in der Endphase des Vorgangs, direkt nach Stillstand des Rotors zeigt. Am Anfang der Bremsung treten durch das eingeleitete Moment im Kopf des Turmes laterale Auslenkungen im Bereich um 20–30 mm auf, wobei die laterale Auslenkung nach Stillstand des Rotors erheblich größer ist. Aufgrund partieller Abdeckungen der Messmarken

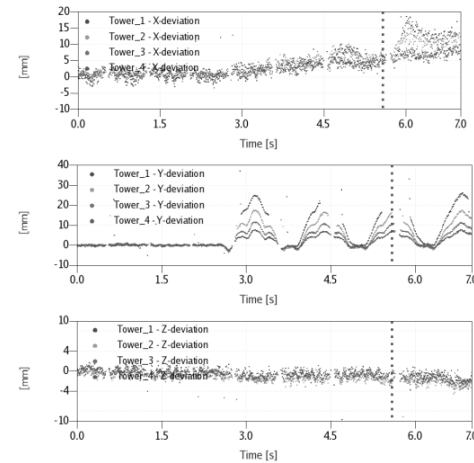
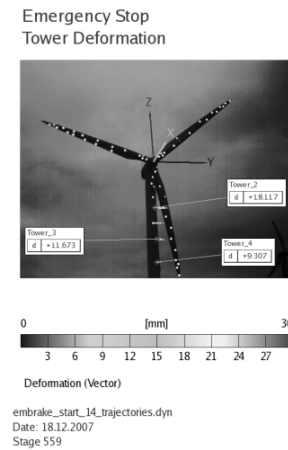


Abbildung 2 (oben): Aufbau der optischen Messanlage vor der WKA

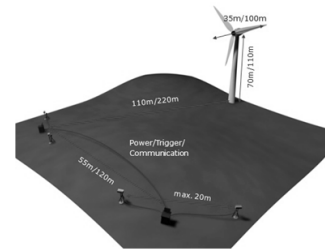
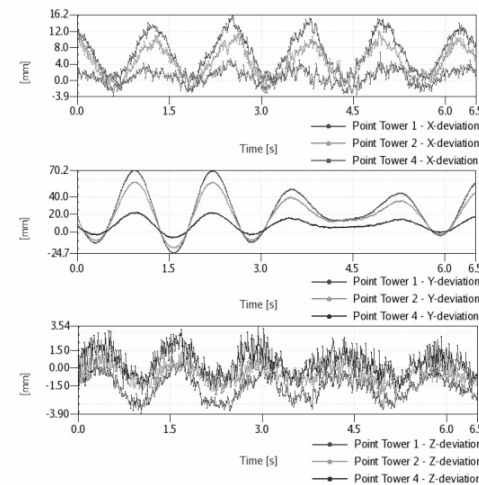
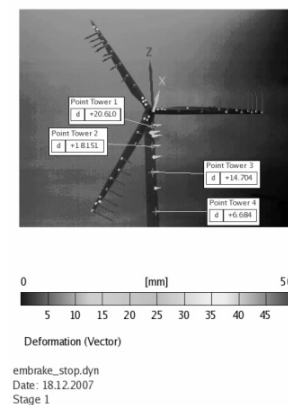


Abbildung 3 (links): Turmbewegung in der Anfangsphase der Not-Stop-Bremsung

Abbildung 4 (unten): Turmbewegung in der Endphase (nach Stillstand) der Not-Stop-Bremsung



auf dem Turm durch die Rotorblätter treten in der Messreihe Zeiten ohne Messwert auf. In Abbildung 4 ist im Diagramm bei ca. 4,5s nach Start der zweiten Messreihe ein deutlicher nicht harmonischer Einfluss zu sehen, welcher auf Kopplungseffekte zwischen Rotor- und Turmschwingung zurückzuführen ist.

4 Schwingformermittlung an einem Rotorblatt

Ein 3,5 m langes Rotorblatt einer kleinen WKA wurde einer Schwingungsanalyse unterzogen. Hierzu wurde das Rotorblatt über Bänder horizontal in einer möglichst »frei-freien« Aufhängung positioniert. Zur Anregung diente ein Shaker, der über einen biegeweichen Draht am Rotorblatt befestigt wurde. Das Rotorblatt wurde einseitig mit 50 Messmarken versehen und ein PONTOS System vor das Mesobjekt positioniert. Anschließend wurde das Rotorblatt mit einem Frequenzsweep zwischen 3 und 100 Hz angeregt. Aus der simultanen Erfassung aller Messmarken wurde die out-of-plane Bewegung (flapwise) extrahiert und die Verschiebungsergebnisse einer FFT-Analyse unterzogen. Die FFT-Analyse (siehe Abbildung 5) zeigt deutliche Resonanzfrequenzen, welche nachträglich nochmals einzeln angeregt und gemessen wurden. Die Ergebnisse der Einzelmessungen zur Analyse der Schwingformen sind beispielhaft in Abbildung 6 und 7 dargestellt. Während bei ca. 15 Hz (Abbildung 6) eine reine Biegeschwingung auftrat ist in Abbildung 7 bei ca. 72 Hz eine überlagerte Biege und Torsionsschwingung zu sehen.

5 Erfassung von Betriebsschwingformen an einer WKA

Zur Bestimmung von Betriebsschwingformen an einer kommerziellen WKA mit ca. 80 m Nabenhöhe und Rotordurchmesser wurde das PONTOS System eingesetzt. Zuerst wurden ca. 50 Messmarken auf dem Turm und den Rotorblättern der WKA angebracht. Die Installation der Messmarken benötigte ca. sechs Stunden für zwei professionelle Industriekletterer (siehe Abbildung 7). Das PONTOS System wurde auf der Luv-Seite im Feld vor der WKA positioniert und die Kameras auf den Rotor ausgerichtet (siehe Abbildung 2). Die darauffolgenden Messungen wurden in Abend- und Nachtstunden bei normalen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Abtastrate

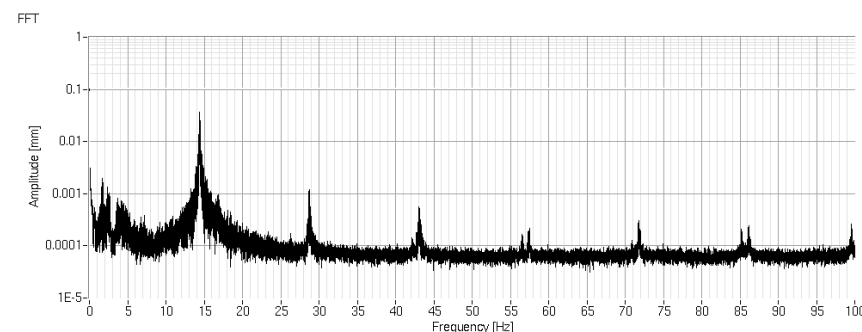


Abbildung 5: FFT Analyse eines 3,5 m Rotorblatts im Frequenzbereich 3-100 Hz

Abbildung 6:
Eigenschwingform bei ca. 15 Hz
(Biegeschwingung, flapwise)

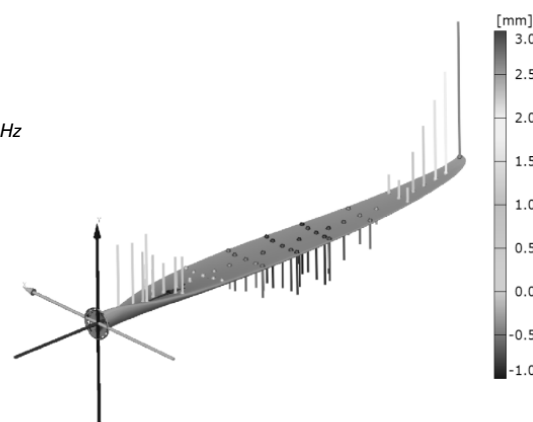
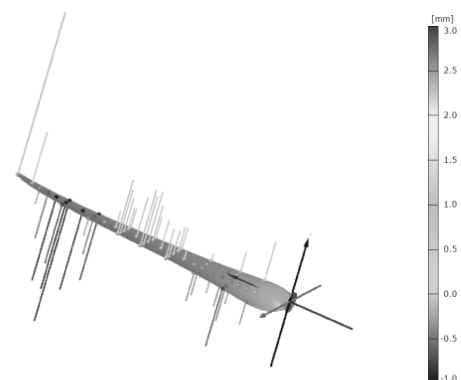


Abbildung 7:
Eigenschwingform bei ca. 72 Hz
(überlagerte Biege- und
Torsionsschwingung)



für die Kameras betrug 25 Hz. Die 3D Verschiebung an jeder der ca. 50 Messmarken wurde ausgewertet. Anschließend wurde eine Starrkörperkompensation auf den Rotor berechnet um die später zu berechnenden Schwingformen einfacher zu extrahieren. Die Frequenzanalyse und Berechnung der einzelnen Schwingformen im Betrieb wurde mittels handelsüblicher Schwingungsanalysesoftware durchgeführt. Die Ergebnisse ausgewählter Schwingformen sind in Abbildung 8 dargestellt.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurden Messungen für diverse Applikationen für WKA mit Hilfe optischer 3D Messtechnik durchgeführt. Die Beispiele zeigen, dass sich die optische Messtechnik zur Verformungs- und Schwingungsanalyse eignet. Die detaillierten Schwingungsauswertungen können mit den Daten der optischen Messtechnik unter Zuhilfenahme von handelsüblicher Schwingungsanalysesoftware durchgeführt werden. Ein großer Vorteil der Messtechnik ist es, dass die eingesetzten »Messaufnehmer«, also die Punktmarken einfach an den Objekten anbringen lassen und keine aufwändigen Referenzrahmen, Kabel etc. installiert werden müssen. Auch, wie in diesen Fällen, können die Marken an aerodynamisch belasteten Bauteilen eingesetzt werden, ohne die Bauteile zu verändern. Besonderes Augenmerk liegt hier auch auf den im Vergleich zu Schwingungsaufnehmern nahezu masselosen »Messaufnehmer«, die selbst in großen Stückzahlen auf leichten Strukturen keine Rückwirkungen auf die dynamischen Eigenschaften befürchten lassen. Begrenzend ist hier die nötige Sichtbarkeit der Messmarken anzumerken, welche z.B. durch partielle Abdeckung einen kurzen Ausfall der Messwerte zur Folge hat. Dagegen ist die Anzahl der Messmarken im Bildfeld prinzipiell unbegrenzt, sodass in der Praxis typischerweise einige Marken zusätzlich eingesetzt werden, um einen kurzfristigen Ausfall auszugleichen. Die Messtechnik lässt sich wie gezeigt für verschiedene Applikationen bei unterschiedlich großen Messbereichen und diversen Abtastraten anpassen und einsetzen. Die Messgenauigkeit ist hier auch von der Größe des Messbereichs abhängig und wurde im Bezug auf die Applikation in Windkraftanlagen diskutiert (Ozbek et al. 2010). Die einfach zu installierende hohe Anzahl der Messstellen

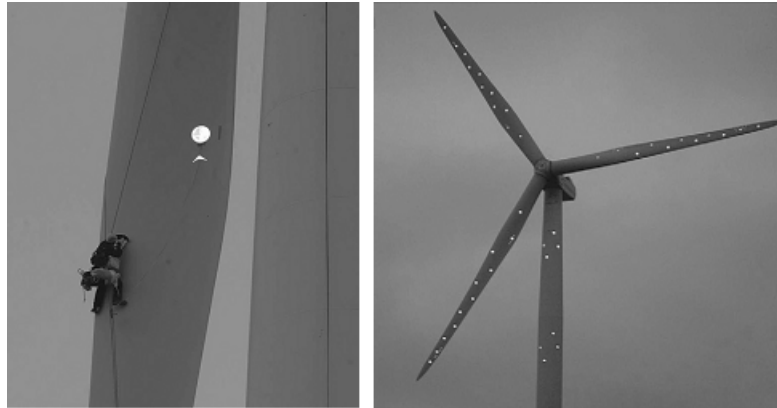


Abbildung 8: Installation der ca. 50 Messmarken durch Industriekletterer; fertig bestückte WKA

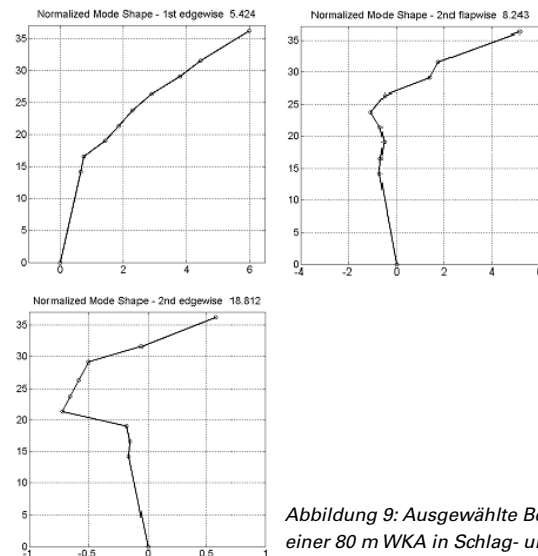


Abbildung 9: Ausgewählte Betriebsschwingformen einer 80 m WKA in Schlag- und Schwenkrichtung

für gleichzeitige 3D-Koordinaten als auch Verschiebungsmessung legt den Vergleich und die Optimierung von Rechenmodellen nahe (Brinkmann et al. 2007, Behrens et al.2010).

Literaturverzeichnis

- Behrens, B.-A., Bouguecha, A., Czora, M., Krimm, R., Matthias, T., Salfeld, V. (2010): Consideration of Machine Properties in FE Analysis of Sheet Metal Forming Processes; Proceedings, 2nd International Conference on Process Machine Interactions, Vancouver: University of British Columbia.
- Brinkmann, C., Haberland, J., Böttinger, S., Erne, O., Sanow, G. (2007): Optical 3D Measuring System for Investigating Tyre Deformations. Landtechnik, H12772, 62. Jahrgang, S. 326–327
- Erne, O., Friebe, H., Galanulis, K. (2005): Ist konventionelle Weg- und Beschleunigungssensorik ersetzbar? Lösungsansätze mit Hilfe von optischer 3D-Messtechnik. Ullrich, P.: Fahrzeugversuch Methoden und Verfahren. Expert Verlag.
- Ozbek, M., Rixen, D., Erne, O., Sanow, G. (2010): Feasability of monitoring large wind turbines using photogrammetry, Energy 35 (2010) 4802–4811, Elsevier
- Schmidt-Paulsen, Erne, O., Sanow, G., Möller, T., Schmidt, T. (2009): Wind turbine operational and Emergency stop measurements using point tracking videogrammetry. SEM Paper
- Schmidt Paulsen, U., Erne, O., Schmidt, T., (2011): Developments in large wind turbine modal analysis using point tracking video-grammetry. Structural Dynamics and Renewable Energy. S. 187–198, Society for Experimental Mechanics

Kontakt

Dipl.-Ing. Gunter Sanow
 Dipl.-Ing. Oliver Erne, M.Sc. (PSU)
 Dipl.-Ing. Hagen Berger
 GOM mbH
 Mittelweg 7–8
 38106 Braunschweig
www.gom.com

Jürgen Gausemeier, Christian Tschirner,
Roman Dumitrescu & Tobias Gaukster

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

1 Einleitung

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

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

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

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

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

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

2 Model-Based Systems Engineering

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

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

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

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

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

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

3.1 Spezifikation der Prinziplösung mit CONSENS

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

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

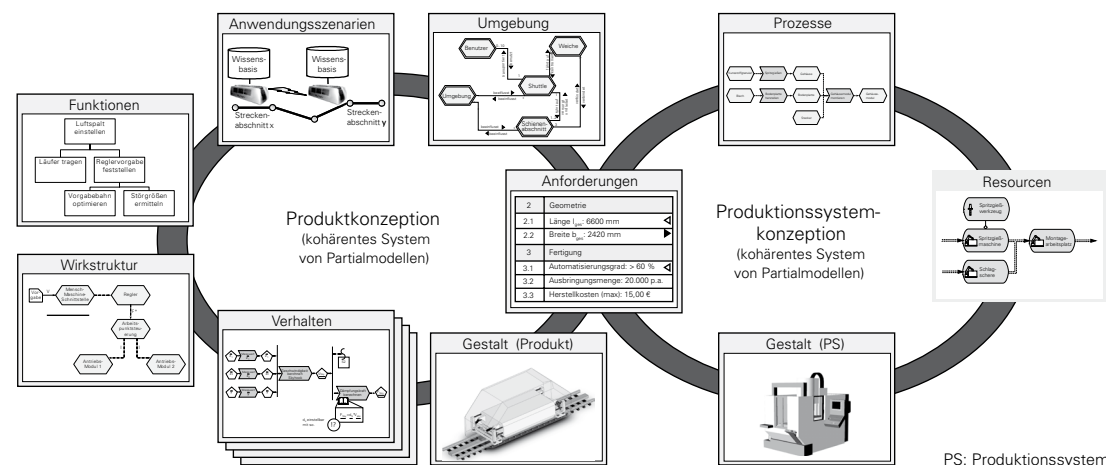


Abbildung 1: System kohärenter Partialmodelle zur domänenübergreifenden Beschreibung der Prinziplösung des mechatronischen Systems und des zugehörigen Produktionssystems

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2 Konzipierung des Systemmodells: Produkt und Produktionssystem

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

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

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

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

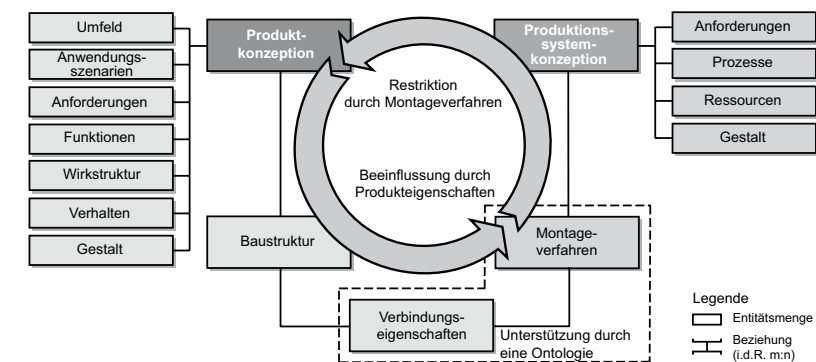


Abbildung 2: Vereinfachte Relationale Darstellung eines semantischen Informationsmodells für die Konzeption von Produkt und Produktionssystem

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

3.3 Mechatronic Modeller

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

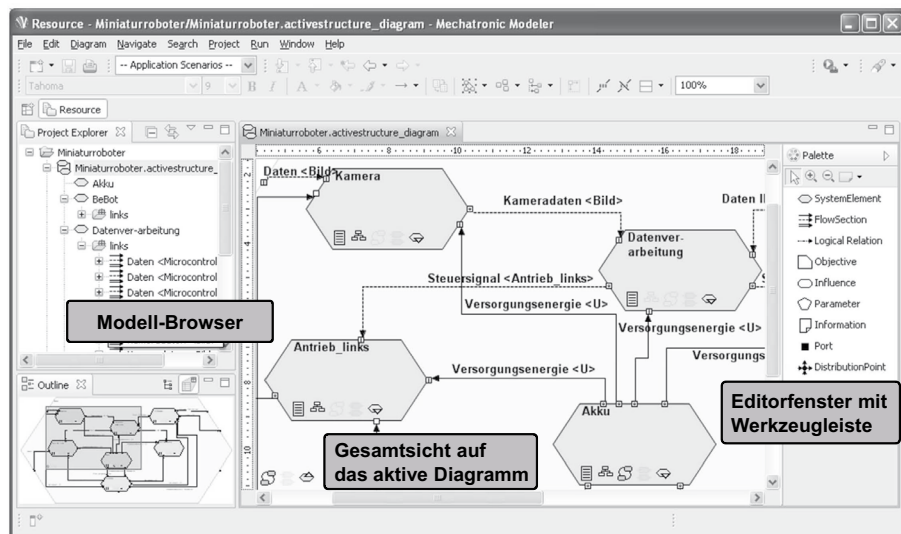


Abbildung 3: Oberfläche des Software-Werkzeugs Mechatronic Modeller

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

4 Management der Produktentstehung auf Grundlage eines fachdisziplinübergreifenden Systemmodells

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

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

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

4.1 Produktstrukturierung mit CONSENS

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

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

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

4.2 Planung und Steuerung von Entwicklungsprojekten mit CONSENS

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

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

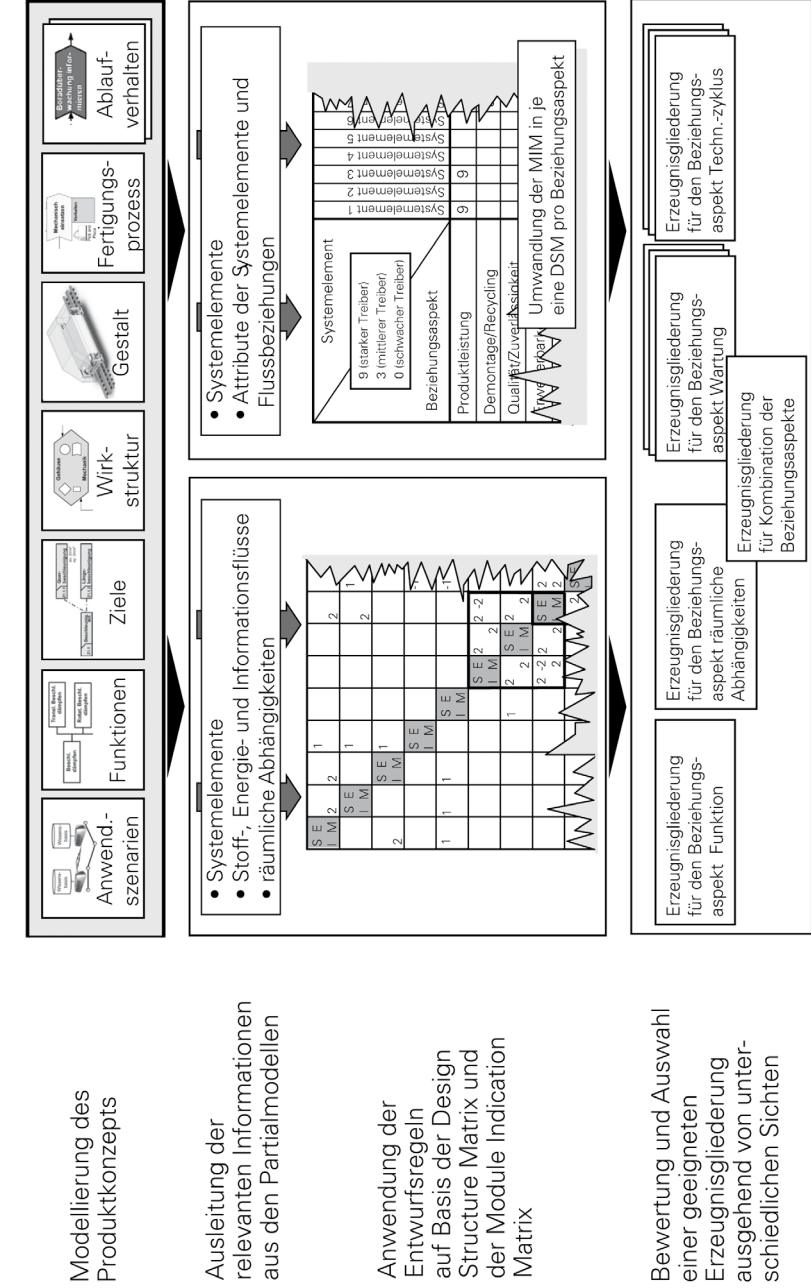


Abbildung 4: Vorgehen bei der Produktstrukturierung mit CONSENS

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

5 Zusammenfassung

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

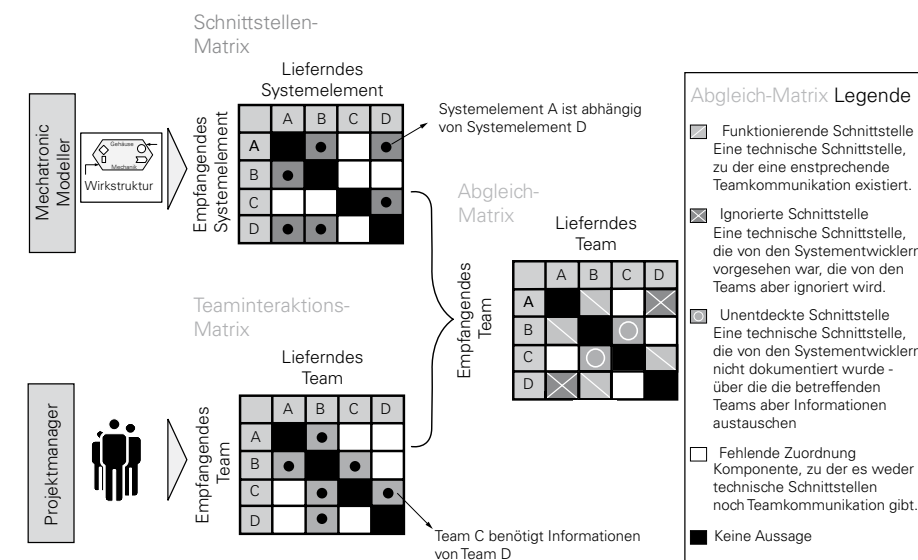


Abbildung 5: Projektmanagement mit CONSENS nach (Sosa et al. 2007)
Anhand eines Beispiels von Sosa/Eppinger 2007

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

Literaturverzeichnis

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

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

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

Kontakt

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

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

Bernd Neutschel, Matthias G. Raith & Sándor Vajna

Moderne Produktentwicklungsprozesse als Grundlage für universitäre Gründerförderung

Alle europäischen Länder spüren immer deutlicher die Auswirkungen des demografischen Wandels. Die damit verbundenen Veränderungen offenbaren neue Herausforderungen für ein generationsübergreifendes Zusammenleben, erschaffen jedoch auch neue Perspektiven für den beruflichen Werdegang von jungen und älteren Bürgern.

In den nächsten 40 Jahren erwartet die Europäische Kommission einen Rückgang der arbeitenden Bevölkerung von 16% bei gleichzeitig sinkenden Geburtenraten. Dies führt u.a. zu Veränderungen am Arbeitsmarkt. Aufgrund des stetig steigenden Nachwuchsproblems sind Unternehmen verstärkt auf das Potential älterer Mitarbeiter angewiesen. Jedoch wird insbesondere in wissensintensiven Branchen der Bedarf an modernem Fachwissen verstärkt über den Nachwuchs geregelt. Ältere Menschen sind verfügbar, jedoch nicht immer ausreichend qualifiziert. Es fehlt ihnen das Wissen über moderne Technologien und Arbeitsabläufe.

Betrachtet man die älteren Menschen aus einer unternehmerischen Perspektive, ist festzustellen, dass Förderansätze bisher nur vereinzelt dieses Alterssegment fokussieren. Ältere Menschen können als Gründer jedoch einen eigenen, messbaren Beitrag zur Stärkung der Gründerkultur leisten. Diese Zielgruppe birgt bisher kaum genutztes unternehmerisches Potential in sich, das es zu aktivieren und auszuschöpfen gilt. Sie verfügt gegenüber jüngeren

Gründern über eine Vielzahl von Vorteilen aufgrund ihres Alters. Ältere Gründer zeichnen sich durch eine langjährige Berufserfahrung, dem damit verbunden höheren technischen Wissen, Branchenkenntnisse sowie Management Erfahrungen aus. Sie verfügen über umfassendere persönliche Netzwerke und können oft auf vorhandene finanzielle Ressourcen zurückgreifen (Weber & Schaper 2004). Betrachtet man nun junge Menschen unter den gleichen unternehmerischen Gesichtspunkten, so fällt schnell auf, dass sich die Kompetenzen von jung und alt sehr gut ergänzen und dass durch die Verbindung individueller Erfahrungen eine Wissensbasis entsteht, die Synergieeffekte erzeugen kann (siehe Abbildung 1).

Weitere Statistiken zeigen, dass das durchschnittliche Alter von Unternehmensgründern innerhalb der EU bis 2030 von 40 auf 45 Lebensjahre ansteigen wird (Theil 2010). Der älteren Generation steht dabei die jüngere gegenüber. Hier ist in den letzten Jahren ein deutlicher Rückgang der Unternehmensgründungen bei den unter 34-jährigen zu verzeichnen (GEM 2009). Deutlich sichtbare Trends unterstreichen damit den wachsenden sozialen wie auch ökonomischen Einfluss von Seniorpreneuren (ältere Personen, die unternehmerisch denken und handeln) auf die heutige Gesellschaft. Bereits ein Drittel aller Neugründungen werden heute von Gründern der Generation 50+ initiiert.

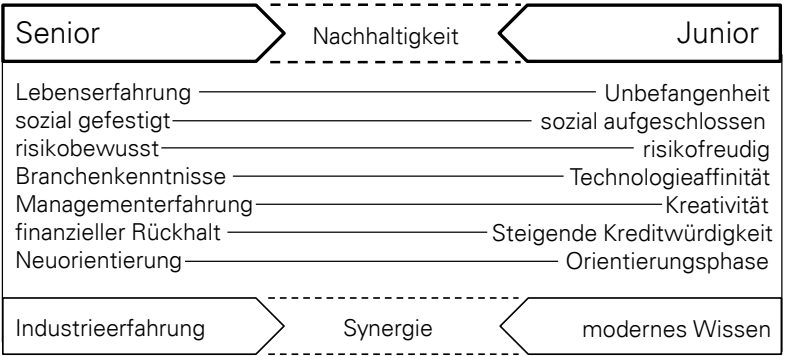


Abbildung 1: Kompetenzen von Senior- und Juniorpreneuren (eig. Erfahrungen aus Begleitprojekten)

Nachdem die Gründungszahlen in Deutschland seit 2004 stark gefallen sind, erfahren diese seit dem Jahre 2009 wieder leichte Steigerungen. Bemerkenswert ist jedoch, dass entgegen dieses Trends die Zahlen in einigen Bundesländern, wie zum Beispiel Sachsen-Anhalt, weiter fallen (IfM 2012). Doch gerade im Land Sachsen-Anhalt, mit der bundesweit dritt höchsten Arbeitslosigkeit und geringer wirtschaftlicher Infrastruktur, sind Neugründungen wünschenswert. Jede Gründung schafft im Schnitt zwei bis drei weitere Arbeitsplätze die gerade in Sachsen-Anhalt dringend benötigt werden. Motiviert durch die beschriebene Sachlage formuliert die Friedrich-Ebert-Stiftung folgende Handlungsempfehlungen für die neuen deutschen Bundesländer (Herdt & Hübner 2010):

„Wir brauchen mehr Praxisorientierung in Bildung und Weiterbildung: Das Bildungssystem muss sich stärker als bisher am Fachkräfte- und Arbeitsmarkbedarf der Zukunft orientieren.“

„Das Land braucht für die Zukunft eine neue Gründungsdynamik. Zum einen, weil damit häufig innovative Produkte verbunden sind, die den Standort insgesamt stärken, zum anderen weil sie den Arbeitsmarkt stabilisieren.“

Konzipierung des technisch orientierten Begleitprojektes SeJu

Gerade in strukturschwachen Regionen der Bundesrepublik entstanden in der Folge verschiedenste Förderinstitutionen und -programme zur Unterstützung von Gründungsinteressierten. Eine Fülle von Angeboten fokussiert Begleitprogramme im Umfeld der Businessplangestaltung und der Start-up-Hilfe. Es ist jedoch festzustellen, dass produktbezogene Unternehmensgründungen weiterhin vor technischen Problemstellungen stehen, die einer umfangreichen fachlichen Begleitung bedürfen.

In dem Spannungsverhältnis zwischen schnellem technologischen Fortschritt und demografischem Wandel agieren jedoch nicht nur Unternehmen, sondern auch technisch orientierte Universitäten. Gerade in der Forschung zu Produktentwicklungsprozessen stellt sich immer deutlicher heraus, dass eine reine produktbezogene Sichtweise kaum noch ausreichend ist, um wirtschaftlichen und

gesellschaftlichen Veränderungen zu genügen. Wo früher rein technische Bewertungsverfahren für Entscheidungen herangezogen wurden, müssen nun auch wirtschaftliche, gestalterische, ergonomische und ökologische Aspekte sowie Fragestellungen zur Nachhaltigkeit mit einbezogen werden.

Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg hat es sich zur Aufgabe gemacht, bestehendes Wissen aus der Forschung in die Wirtschaft zu transferieren. Eines der Projekte, welches an der Schnittstelle zwischen Wirtschaft und Technik angesiedelt ist, trägt den Namen Senior- & Juniorpreneurship (kurz: SeJu). Dieses Gründerbegleitprojekt bietet Gründungsinteressierten die einmalige Möglichkeit, bestehende Produktideen mit Uni-Know-how technisch weiterzuentwickeln. Parallel dazu erarbeiten die Gründungsinteressierten einen bankreifen Businessplan, den sie beispielsweise für die Finanzierungsgespräche mit potenziellen Geldgebern benötigen. Bei ihren Vorhaben werden die Teilnehmer von je einem technischen und einem wirtschaftswissenschaftlichen Studierendenteam aktiv unterstützt. SeJu trägt damit zur Erhöhung der Gründungsneigung von Senioren (Personen mit Industrieerfahrung) und Studierenden (Junioren) in Sachsen-Anhalt bei. Im Zuge der kombinierten Begleitung aus den Bereichen Wirtschaft und Technik werden Ergebnisse geschaffen, die den Teilnehmern eine gelegenheitsorientierte Unternehmensgründung ermöglichen.

SeJu greift dabei auf die schon über viele Jahre bestehende Kooperation zwischen den Lehrstühlen für Maschinenbauinformatik (Prof. Sándor Vajna) und Entrepreneurship (Prof. Matthias Raith) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg zurück, die ihre Kompetenzen in puncto Produktentwicklung und Businessplangestaltung bei der Gründerbegleitung in SeJu-Projekte investieren.

Auch die generelle Sensibilisierung von Studierenden für das Thema Unternehmensgründung wird dabei forciert, da zu beobachten ist, dass immer mehr junge Absolventen ihren beruflichen Werdegang an Großunternehmen orientieren und eine eigene Firmengründung nur sehr selten als Alternative in Betracht ziehen.

Gründerbegleitung unter Nutzung von modernem Universitäts-Know-how

Zwischen den am SeJu-Projekt beteiligten Lehrstühlen besteht seit dem Jahre 2005 eine erfolgreiche, interdisziplinäre Zusammenarbeit im Rahmen der Projektseminare »Integrated Design Engineering« und »Businessplanning«. Hierbei handelt es sich um Lehrveranstaltungen mit starkem Praxisbezug, welche nun in ein Modell zur Begleitung von Gründungsinteressierten eingebunden werden. Die teilnehmenden angehenden Ingenieure unterstützen gemeinsam mit Studierenden der Wirtschaftswissenschaften die angehenden Gründer bei der Entwicklung und Optimierung von Produktideen und Geschäftsmodellen. Dabei werden sie von wissenschaftlichen Mitarbeitern der Universität begleitet und beraten. Die Ideengeber erhalten somit die Gelegenheit, ihre Vorhaben mit akademischer Unterstützung unter Zuhilfenahme modernster Methoden und Techniken des universitären Umfeldes zu optimieren. Die Zielinhalte der Projekte bilden die Entwicklung eines ersten Prototyps sowie die Erstellung eines Businessplans in Hinblick auf die Vermarktung der jeweiligen Produkt- bzw. Geschäftsidee. Die technische Entwicklung und ökonomische Konzeptionierung werden parallel von je einem Ingenieur-Team (Produktentwicklung, Industriedesign, allgemeiner Maschinenbau etc.) und einem Entrepreneurship-Team (Betriebs- und Volkswirtschaftslehre, Finanzen, Marketing etc.) bearbeitet, die verschiedenste Kompetenzfelder innerhalb einer Gruppe vereinen und einen kontinuierlichen Informationsaustausch untereinander gewährleisten.

Struktureller Aufbau von SeJu

Der SeJu-Prozess (siehe Abbildung 2) beginnt immer mit der Akquisitionsphase, in der Projektthemen aus den bestehenden Bewerbungen ausgewählt werden. Bereits in der Bewerbungsphase können Gründungsinteressierte in einen regen Austausch mit den SeJu-Mitarbeitern treten. Die Produktideen werden technisch und entrepreneurisch auf generelle Umsetzungsfähigkeit von den wissenschaftlichen Mitarbeitern geprüft und in einem Auswahlverfahren bewertet.

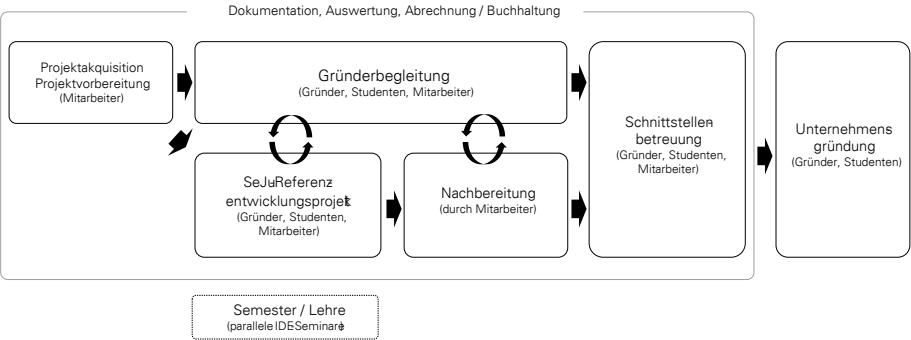


Abbildung 2: Struktureller Aufbau des SeJu-Projektes

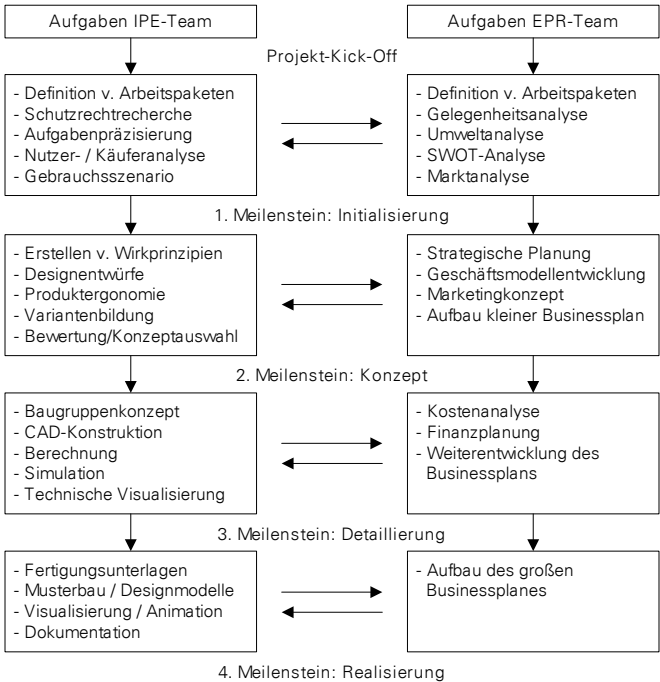


Abbildung 3: SeJu-Meilenstein-Konzept

Nach der Akquisition starten die Entwicklungsprojekte, in denen die Produktideen zu tragfähigen Konzepten ausgearbeitet werden. Die technischen Entwicklungsschritte folgen dabei einem über Jahre verfeinerten Prozess, welcher auf Forschungs- und Projektarbeiten der an SeJu beteiligten Lehrstühle beruht (Freisleben 2001; Burchardt 2001; Raith et al. 2011). Parallel zur Produktentwicklung entsteht ein zur Technik fein abgestimmter Businessplan. In der anschließenden Nachbereitung werden die Konzepte in Prototypen umgesetzt und die Businesspläne bis hin zur Bankreife überarbeitet.

Alle SeJu-Projekte streben letztendlich die Zusammenführung eines motivierten Gründerteams aus Senioren (gründungsinteressierte Personen mit Industrieerfahrung) und Junioren (Studierende) an, welches ausgestattet mit einem marktreifen Produkt und einem bankreifen Businessplan einen nahtlosen Übergang in die nachgelagerte Unternehmensgründung anstreben kann. Dazu werden die SeJu-Projekte an spezialisierte Kooperationspartner herangeführt (z.B. landeseigene Gründernetzwerke wie ego.-BUSINESS).

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb der Entwicklungsprojekte ist in Anlehnung an das Produktentwicklungsmodell von Pahl/Beitz (Pahl et al. 2005) und das Vorgehen im Masterstudien-gang »Integrated Design Engineering« an der Universität Magdeburg in vier Hauptphasen gegliedert. Sie werden durch Meilensteine gegliedert, zu denen der jeweilige Projektstand präsentiert wird (siehe Abbildung 3).

Die Projekte starten mit der Initialisierungsphase. Sie hat das Ziel, den Projekthintergrund durch Recherchen vollständig zu erschließen und das zu lösende Gesamtproblem in Teilprobleme zu untergliedern. Hier werden die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten des Projektes im Detail recherchiert. Die Ergebnisse fließen in die präzisierte Aufgabenstellung ein und formulieren diese dadurch schärfer. Durch die Recherchen können neue Aspekte aufgedeckt werden, die zu Beginn des Projektes noch nicht sichtbar waren. Kennt das Projektteam alle grundlegenden Rahmenbedingungen, dann geht es in die Konzeptfindungsphase über. Hier wird final darüber entschieden, welche Eigenschaften und Funktionalitäten

das neue Produkt haben wird. Somit können auch abschließend alle Arbeitsziele definiert werden, die für die Umsetzung des Konzeptes erreicht werden müssen. Nach der Generierung und Bewertung verschiedenster möglicher Lösungsvarianten muss sich abschließend eine Vorzugsvariante herausbilden.

Das beschlossene Konzept bildet die Grundlage für die folgende Detaillierungsphase. Sie verfolgt die Zielstellung, das Produktkonzept konstruktiv vollständig zu detaillieren (Auslegung, Konstruktion, Berechnung, Simulation) und abschließend eine Fertigungs-vision zu formulieren.

Die vierte und letzte Phase beschreibt die Realisierung des detaillierten Produktkonzeptes mit dem Ziel einer prototypischen Umsetzung. Je nach Aufgabenstellung und Produktkomplexität ist dabei ein realer oder virtueller Prototyp (am PC simuliert und visualisiert) zu erstellen.

Lessons learned – geplante Erweiterung des SeJu-Projektes

Seit dem Projektstart im Februar 2011 konnten vielversprechende Gründungsideen intensiv begleitet werden, die sich bereits im selben Jahr in erste Erfolge verwandelten, als die ersten beiden SeJu-Projekte beim landesweiten Businessplanwettbewerb von ego.-BUSINESS (in den Bereichen Technologie und Service) jeweils mit dem ersten Platz ausgezeichnet wurden. Aus den bisher sechs durch das SeJu-Projekt erfolgreich begleiteten Projekten lassen sich bereits jetzt wertvolle Schlussfolgerungen ziehen, die zusätzliche Erweiterungen und präzisere Vorgehensweisen nahelegen. Wesentliche Erkenntnisse aus der universitären Gründerbegleitung sollen im Folgenden kurz aufgezählt werden:

1. Ausgründungen aus bestehenden Firmen haben ein hohes Potential.

Viele bei SeJu vorgestellte Gründungsideen kamen von Interessenten, die bereits eine eigene Firma leiten oder in einem Unternehmen angestellt sind. Das Thema Intrapreneurship und Unternehmenswachstum sollte daher stärker thematisiert werden (Nutzung und Ausbau bestehender Potentiale im Land).

2. Verwertung über Technologietransfer benötigt Kommunikationsplattform

Es ist notwendig einen direkten Zugang zur Führungsebene lokaler Unternehmen zu bekommen, um die tatsächlichen Unternehmensspotentiale zu erfassen. Oft haben Unternehmen konkrete Produkt- oder Prozessverbesserungsideen, die jedoch durch Mangel an Ressourcen (Bindung durch Tagesgeschäft, zu wenig Mitarbeiter oder fehlende F&E-Abteilungen) nicht weiterverfolgt werden können. Weiterhin ist dieser Zugang notwendig, um bereits existierende Produktneuerungen aus der Universität an Firmen zum Zwecke einer internen Verwertung oder Ausgründung zu transferieren.

- Es ist notwendig bekannte Personen mit starken Industriekontakten als Botschafter zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu gewinnen.
- Eine enge Kooperation mit IHKs und transferorientierten Institutionen ist wichtig.
- Der Aufbau eines Netzwerks als Kommunikations- und Präsentationsplattform zum Zusammenführen von Managern, Forschern und Produktideen ist sinnvoll.

3. Die Unternehmensnachfolge wird zu einer zunehmenden Herausforderung

Viele Unternehmer sehen durch den steigenden Fachkräftemangel und die immer noch starke Abwanderung eine größer werdende Herausforderung die Führungspositionen in ihrem Unternehmen nach ihrem Ausscheiden adäquat zu besetzen. Es fehlt an Kontakten und Einschätzungsmöglichkeiten von jungen Universitätsabsolventen. Das Angebot von studentisch unterstützten Entwicklungsprojekten zum Kennenlernen und Einschätzen von zukünftigen Absolventen sowie die Vernetzung von Führungskräften der Industrie über eine Kommunikationsplattform sollte für die Suche nach geeigneten Unternehmensnachfolgern genutzt werden.

4. Modernes Methoden- & Prozesswissen ist wesentlicher Schlüsselfaktor

Vielen kleinen und mittelständischen Unternehmen fehlen die Ressourcen für Weiterbildungen oder den Vergleich mit Konkurrenten. Schulungen und Workshops zu den Themen Produkt- und Projektmanagement sowie zur Steuerung einer eigenen Produktentwicklung können wertvolle Impulse gerade für kleinere Unternehmen sein, um ihr bestehendes Potential noch besser zu nutzen.

5. Die Idee für eine Gründung liefert nicht notwendiger Weise der Senior

Es ist absolut notwendig, dass Synergien zwischen industrieerfahrenen Seniors und jungen Absolventen innerhalb der SeJu-Begleitprojekte ausgeschöpft werden können. Allerdings ist es auch vorstellbar, dass ein Junior als Unternehmensgründer auftritt, der sich aktiv von einem Experten oder einem industrieerfahrenen Gründungspaten (als Senior) begleiten lässt.

6. Prototypen vereinfachen eine Verwertung in jeder Hinsicht

Die Resonanz auf die Entwicklungsergebnisse der SeJu-Referenzprojekte zeigt eine hohe Nachfrage nach Funktionsmustern und/oder Prototypen ausgehend von möglichen Kooperationspartnern oder Kapitalgebern der zukünftigen Unternehmen. Es ist notwendig innerhalb von technischen Gründerbegleitprojekten Ressourcen für die Erstellung von Produktprototypen zur Verfügung zu stellen.

Sowohl die erfolgreichen Projektabschlüsse als auch die große Nachfrage veranlassen aktuell die SeJu-Initiatoren, das Leistungsangebot des Begleitprojektes zu erweitern. Es werden derzeit erste Gespräche geführt, um das SeJu-Projekt, neben den Gründungsinteressierten, auch bestehenden Firmen zugänglich zu machen. So könnten die bereits bestehenden unternehmerischen Potentiale der sachsen-anhaltinischen Wirtschaftsregion angesprochen werden, um durch Weiterbildungen und Workshops, aber auch durch konkrete Produktentwicklungsunterstützung im Zuge von gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsinitiativen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft innovative Ausgründungen zu schaffen und Unternehmenswachstum gezielt zu unterstützen. Das Projekt SeJu wird durch den Europäischen Sozialfonds sowie durch das Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt gefördert und ist deshalb für alle Teilnehmer kostenfrei.

Literaturverzeichnis

- Brixy, U., Hundt, C., Sternberg, R. & Vorderwülbecke, A. 2009: Global Entrepreneurship Monitor (GEM) – Länderbericht Deutschland 2009.
Burchardt, C. & Vajna, S. (Hrsg.) 2001: Erweitertes Konzept für die Integrierte Produktentwicklung, Integrierte Produktentwicklung Band III, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

- Freisleben, D. & Vajna, S. (Hrsg.) 2001: Gestaltung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen mit einem wissensbasierten Vorgehensmodell, Integrierte Produktentwicklung Band II, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Herdt, H. & Hübner, K. 2010: Neue wirtschaftliche Dynamik in Sachsen-Anhalt, Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn
IfM 2012: Unternehmensgründungen und Unternehmensliquidationen und deren Saldo 1997-2012 in Deutschland, IfM Bonn
Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 6. Auflage
Raith, M., Staak, T., Wilker, H. 2011: High-Expectation Entrepreneurship – Strategic Planning for High-Growth Start-Ups, in: H.F.O. von Kortzfleisch (Ed.), Scientific Entrepreneurship – Reflections on Success of 10 Years EXIST, EUL, S. 305-322
Theil, S. 2010: The Golden Age of Innovation, Newsweek, 20. August 2010
Weber, P. & Schaper, M. 2004: Understanding the grey entrepreneur, Journal of Enterprising Culture, Vol. 12, No. 2

Kontakt

Dipl.-Ing. Bernd Neutschel
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Institut für Maschinenkonstruktion
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
bernd.neutschel@ovgu.de
www.seju.ovgu.de

Prof. Dr. Matthias G. Raith
Lehrstuhl für Entrepreneurship
Fakultät für Wirtschaftswissenschaft
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Sándor Vajna
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Institut für Maschinenkonstruktion
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Sebastian Schubert, Jan Erik Heller & Jörg Feldhusen

Produktmerkmale in der Entwicklung von kundenindividuellen Produkten

1 Einleitung

In der Vergangenheit wurden Konsumgüter für Massenmärkte entwickelt und produziert. Mittlerweile sind viele Märkte gesättigt und die Produkte haben sich in diesen Märkten funktional immer mehr angenähert. Dies bedeutete, dass die Produkte kostenoptimiert hergestellt werden müssen, um auf diesem Käufermarkt wettbewerbsfähig zu sein (Baumberger 2007).

Gleichzeitig ist ein zunehmender Individualisierungswunsch durch die Kunden festzustellen (Fraunhofer Institut ISI 1998). Somit werden auch immer mehr kundenindividuelle Produkte gefordert (Huber et al. 2008). Durch den gesellschaftlichen Wandel hin zu einer Informationsgesellschaft hat der Kunde zusätzlich eine sehr spezifische Vorstellung von dem, was er möchte und gleichzeitig stehen ihm durch die Vernetzung mehr Anbieter zur Auswahl und stärken somit seine Position gegenüber den Unternehmen (Schaller et al. 2004).

Der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt und der Wunsch nach individuellen Produkten stellen die Unternehmen vor die Aufgabe, möglichst gut die Wünsche der Kunden zu einem günstigen Preis erfüllen zu können. Das heißt, dass die Unternehmen immer mehr gezwungen sind, das Optimum zwischen möglichst geringen Produkt- und Prozesskosten und individueller Produktgestaltung zu finden.

Viele Unternehmen reagierten auf die Marktsättigung bisher damit, Produkte für kleine Nischensegmente zu produzieren, um das Verkaufsvolumen zu steigern (Lindemann et al. 2006). Obwohl die externe Vielfalt steigt, bleibt der Marktanteil dabei häufig nahezu konstant. Allerdings vergrößert sich dadurch die interne Vielfalt in den Unternehmen, wodurch sich die Kosten durch die größer gewordene interne Komplexität erhöhen, so dass am Ende die Kosten für alle Produkte steigen (Piller 2006, Schuh 2005).

Ein Ansatz, der dieses Problem löst, ist der des Mass Customization, allerdings nur in wenigen Geschäftsbereichen, hier sei vor allem die Bekleidungsindustrie genannt (Piller 2006). Die Automobilindustrie ist ein weiterer Geschäftsbereich, der kundenspezifische Produkte schon über viele Jahre anbietet. Dabei ist zu beobachten, dass trotz einer Erhöhung der Varianz die Verkaufszahlen nicht steigen (Piller 2006). Außerdem ist festzustellen, dass ein Großteil der verfügbaren Bauteilvarianten nur sehr selten eingebaut wird (Lindemann et al. 2006). Es besteht also offensichtlich noch ein Bedarf, die Entwicklung von kundenindividuellen Produkten hinsichtlich einer besseren Planung zu unterstützen.

Soll nun mit einer neuen Produktgeneration das Ziel verfolgt werden, die interne Vielfalt zu reduzieren und trotzdem die von den Kunden geforderte externe Vielfalt anzubieten, muss dies bei der Planung der Produkte schon berücksichtigt werden. Dafür wird hier ein Ansatz präsentiert. Für diesen wird vorausgesetzt, dass das Unternehmen Vorgängerprodukte hat, aus denen Erfahrungen bzgl. der Produktart resultieren, dass eine Produktstruktur für kundenindividuelle Produkte aber noch nicht existiert. Diese Problemstellung ist vor allem bei Massenprodukten zu beobachten, da es bei hohen Stückzahlen günstiger ist, integral zu fertigen (Pahl et al. 2007, Ehrlenspiel et al. 2007). Kundenindividuelle Produkte müssen im Gegensatz dazu an den Stellen, an den der Kunde das Produkt beeinflussen darf, differential gestaltet und gefertigt sein.

Dieser Trend muss für kundenindividuelle Produkte an den Stellen aufgebrochen werden, wo der Kunde einen Einfluss auf das Produkt

nehmen möchte. Hierfür gibt es bisher keine Ansätze, die den Ingenieur bei der Tätigkeit der Produktplanung bzw. der –Produktstrukturierung unterstützen. Das Ziel muss es also sein, den Prozess der Produktplanung zu verbessern, um nur diejenige Produktvielfalt anzubieten, die der Kunde wahrnimmt und wünscht. Um erfolgreich zu sein, darf die Anpassbarkeit nicht zu groß werden, da ansonsten die unternehmensinterne Komplexität zu groß wird. Sie muss aber vorhanden sein, um Kunden an sich zu binden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Ingenieur in der Lage sein, eine vollständige Produktfamilie zu planen und diese auch hinsichtlich der Kosten optimiert zu gestalten.

In dieser Arbeit wird unter anderem detailliert dargelegt, warum die Planung von optimierten kundenindividuellen Produkten so schwierig ist. Zwei unabhängig davon existierende Probleme, die aufgrund der Tatsache existieren, dass bisher für den Massenmarkt gestaltet und produziert wurde, sind, dass Ingenieure bisher auf die Reduzierung der Kosten einer konkreten Variante zielten und sich eine Gleichteilstrategie aus Kalkulationssicht nicht rechnete. Außerdem zielten viele Ingenieure auf eine Einmaligkeit ihrer Produkte (Salvador & Rungtusanatham 2010). Beide Punkte widersprechen dem Ziel einer kostenoptimierten Produktfamilie.

In dieser Arbeit soll ein Ansatz skizziert werden, mit dem der Ingenieur bei der Produktstrukturierung unterstützt werden kann. Dieser Ansatz basiert auf Produktmerkmalen, die schon frühzeitig im Produktplanungsprozess bekannt sind und die Kundensicht widerspiegeln. Um ein quantitativ guten Überblick zu bekommen, der die Marktsituation repräsentiert, müssen viele Kunden befragt werden. Für eine kostenoptimierte Produktstrukturierung muss allerdings auch die Unternehmenssicht berücksichtigt werden. Die Daten aus Kunden- und Unternehmenssicht werden zusammengeführt und sollen mittels Clustermethoden analysiert werden. Auf Basis dieser Information können dann Informationen abgeleitet werden, die den Ingenieur bei der Erstellung einer optimierten Produktstruktur für eine Produktfamilie unterstützen.

2 Definitionen

Produktfamilie

Eine Produktfamilie sei der Teil des Produktportfolios eines Unternehmens, der über denselben Zweck und dieselben Hauptfunktionen verfügt und eine hohe Ähnlichkeit zwischen den Elementen, also Produkten, der Produktfamilie hat. Die Nebenfunktionen können sich allerdings unterscheiden.

Jedes Produkt besteht dabei aus Standardkomponenten und optionalen Komponenten. Standardkomponenten kommen in jedem Produkt der Produktfamilie vor, optionale Komponenten (Optionen) können durch Kunden konfiguriert werden.

Produktmerkmale

Produktmerkmale seien definiert als festgestellte bzw. allgemein akzeptierte Eigenschaften von Gegenständen (hier Produkten) [...], wobei die Feststellung der Eigenschaft z. B. durch Beobachtung, Messung, allgemein anerkannte Aussagen oder genormte Festlegung erfolgen kann. Der Unterschied zwischen Merkmalen und Eigenschaften besteht lediglich darin, dass Eigenschaften alle an einem Objekt und seinem Zusammenwirken mit der Umgebung feststell-, beschreib- bzw. aussagbaren Aspekte umfassen, wohingegen Merkmale nur die tatsächlich festgestellten, d. h. bewusstgemachten, Eigenschaften darstellen (Weinbrenner 1993).

Standardkomponenten haben also einen einheitlichen Satz von Ausprägungen der Produktmerkmale, Optionen unterscheiden sich mindestens in der Ausprägung eines Produktmerkmals untereinander.

3 Mass Customization

Ein Ansatz, der das Ziel verfolgt, kundenindividuelle Produkte mit massenmarktfähigen Produktionsstrategien herzustellen, ist der Ansatz der Mass Customization, der häufig mit kundenindividueller Massenfertigung übersetzt wird. Die genauen Definitionen variieren dabei aber stark (Piller 2006). Grundsätzlich wird das Ziel verfolgt, Produkte zu produzieren, die eine ausreichende Varianz und Anpas-

| Phase d. Kundenintegration im PLZ | | Form (Ausmaß) der Produktindividualisierung |
|-----------------------------------|----------------|--|
| Hard Customization | E&K | Engineer-to-order : Individuelle Entwicklung oder Anpassung von einzelnen bzw. umfangreichen Produktbestandteilen |
| | Fertigung | Make-to-order : Individuelle Fertigung von zum Teil kundenspezifischen Komponenten |
| | Montage | Assemble-to-order : Endmontage von standardisierten Komponenten und Modulen auf Basis einer kundenindividuellen Konfiguration |
| Soft Customization | Vertrieb | Match-to-order/Bundle-to-order : Unterstützung bei der individuellen Auswahl von Produkten und Zusammenstellung von Leistungsbündeln |
| | Produktnutzung | Selbstindividualisierung: Eigene Anpassung des Produktes durch den Nutzer |

Abbildung 1: Unterscheidung verschiedener Individualisierungskonzepte in Abhängigkeit des Zeitpunktes der Kundenintegration (Piller & Stotko 2003)

sungsfähigkeit beinhalten, so dass für jeden Kunden die Anforderungen erfüllt werden können und die Produkte dennoch erschwinglich sind (Pine II 1993). Um kundenspezifische Produkte entwickeln zu können, muss der Kunde in den Produktentstehungsprozess integriert werden. Piller unterscheidet zwischen verschiedenen Konzepten der Kundeneinbindung in Abhängigkeit des Zeitpunktes im Produktlebenszyklus (PLZ). (Abbildung 1)

In diesem Kontext soll der Begriff des Mass Customization so verstanden werden, dass die Produkte kundenspezifisch montiert werden, also aus vordefinierten Produkt- und Prozessbausteinen bestehen. Der Aspekt der kundenspezifischen Dienstleistung soll hier nicht näher beleuchtet werden.

Obwohl der Ansatz des Mass Customization mittlerweile fast zwanzig Jahre alt ist, beschränkt sich heute das real verfügbare Angebot von kundenspezifischen Produkten, die mithilfe der Massenfertigung hergestellt werden, maßgeblich auf die Bekleidungs- und die Möbelindustrie (Piller 2012, Piller 2006). Es sind nur wenige Angebote in anderen Branchen, zum Beispiel im Bereich der Elektrogeräte, verfügbar (Ponn et al. 2004). Diese Angebote beschränken sich dann zumeist auf die Anpassung von Gehäuseelementen mit Designfunktionen. Technische Funktionen sind nur in geringem Umfang anpassbar (Leica Camera AG 2012, Loewe AG 2012). Anpassungen werden meist durch den Kunden oder Vertrieb durchgeführt. Außerdem sind die Produkte einem Segment mit teuren Preisen zuzuordnen.

4 Lösungsansatz

Die Lösung dieses scheinbar grundsätzlichen Problems kann in einem besseren Verständnis und einer besseren Berücksichtigung der Kundenwünsche bestehen, denn die Produkte müssen genauso viele Freiheitsgrade aufweisen, wie von den Kunden gewünscht. Die Freiheitsgrade bestehen dabei in wahrnehmbaren und anpassbaren Produktmerkmalen.

Um bewerten zu können, ob eine Option wirtschaftlich angeboten werden kann, müssten dem Kunden die Option und der Preis dafür genannt werden, damit er entscheiden kann ob er diese Option kaufen würde oder nicht. Der Kunde würde Kosten und Wert gegenüberstellen und bewerten. Diese Faktoren hängen allerdings von wiederum von mehreren kunden- und unternehmensspezifischen Faktoren ab (siehe Abbildung 2). Grundsätzlich soll hier zwischen der Kundenseite und der Unternehmensseite unterschieden werden, wobei die Kundenseite die Größen beinhaltet, die der Kunde wahrnimmt bzw. die den Kunden betreffen. Die Unternehmensseite beinhaltet die Größen, die das Unternehmen wahrnimmt bzw. durch das Unternehmen beeinflusst werden. Das Produkt lässt sich dabei keiner der beiden Seiten eindeutig zuordnen. Für das Produkt gilt, dass es variable Produktmerkmale besitzt.

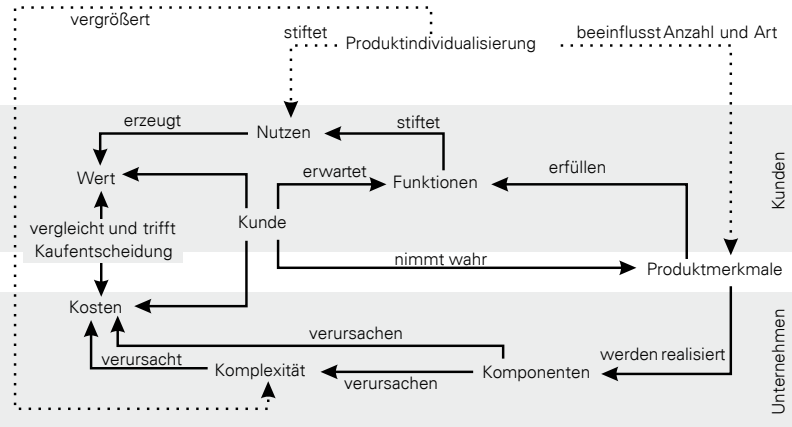


Abbildung 2: Theoretisches Modell zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen Produkt, Kunde und Unternehmen

4.1 Kundenseite

Auf der Kundenseite erfüllen die Produktmerkmale durch den Kunden gewünschte Funktionen. Grundsätzlich kann zwischen technischen Funktionen und den nicht-technischen Funktionen unterschieden werden. Für die nicht-technischen Funktionen gibt es verschiedene Synonyme: Ehrlenspiel nennt die nicht-technische Funktion Geltungsfunktionen (Ehrenspiel 2009). In der Designtheorie wird dagegen von der produktsprachlichen Funktion gesprochen, die durch die nicht-technischen Produktmerkmale erfüllt werden (Brezing 2006). Bei den produktsprachlichen Funktionen kann wiederum zwischen formalästhetischen Funktionen, Symbol- und Anzeichenfunktionen unterschieden werden (Steffen 2000). Dies zeigt, dass ein Produkt nicht nur adaptive technische Funktionen besitzen muss, sondern auch adaptive Symbolfunktionen bzw. hedonistisch-sinnliche Funktionen.

Die Erfüllung der Funktionen selbst stiftet für den Kunden einen Nutzen. Nach Huber et al. kann zwischen dem funktionalen, dem symbolischen und dem hedonistisch-sinnlichen Nutzen unterschieden werden (Huber et al. 2008). Die Erfüllung der technischen Funk-

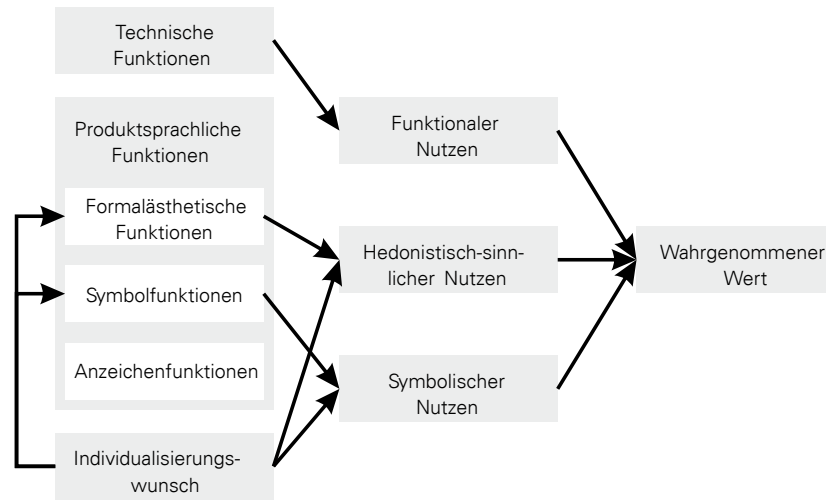


Abbildung 3: Zusammenhang Funktion/Individualisierungswunsch – Nutzen – Wert

tionen stiftet dabei den funktionalen Nutzen, die der Symbolfunktionen einen symbolischen Nutzen (siehe Abbildung 3).

Neben der Erfüllung der genannten Funktionsarten erzeugt gemäß Huber et al. auch die Erfüllung des Individualisierungswunsches Nutzen und zwar auf den symbolischen und den hedonistisch-sinnlichen Nutzen (Huber et al. 2008). Dieser wird durch die Konfigurierung der formalästhetischen Funktionen und Symbolfunktionen erzeugt.

Der Wert eines Produktes wird wiederum auf Basis des Nutzens des Produktes bewertet, setzt sich also aus dem funktionalen, dem symbolischen und dem hedonistisch-sinnlichen Nutzen zusammen, wobei der hedonistisch-sinnliche Nutzen häufig einen starken Einfluss hat (Huber et al. 2008).

Betrachtet man diesen komplexen Zusammenhang zwischen Produkt bzw. Produktmerkmalen und durch den Kunden wahrgenommenen Wert eines Produktes wird offensichtlich, wie umfangreich die Ermittlung des Werts eines Produktmerkmals ist. Darüber hinaus müssen zwei menschenbezogene Faktoren bei der Bewertung

beachtet werden: Zum einen nimmt man ein Objekt nicht als Summe von Teilen wahr, sondern als Ganzheiten (Steffen 2000). Bezogen auf die Gestalt eines Produktes bedeutet dies, dass diese nicht aus Elementen zusammengesetzt werden kann, sondern dass das Design als Ganzes beachtet werden muss. Zum anderen hat eine Entscheidung immer einen rationalen und einen emotional subjektiven Einfluss, kann also durch den Bewertenden nur schwer objektiv richtig beschrieben werden (Lehrer 2009).

Der Zusammenhang zwischen Produktmerkmalen und dem Wert des Produktes bzw. der Produktmerkmale ist also herstellbar, allerdings nicht über Regeln beschreibbar. Deshalb muss hier ein anderer Weg gefunden werden. Zur Bestimmung des wahrgenommenen Werts eines Produktes, kann dem Kunden aber ein ganzes Produkt präsentiert werden, für das er in der Lage ist, den wahrgenommenen Wert zu nennen bzw. zu schätzen. Der Vergleich mit Produkten, die der Kunde bereits kennt, ist auf diese Weise herstellbar und somit auch für ihn quantifizierbar. Hier sei darauf hingewiesen, dass es sich dabei auch um einen Prototypen handeln kann. Um einen Rückschluss auf den Wert eines Produktmerkmals zu ziehen, muss also eine Methode angewendet werden, die auf dem wahrgenommenen Wert des Gesamtprodukts basiert.

Es kann also gesagt werden, dass der Zusammenhang zwischen Produktmerkmalen und Wert aufgrund der Subjektivität der Kundenentscheidungen eine Unschärfe aufweist. Unter Umständen hat dieser Zusammenhang auch Lücken. Weiterhin sind die Produktmerkmale eine formalisierte Darstellung der Kundenanforderungen, die der Kunde nennt. Nagarajah hat für eine Aufgabenstellung mit ähnlichen Anforderungen nachgewiesen, dass Data Mining Methoden, insbesondere die Selbstorganisierenden Merkmalskarten (SOM), für solche Aufgaben ein gutes Hilfsmittel für einen Ingenieur sein können (Nagarajah 2011).

4.2 Unternehmensseite

Bei der Planung der Produktstruktur muss neben der Kundenseite aber auch die Unternehmensseite beachtet werden. Das Ziel des Unternehmens ist es, die vom Kunden gewünschten Produktmerkmale

mit möglichst wenig Aufwand zu erfüllen. Hierbei haben die Unternehmensrandbedingungen einen Einfluss auf die Produktstruktur: Hier seien Produktart, Unternehmensstrategie und in dem Unternehmen angewandte Technologien exemplarisch genannt (Schuh 2005).

Um eine wirtschaftliche Lösung zu erzeugen, müssen die gewünschten Produktmerkmale mit einer optimierten Produktstruktur erfüllt werden, die Freiheitsgrade dort zulässt, wo der Kunde sie wünscht und die verbleibenden Produktmerkmale möglichst durch standardisierte Produkt- und Prozessbausteine realisiert. Grundsätzlich gilt, dass Produktmerkmale durch Komponenten realisiert werden (Abbildung 2). Die Vielzahl an Komponenten, aus denen sich ein Produkt zusammensetzt, verursachen im Unternehmen Komplexität und somit auch Kosten. Soll nun die Produkte individuell sein, wird die Anzahl der Komponenten erhöht, somit auch die Komplexität. Ziel muss es also sein, mit einem Minimum an Komponentenvielfalt den Anteil des Marktes zu bedienen, der für das Unternehmen wirtschaftlich ist. Dies kann auch bedeuten, dass es kostengünstiger ist, mehrere Produktfamilien mit geringer Varianz anzubieten als eine Produktfamilie mit hoher Varianz. Welches die optimale Produktfamilienstrategie ist hängt unter anderem von den oben genannten Unternehmensrandbedingungen ab.

4.3 Data Mining Methoden

Wie oben erwähnt hat ein Unternehmen Vorwissen über das Produkt, für das es eine kundenindividualisierbare Produktfamilie entwickeln will, d. h. die grundsätzlichen Komponenten und Optionen des Produkts sind aus Vorgänger- und Konkurrenzprodukten bekannt. Die Fragestellung, die beantwortet werden soll, ist, inwiefern Funktionen integral bzw. differential realisiert werden sollen. Beispielsweise kann das Ergebnis einer Marktanalyse sein, dass die Gehäusefarbe bei einem Elektrogerät anpassbar sein muss, um eine große Kundengruppe zu bedienen. Während früher Gehäuse und tragende Struktur integral gestaltet und gefertigt wurden, wäre an dieser Stelle eine Differentialbauweise sinnvoll. Das Elektrogerät kann vollständig mit Standardkomponenten montiert werden (mit Ausnahme des Gehäuses). Als Kundenadaption kann mit geringem Prozessaufwand eine Gehäuseschale mit Farbe

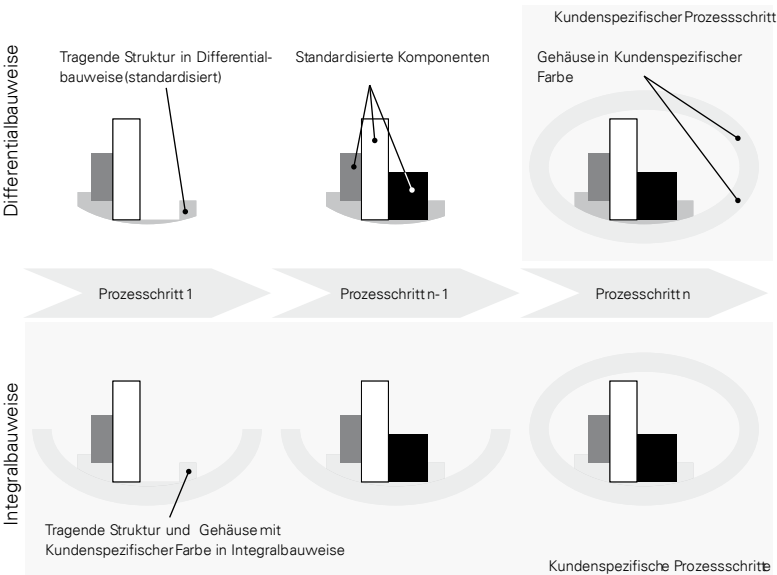


Abbildung 4: Einfluss der Integral-/Differentialbauweise auf den Produktionsprozess

entsprechend des Kundenwunschs montiert werden. Würde man an dieser Stelle weiterhin integral bauen, müsste das Elektrogerät über den gesamten Produktionsprozess als kundenspezifische Variante betrachtet werden und würde einen deutlich höheren Prozessaufwand verursachen (Abbildung 4). Soll nun die Aufgabe gelöst werden, die Produktstruktur zu finden, mit der die Kundenwünsche mit minimaler Komponentenvielfalt und minimalem Prozessaufwand realisiert werden können, ist der Ansatz die Kundenwünsche auf Ähnlichkeit zu untersuchen, also zu clustern, plausibel. Data Mining Methoden (DMM) sind in der Lage auch große Datenmengen zu verarbeiten und in diesen nicht-triviale Strukturen, Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu finden (Otte 2004).

Otte nennt verschiedene Verfahren zum Clustern von Daten (Otte 2004). Geeignet ist die Methode dann, wenn es möglich ist das Clustern der Produktmerkmale durch Prioritäten zu beeinflussen. Die Prioritäten sollen dabei sowohl die Kunden- als auch die Unternehmenssicht auf das Produktmerkmal widerspiegeln. Produktmerkmale, die für den Kunden wichtig sind, müssen mit einer höheren Priorität

berücksichtigt werden als Produktmerkmale, die eine untergeordnete Bedeutung haben. Genauso müssen auch die Unternehmensrandbedingungen berücksichtigt werden.

Um die Kundenwünsche zu ermitteln, müssen viele Kunden befragt werden: Dabei wird einerseits die Priorität der Produktmerkmale ermittelt. Andererseits haben diese die Möglichkeit sich ein Produkt zu konfigurieren. Dafür wird dem Kunden ein Prototyp mit adaptierbaren Produktmerkmalen präsentiert, den dieser dann nach seinen Wünschen anpassen kann. Dabei kann entweder mit realen oder virtuellen Prototypen gearbeitet werden. Bei letztgenannten besteht der Vorteil darin, dass Funktionen dargestellt werden können, ohne dass eine Detailgestaltung der Funktionsträger vorliegen muss. Nachteilig ist, dass bestimmte Produktmerkmale nur schwer vermittelbar sind, wie beispielsweise haptische Produktmerkmale. Die Ergebnisse der Kundenkonfiguration werden für den Analyseprozess mit DMM genutzt, um darauf basierend, die optimale Produktstruktur, ggfs. auch Produktstrukturen, für das endgültige Produkt mit optionalen und Komponenten zu gestalten (Abbildung 5).

Mit Hilfe der DMM (Abbildung 6) wird ein Vorschlag erarbeitet, der den Ingenieur bei der Erstellung der Produktstruktur unterstützt. Dafür werden die Datensätze auf Ähnlichkeit untersucht. Ähnliche Datensätze werden in einem Cluster zusammengefasst. In diesem Clustern sind viele Produktmerkmale identisch. Diese werden in der Produktstruktur als Standardkomponenten angelegt. Die Produktmerkmale, die auch innerhalb dieses Cluster variant sind, müssen mit optionalen Komponenten realisiert werden. Die Anzahl der gefundenen Cluster kann durch den Ingenieur beeinflusst werden. Die Anzahl der Produktfamilien wird so also auch variiert. Damit erhält der Ingenieur verschiedene Vorschläge für Produktfamilien.

Auf Basis dieses Vorschlages müssen dann verschiedene Wege der Realisierung mit einander verglichen werden. Es muss dann geprüft werden, ob es kostengünstiger ist mehr Bauteile (Differentialbauweise) und dafür einen geringeren Prozessaufwand zu haben oder ob es sinnvoller ist integral zu bauen, dafür aber einen größeren Prozessaufwand zu steuern. (Abbildung 6)

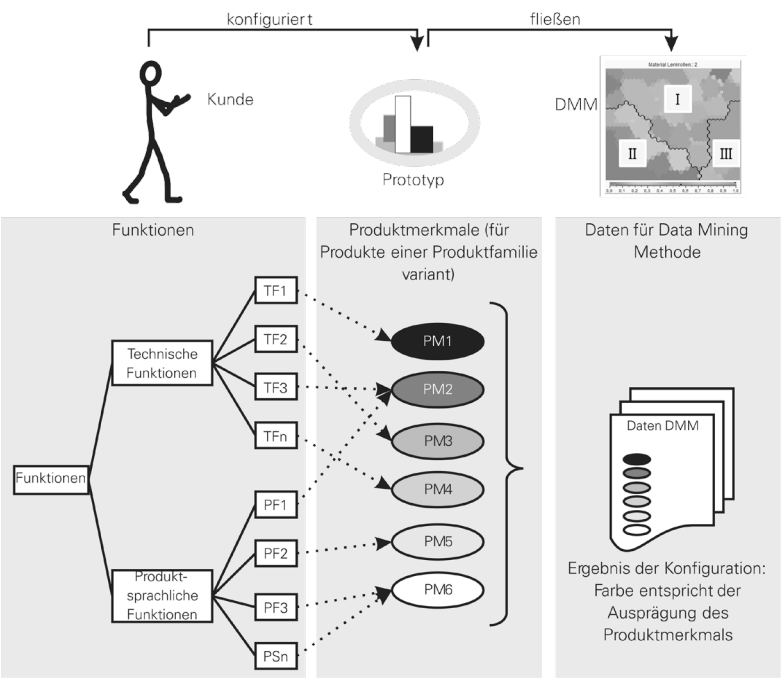


Abbildung 5: Datenermittlung durch Konfiguration als Grundlage der Analyse mittels Data Mining Methoden

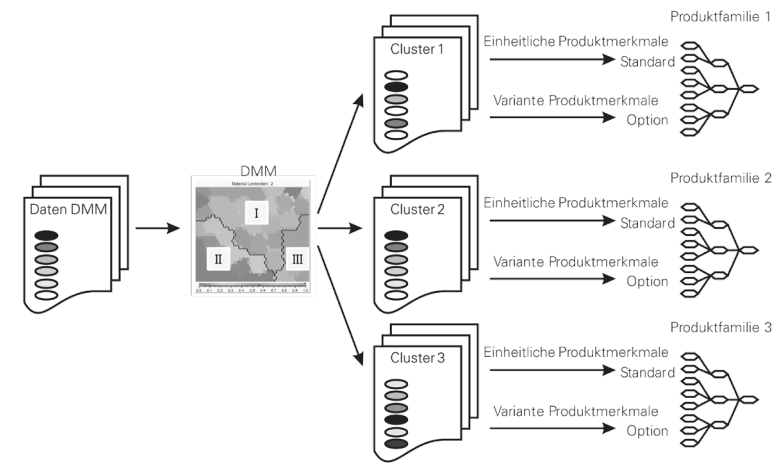


Abbildung 6: Anwendung der Data Mining Methode zum Clustern der Daten und Ableitung der optimierten Produktstruktur für die Produktfamilien

5 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz präsentiert, mit dem der Ingenieur in der Lage sein wird, kundenindividuelle Produkte besser planen zu können. Dafür sollen Kunden schon frühzeitig im Produktplanungsprozess mit realen oder virtuellen Prototypen konfrontiert werden, die durch den Kunden konfigurierbar sind. Hieraus wird dann ein Rückschluss auf die realen Kundenwünsche des endgültigen Produktes gezogen. Die aus diesem Vorgehen gewonnenen Daten werden dann mit DMM geclustert. Daraus können dann Hinweise für eine verbesserte Produktstruktur gewonnen werden. Die Produktstruktur sieht dort, wo es der Kunde wünscht, Optionen vor und ist gleichzeitig aus Kostensicht optimiert.

Um diesen Ansatz validieren zu können, ist es wichtig, dass die Prototypen dem Kunden möglichst realitätsnah präsentiert werden, da ein Kunde ein Produkt mit allen Sinnen wahrnimmt und alle sensorischen Erkenntnisse auch in seine Entscheidung einfließen. Bezogen auf die Produktmerkmale bedeutet dies, dass es untersucht werden muss, welche grundsätzlichen Typen von Produktmerkmalen existieren und wie diese möglichst realitätsnah dargestellt werden können.

Die unternehmensseitigen Randbedingungen sind unternehmensabhängig, so dass hier eine Methode gefunden werden muss, mit der unternehmensbezogene Kennzahlen in Prioritäten für die DMM überführt werden können.

Literaturverzeichnis

- Baumberger, G. C. 2007: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. München: Verl. Dr. Hut
- Brezing, A. 2006: Planung innovativer Produkte unter Nutzung von Design- und Ingenieurdienstleistungen. Aachen Shaker
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A. & Lindemann, U., 2007: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Berlin: Springer
- Ehrlenspiel, K. 2009: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München: Hanser

- Fraunhofer Institut ISI 1998: Delphi '98: Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik, Zusammenfassung der Ergebnisse. Karlsruhe: ISI Press
- Huber, F., Matthes, I., Vogel, J. & Schehl, C. 2008: Produkte nach Mass von der Stange: Idee und Erfolgspotential des Mass Customization. Mainz: Center of Market Oriented Product and Production Management
- Lehrer, J 2009: Wie wir entscheiden, Das erfolgreiche Zusammenspiel von Kopf und Bauch. München: Piper
- Leica Camera AG 2012: Leica à la carte: Unikate in Handarbeit.
http://de.leica-camera.com/photography/m_system/leica_a_la_carte,
abgerufen am 09.01.2012
- Lindemann, U., Reichwald, R. & Zäh, M. F. 2006: Individualisierte Produkte-Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer
- Loewe AG 2012: Sie entscheiden, wie Sie gestalten: Entdecken Sie die Design-Vielfalt von Loewe Individual. <http://www.loewe.tv/de/produkte/individual/individualisierung.html> abgerufen am 09.01.2012
- Nagarajah, A. 2011: Selbstorganisierende Merkmalskarten für eine anforderungsbasierte Produktvariantenauswahl. Aachen: Shaker
- Otte, R. 2004: Data Mining für die industrielle Praxis. München, Hanser
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. 2007: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Berlin: Springer
- Piller, F. 2006: Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl
- Piller, F. 2012: Frank Piller's Web Site on Mass Customization, Customer Co-Creation & Open Innovation.
URL: <http://www.mass-customization.de>, abgerufen am 09.01.2012
- Piller, F. & Stotko, C. M. 2003: Mass Customization und Kundenintegration, Neue Wege zum innovativen Produkt. Düsseldorf: Symposium
- Pine II, B. J. 1993: Mass customization: The new frontier in business competition. Boston: Harvard Business School Press
- Ponn, J., Baumberger, C. G. & Lindemann, U. 2004: Guidelines for the Development of individualized products. In: Marjanovic, D. (Hrsg.): Proceedings of the 8th international design conference, 465-470, Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
- Salvador, F. & Rungtusanatham, M. 2010: From Masse Production to Mass Customization: Hindrance Factors, Structural Inertia and Transition Hazard. In: Piller, F & Tseng, M: Handbook of research in mass customization and personalization, 21-43, New Jersey: World Scientific

- Schaller, C., Stotko, C. & Piller, F. 2004: Mit Mass Customization basiertem CRM zu loyalen Kundenbeziehungen. In: Hippner, H. & Wilde, K. (Hrsg.): Grundlagen des CRM: Konzepte und Gestaltung, 67-90, Wiesbaden: Gabler
- Schuh, G. 2005: Produktkomplexität managen, Strategien – Methoden – Tools. München: Hanser
- Steffen, D. 2000: Design als Produktsprache, Der „Offenbacher Ansatz“ in Theorie und Praxis. Frankfurt: Verlag Form
- Weinbrenner, V. 1993: Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen. München: Hanser

Kontakt

Dipl.-Ing. Sebastian Schubert
 Dipl.-Ing. Jan Erik Heller
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen
 RWTH Aachen University
 Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik
 des Maschinenbaus
 Steinbachstraße 54B
 52074 Aachen
www.ikt.rwth-aachen.de

Rolf Klamann

Mobility 2.0 — Driving assistance simulation for Zero accidents and Electromobility

Introduction

Continental as a global player in the Automotive Supplier Industry provide our customers with innovations for individual mobility. The Hype of hybrid electrical vehicles is in our near-future-focus as well as our competence in the area of driver assistance systems, electronic brake systems and infotainment systems. The significant reduction of CO₂ emissions enables us a lead position in tyre technology and on the other hand in engine and transmission management.



figure 1: hybrid electrical vehicles hype

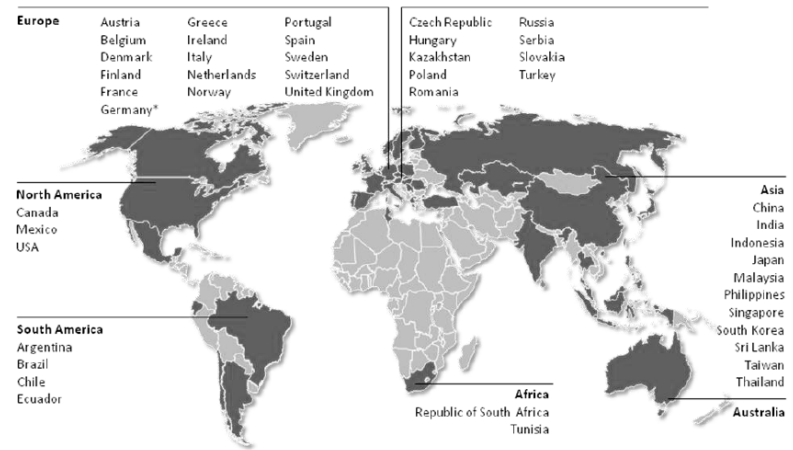


figure 7: Continental worldwide



figure 2 (mitte): for safe mobility
figure 3 (unten): for clean power

On the safety-component-side we prepare the future technology for Zero accident risk by our driver assistance solutions like Adaptive Cruise Control or Car-to-Car Communication for autonomous driving.

With Continental's five powerful divisions Chassis & Safety, Powertrain, Interior, Tires and ContiTech we are in a very good position for the future innovative trends in the individual mobility challenge. Continental is present in all regions in the world with 269 locations for production and R & D. More than 160.000 employees guarantee the innovation power of Continental and the quality of our products whereas Continental owns up to its corporate social responsibility.

| Chassis & Safety | Powertrain | Interior | Tires | ContiTech |
|---|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Electronic Brake System | Engine Systems | Instrumentation & Driver HMI | PLT, Original Equipment | Air Spring Systems |
| Hydraulic Brake System | Transmission | Infotainment & Connectivity | PLT, Repl. Business, EMEA | Benecke-Kaliko Group |
| Passive Safety & Sensors | Hybrid Electric Vehicle | Body & Security | PLT, Repl. Business, The Americas | Conveyor Belt Group |
| Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) | Sensors & Actuators | Commercial Vehicles & Aftermarket | PLT, Repl. Business, Asia Pacific | Elastomer Coatings |
| Chassis Components | Fuel Supply | | Commercial Vehicle Tires | Fluid Technology |
| | | | Two Wheel Tires | Power Transmission Group |
| | | | | Vibration Control |
| | | | | Other Operations |

figure 2: Continental divisions



figure 5 (oben): for intelligent driving
figure 6 (mitte): for global mobility

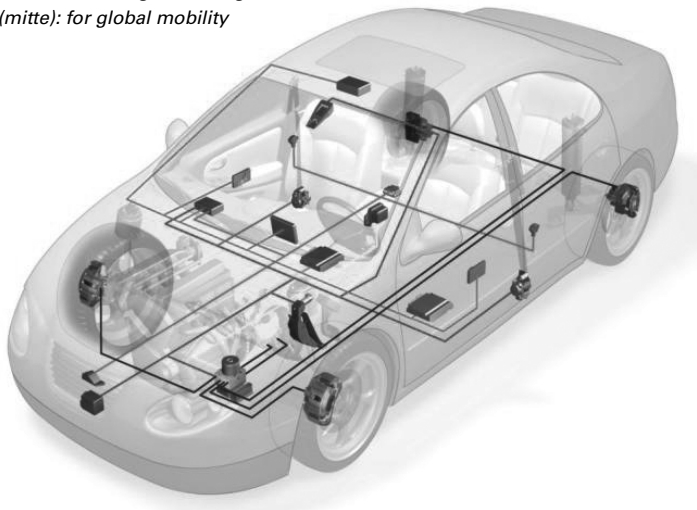


Abbildung 7: digital prototype

Mobility 2.0 - Requirements for Smart Systems Engineering

In the last 20 years the number of physical prototypes has been reduced significantly. This has been realized by introduction of simulation tool chains in Mechanical, Mechatronic, Electronic and Software. Rapid Prototyping technologies with NC-technology and Stereolithography using 3D-plotters have support these processes in the product development phase.

All these disciplines were handled separately up to the final product release. The Management of globalization is one of the biggest challenges we have to solve. To bring all disciplines together especially in the early concept phase of a new product is the issue of the next few years. The target is to come from an Assembly Co-Simulation to the simulation of the complete car. This has to be handled from Mechanical FEM analysis over ECAE IC-design, Thermal analysis, Energy Management, crash simulation etc.

The way from physical to a digital prototype needs a lot of changes in the mind of the engineers and also in the development process. Therefore the software vendors who deliver simulation tool chains must offer open modular solutions with an intelligent license model for flexible using depending on the different economical situation in the Automotive Industry.

Initiatives like ›PLM Openness‹ guided by PROSTEP iVIP accompany these necessary changes for a global and economical car development in the future.

Modularization is another important aspect for collaborated simulation without interface barriers. Intelligent Motormanagement e.g. must be combined virtually with ESP functionality, wheel sensors, electric power steering and electronic chassis control.

The Digital Prototype is a very important part for the success of the Automotive Industry in the worldwide competition.

Contact

Dipl.-Ing. Rolf Klamann
 Continental Teves AG & Co. oHG
 Guerickestrasse 7
 60488 Frankfurt
 (+49) 69 7603 2538
 Rolf.Klamann@Continental-Corporation.com

Janna Hahn, Michael Hazelaar & Karl-Heinrich Grote

Unterstützung der eigenschaftsbasierten Fahrzeugkonzeption in der frühen Konzeptphase

1 Einleitung

In den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Automobilhersteller werden in sehr früher Phase unterschiedlichste Fahrzeugkonzepte erstellt. Diese reichen von Abwandlungen gegenwärtiger Serienfahrzeuge (Derivate, Nachfolgemodell) bis hin zu gänzlich neuartigen, unkonventionellen Fahrzeugkonzepten. Die Entwicklung eines neuen Fahrzeugkonzeptes stellt dabei eine ganzheitliche Aufgabe dar, die unter Einbeziehung der verschiedensten Fachbereiche und Anforderungen zu bewältigen ist (Gusig & Kruse 2010, Braess & Seiffert 2007).

Die in der frühen Konzeptphase getroffenen Entscheidungen haben große Auswirkungen auf das Fahrzeugkonzept und die Detaillierung in späteren Phasen. Heute wird bei der Konzepterstellung noch überwiegend manuell vorgegangen, Iterationsschleifen zur Abstimmung und Anpassung der Konzepte sind daher notwendig und unvermeidbar (Prinz 2011, Seiffert & Rainer 2008). Aufgrund der kürzer werdenden Entwicklungszeiten sind vor allem Forschungs- und Entwicklungsabteilungen gezwungen, Ideen und Konzepte schnell zu entwickeln und umzusetzen. Die Schwierigkeit hierbei besteht in den relativ geringen Informationen, die zu Beginn einer Fahrzeugkonzeptentwicklung gegeben sind. In der frühen Phase der Konzeptentwicklung arbeiten primär kleine Teams an der Grobauslegung des Fahrzeuges, daher werden Fahrzeugabmessun-

gen und Fahrzeugeigenschaften hier lediglich richtungsweisend festgelegt. Im Laufe des Konzeptionsprozesses werden darum die Fachbereiche mit ihrem speziellen Fachwissen hinzugezogen und das Fahrzeugkonzept verfeinert. Ebenso unterliegt die komplette Konzeptentwicklung noch weiteren Unsicherheiten, technische und optische (Design) Anpassungen des Grundkonzeptes während der Ausarbeitungsphase sind keine Seltenheit.

Zur Unterstützung der Konzeptarbeit in der frühen Phase wird zumeist mit CAD-basierten Programmen gearbeitet. Diese Tools decken z. B. Bereiche der Bauraum-Optimierung (Kuchenbuch et al. 2011) und der parametrischen Veränderung von Grundkonzepten (Rossbacher 2011) ab. Durch ihren vergleichsweise hohen Detaillierungsgrad benötigen sie jedoch für Aufbau und Auswertung eines entsprechenden Modells zahlreiche Informationen über Anforderungen hinsichtlich Fahrzeuggeometrie und -eigenschaften.

Es ist daher wünschenswert, bereits vor einem Einsatz derartiger Werkzeuge über eine erste weniger detaillierte Liste mit Anforderungen und Fahrzeuginformationen zu verfügen. Mit Hilfe bereits plausibilisierter Fahrzeugeigenschaften soll es möglich sein, innerhalb kurzer Zeit ein stringentes Grobkonzept zu erstellen, welches als Grundlage für die weitere Konzeptarbeit sowie als Vorlage zur genaueren Abstimmung mit den Fachbereichen und Entscheidungsträgern dienen soll.

2 Problemstellung

Zur Erstellung eines Fahrzeugkonzeptes wird ein vollständiger Satz konsistenter Anforderungen benötigt. Diese Anforderungen liegen dem Konzept-Team zu einem frühen Zeitpunkt lediglich als grobe Vision des zu erstellenden Konzeptes vor und sind noch nicht als vollständig beschriebene Fahrzeugeigenschaften gegeben (Braess & Seiffert 2007). Nicht nur die Qualität der Anforderungen, also wie technisch eindeutig Fahrzeugeigenschaften formuliert sind, spielt eine Rolle. Ebenso ist die Menge an vorhandenen Werten, die das Fahrzeugkonzept beschreiben, ausschlaggebend für die Plausibilität eines Konzeptes (Heinke 1994).

2.1 Kundenanforderungen

Zur Entwicklung von Forschungsfahrzeugen können Kundenwünsche als erste Orientierung hinsichtlich der Anforderungen an ein Konzept dienlich sein. Mittels Kundenklinken lassen sich zu entwickelnde Fahrzeugkonzepte hinsichtlich ihrer Ausrichtungsziele (z.B. Ergonomie, Technik) abgleichen (Gusig & Kruse 2010). Je konkreter die Fragestellung an den Kunden gerichtet ist, desto eindeutigere Antworten im Hinblick auf die Akzeptanz eines Konzeptes sind zu erwarten.

Bei freien Meinungsäußerungen zu neuen Konzepten bzw. zum Aussehen und den Eigenschaften zukünftiger Fahrzeugkonzepte sind die Aussagen der befragten Käufer häufig ungenau formuliert oder unterschiedlich interpretierbar. Keine Seltenheit stellen hier Gefühlsäußerung (Wohlgefühl), Nutzungsszenarien oder Vergleiche zu vorhandenen Fahrzeugmodellen (so wie, besser als) dar. Aus diesen zumeist unscharfen Anforderungen müssen für die weitere Konzeptarbeit technische Werte abgeleitet werden (Ziemann 2007).

Fahrzeugkonzepte in der Forschung werden ebenso für interne Kunden entwickelt. Trotz des zumeist technischen Hintergrundes dieser internen Kunden, können sich die geäußerten Anforderungen stark in ihrer technischen Konkretheit unterscheiden. Ist beispielsweise das Ziel, ein Pendlerfahrzeug zu entwickeln, können Anforderungen folgendermaßen aussehen: Fahrt alleine zur Arbeit, Autobahntauglichkeit und Zurücklegen einer festgelegten Strecke über Landstraße. Allein mit diesen Angaben lässt sich jedoch noch kein umfassendes Konzept entwickeln.

2.2 Konzeptentstehung und -eingrenzung von Forschungsfahrzeugen

Die zu Beginn der Entwicklung eines Fahrzeuges essentiell notwendigen Vorgaben lassen sich auf Hauptabmessungen, Packagedaten, Fahrleistungen, Raumbedarf für Insassen und Ladegut sowie weitere Fahrzeugcharakteristika beschränken (Braess & Seiffert 2007). Der technische Detaillierungsgrad dieser Fahrzeugparameter ist abhängig von der Art des zu entwickelnden Fahrzeuges (Neu-Konzept, Nachfolgemodell) und von der zeitlichen Einordnung in den Produktentstehungsprozess (frühe Konzeptphase, Serienentwicklung).

Bei der Entwicklung eines Nachfolgemodells kann überwiegend auf vorhandene Packagedaten und Fahrzeugeigenschaften des Vorgängermodells zurückgegriffen werden, die einer Anpassung entsprechend der Ausrichtung des neuen Fahrzeuges bedürfen (Ziemann 2007). Ein Grobkonzept des zukünftigen Fahrzeuges ist somit bereits vorhanden.

Zu Beginn der Konzeptentwicklung eines komplett neuen Fahrzeugkonzeptes sind vielfach lediglich einzelne Kundenanforderungen (siehe Kapitel 2.1) gegeben, die als Grundlage für die Ausarbeitung erster Konzeptideen dienen. Im Zuge der anschließenden Abstimmprozesse mit den Fachabteilungen kommen weitere Anforderungen (bspw. Bauraum-, Ergonomievorgaben und -restriktionen) hinzu, so dass das Fahrzeugkonzept kontinuierlich detaillierter beschrieben wird. Abbildung 1 zeigt, wie mit Hilfe konzeptbestimmender Anforderungen die anfängliche Ideenvielfalt sukzessiv eingegrenzt wird. Durch dieses iterative Vorgehen wird die Variantenzahl soweit reduziert, dass idealerweise ein grob validiertes Fahrzeugkonzept verbleibt.

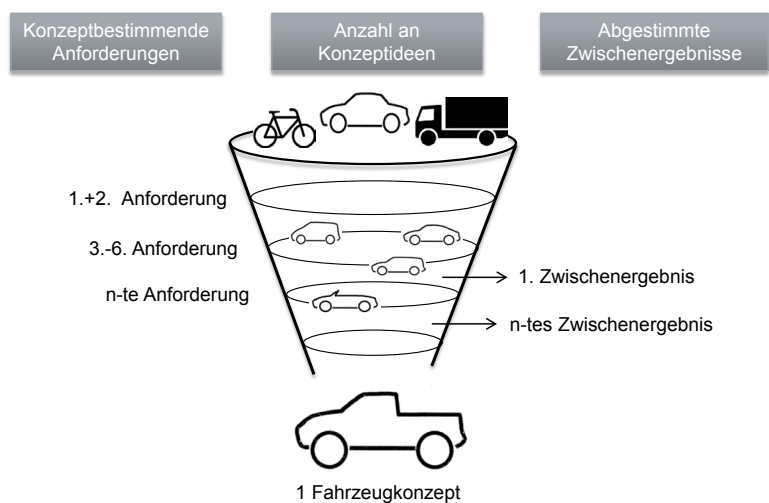


Abbildung 1: Konzepteingrenzung mittels Anforderungen

Aufgrund der überwiegend manuellen und iterativen Vorgehensweise bei der Konzeptentwicklung ist es sinnvoll, lediglich eine geringe Anzahl bzw. ein einziges abgestimmtes Fahrzeugkonzept im Rahmen eines Projektes weiter zu verfolgen (Prinz 2011). Die Definition von Randbedingungen im Sinne einer festgelegten Anforderungsliste mit einer genau bestimmten Anzahl benötigter Fahrzeugeigenschaften würde eine Unterstützung für die Konzeptarbeit in der Fahrzeugforschung darstellen. So könnten Fahrzeugkonzepte schon früh im Entwicklungsprozess schneller und konsistenter erstellt sowie plausibilisiert werden (Heinke 1994).

3 Konzeptbestimmender Anforderungskatalog

Das Ziel einer Anforderungsliste ist die möglichst präzise Darstellung eines Produktes hinsichtlich seiner Funktionalität und Leistungsfähigkeit, wobei ihr Inhalt bestenfalls durch konkrete Zahlenwerte belegt ist (Pahl et al. 2007). Da aber, wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, bei der Fahrzeugkonzeption nicht alle Anforderungen von Beginn an zur Verfügung stehen, stellt sich die Frage, wie der Fahrzeug-Anforderungskatalog dennoch hinreichend mit Fahrzeugeigenschaften zu belegen ist.

In Abbildung 2 sind mehrere Möglichkeiten dargestellt, wie die noch fehlenden Fahrzeugeigenschaften des Anforderungskataloges bestimmt werden können:

- Konkrete Werte aus Datenbanken beziehen,
- Erfahrungswerte aus vorangegangenen Projekten verwenden,
- Parameterbeziehungen aus physikalischen und technischen Beziehungen nutzen.

Als Beispiel soll ein Breitenmobilitätsfahrzeug mit Elektroantrieb entwickelt werden. Primäre Projektziele sind im Beispielauszug des Anforderungskataloges dargestellt, siehe Abbildung 2. Durch die Angabe der Sitzplatzanordnung von je zwei Insassen pro Sitzreihe können durch das Hinzuziehen weiterer notwendiger Anforderungen, hier bspw. Platzbedarf pro Sitz und Ergonomiedaten, mögliche Bereiche für die Fahrzeuglänge und die Fahrzeugbreite festgelegt werden.

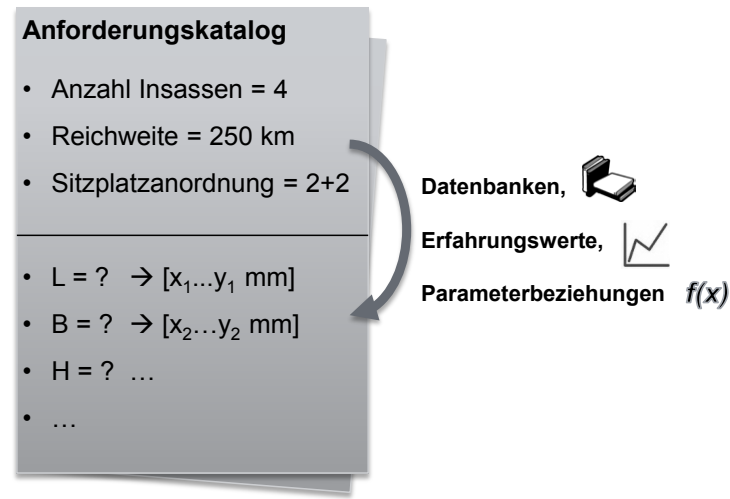


Abbildung 2: Beispielauszug aus dem Fahrzeug-Anforderungskatalog

Der in seinem Umfang definierte Fahrzeug-Anforderungskatalog besteht sowohl aus konkreten Zahlenwerten (bspw. Höchstgeschwindigkeit, Reichweite), als auch aus klaren Angaben (bspw. Sitzplatzanordnung) und Intervallen mit Ober- und Untergrenze (x_n , y_n) für die jeweilige Fahrzeugeigenschaft.

Nachfolgend soll bewusst anhand eines einfachen und gängigen Parameterbeziehungsnetzwerkes beispielhaft gezeigt werden, wie sich weitere Fahrzeugeigenschaften durch die Vorgabe weniger Anforderungen ermitteln lassen. Zudem existieren unscharfe Fahrzeugeigenschaften (bspw. Sitz-, Klimakomfort), deren Beziehungsnetzwerk sich aufgrund ihrer verbalen Beschreibungen komplexer gestaltet. Parameterbeziehungen stellen ein mögliches Vorgehen der ganzheitlichen Methodik zum Aufbau des Anforderungskataloges dar.

Wie bereits erwähnt, werden in der frühen Konzeptphase zur Beschreibung von Fahrzeugeigenschaften eines neuen Konzeptes häufig Vergleiche zu vorhandenen Fahrzeugen gezogen. In diesem Beispiel lautet eine Anforderung für ein Breitenmobilitätskonzept, dass eine Höchstgeschwindigkeit vergleichbar mit dem Volkswagen Golf (mit mittlerer Motorisierung) erreicht werden soll. Für

diese Vorgabe kann aus Datenbanken ein Referenzwert bzw. ein Referenzbereich ausgewählt werden, der mit vgl. Golf = 170–220 km/h angenommen wird. Mit Hilfe von Parameterbeziehungen wird mit dieser Information etwa aus einem Diagramm die Beschleunigung a von 0–100 km/h ermittelt, siehe Abbildung 3. Das Diagramm beinhaltet die entsprechenden Werte aller auf dem Markt vorhandenen Fahrzeuge mit unterschiedlichen Motorisierungsvarianten. Über eine Trendlinie und entsprechende Trendbereiche kann eine Tendenz abgelesen und gemäß der Anforderung an die Höchstgeschwindigkeit weiter eingegrenzt werden. Unter Berücksichtigung technologischer und wirtschaftlicher Beschränkungen sind für die Beschleunigung von 0–100 km/h Werte von acht bis 16 Sekunden denkbar. Dieser angenommene Wertebereich kann sich mittels projektinterner Abstimmrunden und präziser werdender Anforderungen an das Fahrzeugkonzept reduzieren.

Mit dem aus Abbildung 3 resultierenden Beschleunigungsbereich $a_{res} = 8\text{--}16 \text{ s}$ von 0–100 km/h ist es möglich, über eine weitere Parameterbeziehung beispielsweise die benötigte Leistung P zu ermitteln. Das Vorgehen erfolgt analog zu der oben dargestellten Vorgehensweise, mit dem Unterschied, dass nun der ermittelte Beschleunigungsbereich a_{res} als Eingangsgröße in das Diagramm einfließt. In Abbildung 4 wird deutlich, dass auch hier eine technologische bzw. wirtschaftliche Beschränkung erfolgen muss, um den Wertebereich realisierbar zu halten. Es ergeben sich Leistungen P_{res} von 40 bis 200 kW.

Der Wertebereich für die ermittelte Leistung hat einen beträchtlichen Umfang, der lediglich Extremwerte ausschließt. Eine Fahrzeugeigenschaft mit einer so erheblichen Wertspanne ist kaum hilfreich für die Präzisierung des Konzeptes, daher gibt es hier mehrere Möglichkeiten zur weiteren Vorgehensweise. Zum einen kann unter Angabe der Antriebsart mittels einer Liste verfügbarer Motoren das Leistungsfeld eingegrenzt werden. Zum anderen kann eine Bestimmung bzw. Eingrenzung der Motorleistung ggf. mittels anderer Parameter aus dem Anforderungskatalog präziser erfolgen, d. h. weitere Parameterbeziehungen (bspw. Masseabhängigkeiten) müssen zur Lösungsermittlung herangezogen werden.

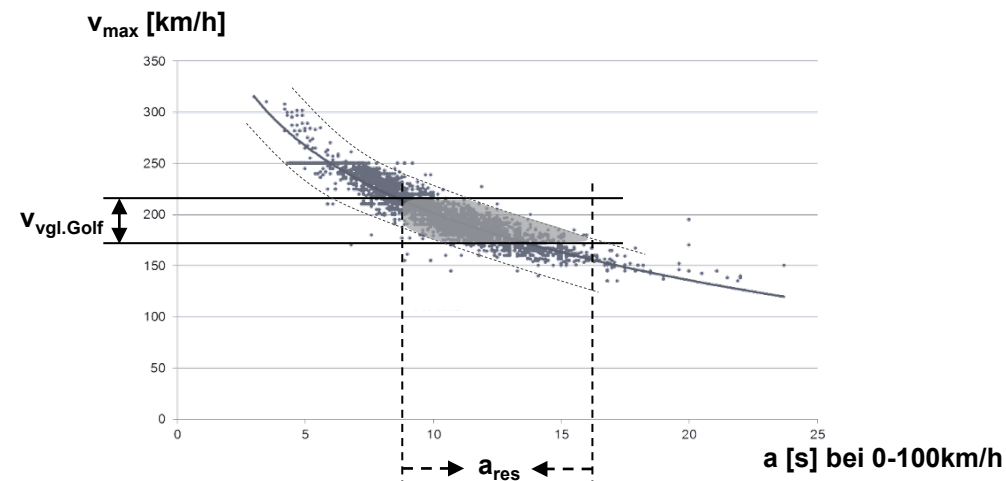


Abbildung 3: Parameterbeziehung von Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigung

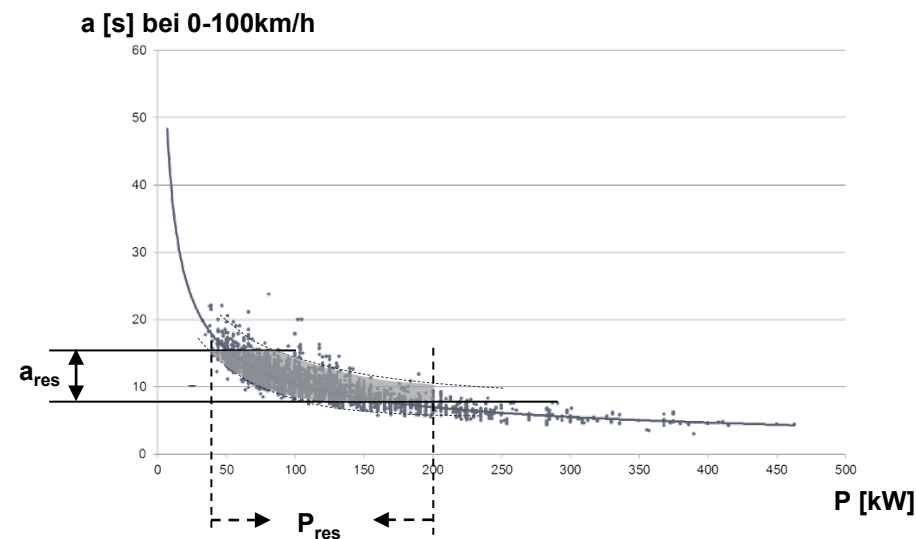


Abbildung 4: Parameterbeziehung von Beschleunigung und Leistung

Häufig existieren mehrere Herangehensweisen/Alternativen zur Aufstellung von Parameterbeziehungen (Formeln, Diagramme, Maßketten), die abhängig von den gegebenen Anforderungen zur Bestimmung und Ableitung von Fahrzeugeigenschaften verwendet werden. Referenzwerte erlauben zumeist die Zuordnung eines eindeutigen Zahlenwertes zu einer Fahrzeugeigenschaft. Wird mit einem Wertebereich oder -intervall gearbeitet, ist es unerlässlich, während der Vervollständigung des Anforderungskataloges diese Schätzungen durch Entscheidungen seitens des Konstrukteurs oder des Projektteams einzugrenzen, da sonst Fahrzeugeigenschaften überbestimmt sind und Zielkonflikte das Konzept inkonsistent werden lassen (Ziemann 2007).

Um den Anforderungskatalog methodisch zu vervollständigen, ist ein ganzheitliches Konstrukt aus Graphen-, Parameterbeziehungen und Referenzwerten notwendig. Die Vorgehensweise innerhalb dieses Netzwerkes, siehe Abbildung 5, ändert sich entsprechend der gegebenen Anforderungen (konkreter Zahlenwert, Intervall) und der dementsprechend verbleibenden Fahrzeugeigenschaften, die mittels der genannten Methoden abgeleitet werden müssen.

4 Zusammenfassung

In der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung liegen Anforderungen an ein zukünftiges Konzept häufig in sehr geringem Umfang und Detaillierungsgrad vor. Ziel ist ein möglichst frühzeitig plausibilisiertes Grobkonzept.

Die konzeptbestimmenden Fahrzeugeigenschaften sollen in einem grob definierten Anforderungskatalog gelistet sein, um Konzepte leichter vergleichbar und bewertbar zu machen. Fehlende Fahrzeugeigenschaften für den Anforderungskatalog können mit Hilfe von Parameterzusammenhängen, Referenzwerten aus Datenbanken sowie Erfahrungswerten vorangegangener Projekte ermittelt werden. Zu beachten ist, dass der Prozess zur Komplettierung des Anforderungskataloges auch stetige Entscheidungen des Konstrukteurs bzw. des Projektteams hinsichtlich der Eindeutigkeit von Fahrzeugeigenschaften beinhaltet, daher ist die Konkretisierung von

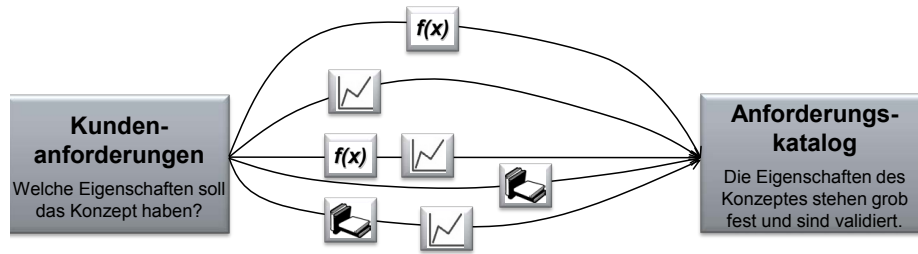


Abbildung 5: Beziehungsnetzwerk der Methodik

Wertebereichen dringend erforderlich. Eine konsequente Kontrolle und Präzisierung des Anforderungskataloges während der gesamten Konzeptentwicklung ist notwendig und unerlässlich, um ein stringentes Fahrzeugkonzept zu erhalten.

Der Fahrzeug-Anforderungskatalog kann als Einstiegswerkzeug zur Darstellung eines Grobkonzeptes für CAD-basierte Tools dienen und somit Bestandteil einer durchgängigen Toolkette zur Konzeptentwicklung sein. Ebenso dient er als Entscheidungsunterstützung während der Konzeptarbeit und als Vorlage für Entscheidungsträger.

Literaturverzeichnis

- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (Hrsg.) 2007: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Gusig, L.-O. & Kruse, A. (Hrsg.) 2010: Fahrzeugentwicklung im Automobilbau, Aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz. München: Hanser.
- Heinke, O. 1994: Fahrzeugauslegung mit Hilfe von Eigenschaftsparametern – Möglichkeit oder Utopie?. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Kuchenbuch, K., Vietor, T. & Stieg, J. 2011: Optimierungsalgorithmen für den Entwurf von Elektrofahrzeugen. In: ATZ, 113 (07–08), 548–551
- Prinz, A. 2011: Die Entwicklung einer Struktur und eines Ablaufmodells für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten. Berlin: Logos-Verlag.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. 2007: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Roszbacher, P. 2011: Geometric and functional concept development by use of integrated parameterization methods. 6. CAD-Kolloquium Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 03.11.2011
- Seiffert, U. & Rainer, G. (Hrsg.) 2008: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Ziemann, A. 2007: Zielsystemmanagement für die Produktentstehung von PKW. Norderstedt: Books on Demand GmbH.

Kontakt

Dipl.-Ing. Janna Hahn
Dr.-Ing. Michael Hazelaar
Volkswagen AG
Brieffach 1777
38436 Wolfsburg
www.volkswagen.de

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote
Otto-von-Guerike-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion,
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
39106 Magdeburg
<http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/>

Entwerfen und Entwickeln mit Systems Engineering auf Basis des RFLP-Ansatzes in V6

1 Einleitung

Der Begriff Systems Engineering taucht in letzter Zeit verstärkt in Verbindung mit der Entwicklung, dem Testen und Validieren von technischen Systemen auf (Alt 2012, Sendler 2012, Stark 2012). Die Gesellschaft für Systems Engineering GfSE beschreibt Systems Engineering als eine umfassende Ingenieurtätigkeit, die zur Entwicklung komplexer Produkte notwendig ist (GfSE 2012). Neben den klassischen Anwendungsgebieten, der Luft- und Raumfahrt, gewinnt diese Methodik auch in weiteren Bereichen, wie z.B. der Automobilbranche oder der Medizintechnik, immer mehr an Bedeutung. In diesem Zusammenhang dient Systems Engineering als Leitlinie zum Lösen komplexer Problemstellungen auf Systemebene. Dieses Vorgehensmodell beinhaltet Methoden, Verfahren und Hilfsmittel um technisch komplexe Systeme, beginnend bei der Anforderungsdefinition und der Systemanalyse über die physikalische Entwicklung bis hin zur Systemintegration, zu entwickeln und zu realisieren. Schwerpunkt der Methodik des Systems Engineering ist der Problemlösungsprozess der aus den zwei Komponenten Systemgestaltung und Projektmanagement besteht und als Grundlage ein Systemdenken voraussetzt. Dabei ist das Hierarchisierungsprinzip bzw. das Vorgehen »Vom Groben zum Detail« ebenso Grundlage wie das Verwenden und Bilden von Modellen als Strukturierungshilfe (Daenzer & Huber 1997). Durch das modellhafte Abstrahieren von

komplexen Systemen lassen sich diese oft in Teilsystemen zerlegen und die Minimierung der Komplexität des Realen darstellen (Cellier 1991). Aus dieser Entwicklung heraus hat sich der Ansatz des Systemgedankens in das Zentrum der Produktentwicklung gedrängt mit der Absicht, innovative und global wettbewerbsfähige Produkte bei vollster Umsetzung der Kundenanforderungen zu produzieren (Janschek 2010). Insbesondere durch die Vielzahl an Disziplinen wie Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software in heutigen innovativen Produkten wird die Beherrschung des Systems Engineering zunehmend zu einem echten Wettbewerbsvorteil für entwickelnde und produzierende Unternehmen. So ist beispielsweise eine konkurrenzfähige Entwicklung mechatronischer Produkte ohne die Einführung einer Systems Engineering Methode und der modellbasierten Entwicklung nur schwer erfolgreich umsetzbar. Die VDI-Richtlinie 2206 hat sich deshalb an die Methodik des Systems Engineering angelehnt mit dem Ziel, eine methodische Unterstützung für die domänenübergreifende Entwicklung mechatronischer Systeme zu gewährleisten und eine durchgängige Entwicklungsumgebung für mechatronische Systeme vorzuschlagen (VDI 2206).

2 Der RFLP-Ansatz

Für den Entwurf und die Entwicklung komplexer multidisziplinärer Produkte ist es entscheidend, die Vielzahl von Kundenanforderungen, Systemfunktionen und Wirkprinzipien unterschiedlicher Disziplinen in einem gemeinsamen Produktmodell zu beschreiben und integriert zu behandeln. Für die virtuelle Produktentwicklung stehen für die verschiedenen Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik/Elektronik und Informatik spezifische Methoden und CAx-Systeme zur Verfügung, die in der Regel nur in bestimmten Phasen des Produktentstehungszyklus (z. B. Entwurf und Konstruktion, Berechnung und Simulation) zum Einsatz kommen. Für eine ganzheitliche Betrachtung und durchgängige Systemunterstützung sind deshalb föderative oder integrierte Entwicklungsumgebungen notwendig (Kleiner 2003).

2.1 Vorgehensmodell Systems Engineering

Systems Engineering in der mechatronischen Produktentwicklung teilt sich in die drei Hauptphasen Systemanalyse, physikalische Entwicklung und Systemintegration auf. In der Systemanalyse wird das zu entwickelnde Produkt durch die Schritte Anforderungsdefinition, Funktionsanalyse, Entwurf logische Architektur und Komponentenspezifikation theoretisch beschrieben und durch die dabei entstehenden Produktmodelle spezifiziert. Wohin gegen die physikalische Entwicklung in der Erstellung von Produktentwicklungsdaten (u. a. 3D-CAD-Modelle, Verhaltensmodelle) resultiert. Im Rahmen der Systemintegration werden die entwickelten Komponenten simuliert und getestet, in das System integriert und unter ständiger Verifikation und Validierung einer Prüfung unterzogen. Abbildung 1 illustriert diese Vorgehensweise mit Hilfe des sogenannten V-Modells.

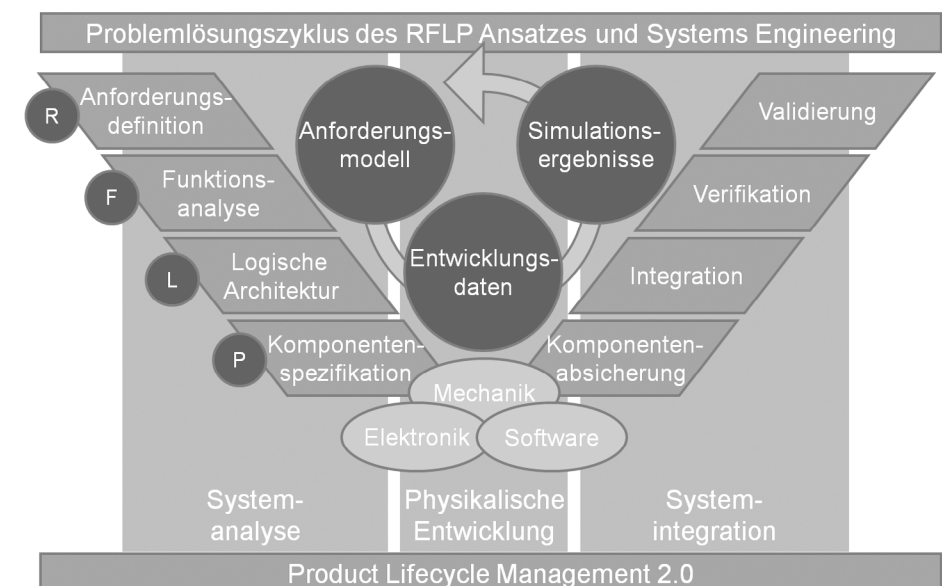


Abbildung 1: Vorgehensmodell zum Systems Engineering

2.2 Allgemeine Beschreibung des RFLP-Ansatz

Bisherige IT-Systeme für den Produktentwicklungsprozess konnten die Methoden des Systems Engineering und die Systems-Engineering-Daten, wie z.B. auch im Standard ISO 10303 AP 233 »Systems Engineering« beschrieben, nur bedingt unterstützen, da ein föderatives oder integriertes Informationsmodell über die Produktentwicklungsphasen und Disziplinen fehlte und eine Vielzahl von IT-Werkzeugen im Einsatz sind, die auf Anwendungen in bestimmten Bereichen ausgerichtet sind und daher nur unzureichend integrierbar sind (Kleiner 2003). Mit Hilfe des sogenannten RFLP-Ansatzes zur Entwicklung mechatronischer Produkte könnte nun erstmals die geforderte ganzheitliche Unterstützung für das Entwerfen und Entwickeln auf Basis des Systems Engineering gelingen. Die Abkürzung RFLP dieses Ansatzes steht für Requirement – Anforderungsmodell, Functional – Funktionsmodell, Logical – Logisches Modell und Physical – Physikalisches Modell (entspricht 3D-CAD-Modell) und beschreibt die systematische Produktentwicklung von der Systemanalyse bis zur physikalischen Entwicklung und bildet den absteigenden Ast des V-Modells in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2206 »Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme« (VDI2206).

Der RFLP-Ansatz wurde erstmals in der konventionell verfügbaren PLM-Umgebung V6 von Dassault Systemes als Basis für das Systems Engineering implementiert. Am Beispiel dieser Lösung unter Einsatz der Systeme ENOVIA und CATIA wurde dieser Ansatz untersucht. Abbildung 1 zeigt die Artefakte R-F-L-P sowie die Entwicklungsphasen Systemanalyse, physikalische Entwicklung und Systemintegration, die durch das CAx-System CATIA V6 Systems und die PLM-Plattform ENOVIA V6 zum Systems Engineering unterstützt werden.

Die erste Phase des RFLP-Ansatzes wird als Anforderungsdefinition bezeichnet und beinhaltet das sogenannte Requirements Engineering und Management, welches die Anforderungsspezifikation umfasst. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 2206 und 2221 werden die Kundenwünsche und Anforderungen an das Produkt erfasst und verwaltet (VDI 2206, VDI 2221). Dabei wird zunächst das Anforderungsmodell in der V6 Umgebung in enger Synchronisation mit ENOVIA V6 erstellt. Die Anforderungen können dabei beispielsweise

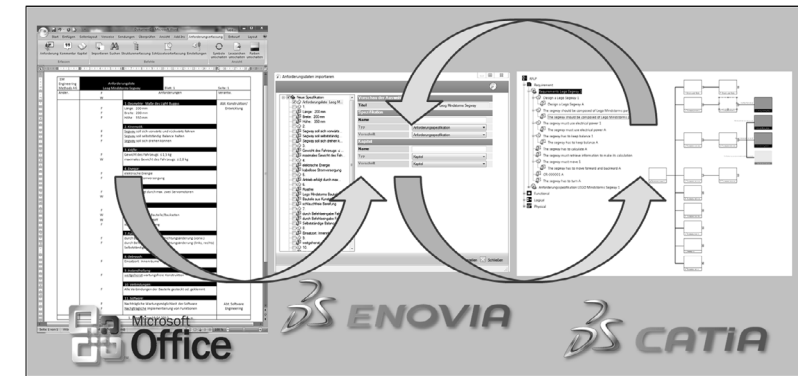


Abbildung 2: Anforderungserstellung mit MS Word, ENOVIA und CATIA Systems

se auch aus Microsoft Word direkt nach ENOVIA importiert werden. In der ENOVIA Umgebung werden die Anforderungen verwaltet und dabei gleichzeitig der CAx-Plattform CATIA auf Basis des integrierten Informationsmodell von V6 zur Verfügung gestellt. Jegliche Änderungen dieser Spezifikationen werden automatisch zwischen den Systemkomponenten synchronisiert und stehen somit stets aktuell und global in der V6 Umgebung zur Verfügung. Abbildung 2 zeigt schematisch die Unterstützung von und die Interaktion zwischen Word, ENOVIA V6 und CATIA V6 Systems während der Anforderungserstellung.

Im Rahmen der Funktionsanalyse wird mit Hilfe der Workbench VPM Functional Logical Editor die Anforderungsstruktur mit der Funktionsstruktur und der logischen Systemstruktur verknüpft. In Form eines Graphen lassen sich die Haupt- und Unterfunktionen und logischen Komponenten des Systems darstellen und strukturieren. Somit ist es möglich Anforderungen (Sicht Requirements) auf die Funktions-sicht (Sicht Functional) zu abstrahieren. Die Funktionen werden dazu aus den Anforderungen zur Spezifikation und Konzeption abgeleitet und erweitern somit das Anforderungsmodell. Haupt- und Unterfunktionen bilden dabei das Grundgerüst zum Erstellen einer Funktionsstruktur wobei Unterfunktionen mittels Verknüpfungen zu Haupt- bzw. Gesamtfunktion verbunden werden. Eine Unterfunktion oder auch Teilfunktion ist die Aufgliederung einer Transaktion in einzelne Elemente, die in CATIA V6 in Blöcken dargestellt wird. Die Ver-

bindungen zwischen den einzelnen Funktionen werden nach zwei Arten unterschieden: Verbindungen vom Typ Datenfluss werden analog der Konstruktionslehre nach (Pahl et al. 2007) als Energie-, Stoff- oder Signalfluss definiert. Zusätzlich lassen sich Verbindungen vom Typ Kontrollfluss als sogenannten Aktivierungsfluss modellieren, der zur Aktivierung und Deaktivierung einzelner Funktionen sowie der Darstellung des logischen Zusammenhangs auf funktionaler Ebene dient. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Funktionsmodells und die daraus resultierende Funktionsstruktur in V6.

Auf Grundlage der Integration der IT-Lösung Dymola in CATIA V6 besteht die Möglichkeit das logische Modell zu erstellen und eine dynamische Verhaltensbeschreibung auf Basis der offenen Modellierungssprache Modelica1 zu generieren. Im Rahmen des modellbasierten Entwurfs wird dazu zunächst ein logisches Systemmodell in CATIA V6 als 2D-Graph definiert und die Zusammenhänge der verwendeten Komponente dabei miteinander verknüpft. Es entsteht ein Architekturkonzept für das System, das Wirkprinzipien als Lösungen für die definierten logischen Komponenten beschreibt. Mit Hilfe des sogenannten Dynamic Behavior Modeling in V6 wird jeder logischen Komponente ein mit Modelica modelliertes Systemverhalten hinterlegt und somit Schritt für Schritt ein simulationsfähiges Gesamtsystem aufgebaut. In Abbildung 4 wird exemplarisch ein logisches Modell als Ergebnis der Verhaltensmodellierung in V6 dargestellt.

Die vollständige Abbildung eines virtuellen Prototyps im Rahmen des Entwurfs und der Entwicklung auf Basis des RFLP-Ansatzes entsteht mit Hilfe der 3D-CAD Modellierung zur Gestaltung (Sicht Physical). Dazu wird mit den bereits aus CATIA V5 bekannten Werkzeugen zur Konstruktion ein 3D-CAD Modell erstellt. Auf Basis der CATIA-Modelica-Integration werden die dabei erzeugten 3D-Parts und Assemblies in die Dymola-Simulationsumgebung integriert und ergänzen das um die Verhaltensbeschreibung erweiterte logische Modell mit physikalischen Eigenschaften auf Basis des 3D-CAD-Modells. Änderungen am CAD-Modell haben somit direkten Einfluss auf das Simulationsmodell und sind vollständig mit der logischen Systemverhaltensbeschreibung im integrierten Informationsmodell verknüpft.

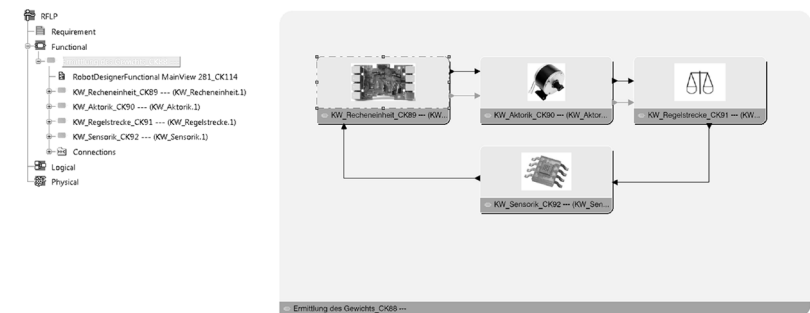


Abbildung 3: Funktionsmodell am Beispiel einer elektronischen Waage

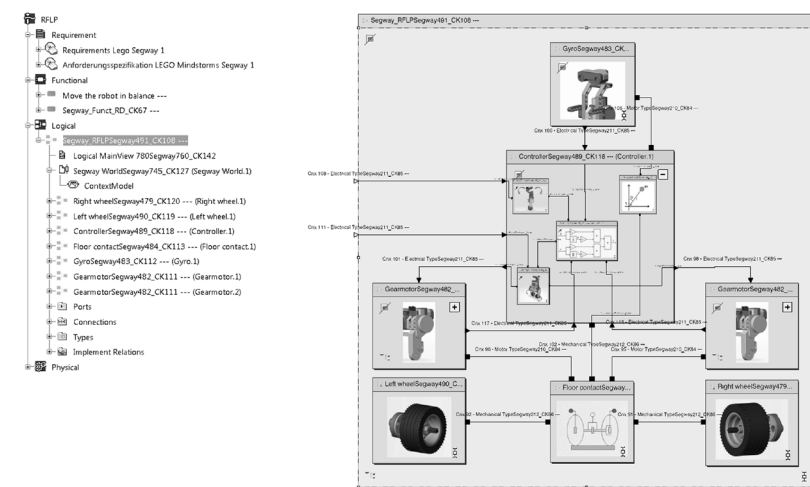


Abbildung 4: Logisches Modell am Beispiel LEGO Mindstorms NXT 2.0 Roboter

2.3 Anwendungsbeispiel zur Evaluierung des RFLP-Ansatzes in V6

Am Beispiel eines LEGO Mindstorms NXT 2.0 Roboters wurde der RFLP-Ansatz in V6 evaluiert und wird im Folgenden diskutiert. Der Roboter soll einem Segway Personal Transporter nachempfunden werden und als ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug mit zwei Rädern auf einer Achse ausgeführt werden, das sich bei Fortbewegungen mit Hilfe einer elektronischen Antriebsregelung selbst in Balance hält. Die Bewegung soll sich durch eine Fernbedienung in Vorwärtsrichtung und Rotation um die eigene Achse zur Fahrtrichtungsänderung nach links bzw. rechts steuern lassen. Für den

Aufbau des Roboters stand ein LEGO Mindstorms NXT 2.0 Baukasten bestehend aus einem, zwei Servomotoren mit integriertem Drehsensor, einem Gyro-Sensor zur Lagebestimmung sowie Datenleitungen und einem Bausatz aus LEGO Bausteinen zur Verfügung. Beginnend mit der Anforderungsanalyse und Erstellung einer Anforderungsliste und des anschließenden Entwurfs der Funktionsstruktur und der Systemarchitektur wurde das Verhalten des NXT Roboters mit CATIA V6 Systems modelliert, simuliert und optimiert.

Im Rahmen dieses repräsentativen Anwendungsbeispiels wurde zunächst eine Anforderungsliste in MS Word erstellt, um diese mit der Microsoft Office Requirements Management Integration nach ENOVIA V6 zu importieren. In der Anforderungsliste werden dazu Textstellen als Anforderung, Kommentar oder Kapitel definiert, die farblich im Dokument hervorgehoben werden. Individuelle Einstellungen zu diesen Definitionen sind während des Importvorgangs möglich. In diesem Schritt wird die Anforderungsliste als z.B. eine Systemanforderungsspezifikation deklariert und einzelne Anforderungen zwischen Kundenanforderung oder Benutzeranforderung sowie funktionale und nicht funktionale Anforderungen unterschieden. Nach Abschluss des Importvorgangs ist die Anforderungsspezifikation in die ENOVIA Plattform integriert und wird sowohl als Anforderungsmodell im RFLP-Strukturbaum (Sicht Requirements) als auch in Form eines 2D-Graphen in CATIA V6 Systems dargestellt (siehe Abbildung 5).

In der V6 Systems Workbench VPM Functional Logical Editor wird anschließend aus dem Anforderungsmodell das Funktionsmodell abgeleitet und im RFLP-Strukturbaum unter der Rubrik Functional abgelegt. Die Funktionen des NXT Roboters werden als Blockdiagramm dargestellt und dabei in Haupt- und Unterfunktionen differenziert und mittels Funktionsflüsse miteinander verbunden. Abbildung 6 zeigt die Gesamtfunktion des Roboters. Die Gesamtaufgabe des Roboters »Halten der Balance bei gleichzeitiger Fortbewegung« ist in der Hauptfunktion formuliert und durch die drei Teilfunktionen »Balance halten«, »Verwaltung der Bewegung« und »Generierung von elektrischer Energie« gegliedert. Diese Teilfunktionen sind wiederum in weitere Teilfunktionen niedrigerer Komplexität bis hin

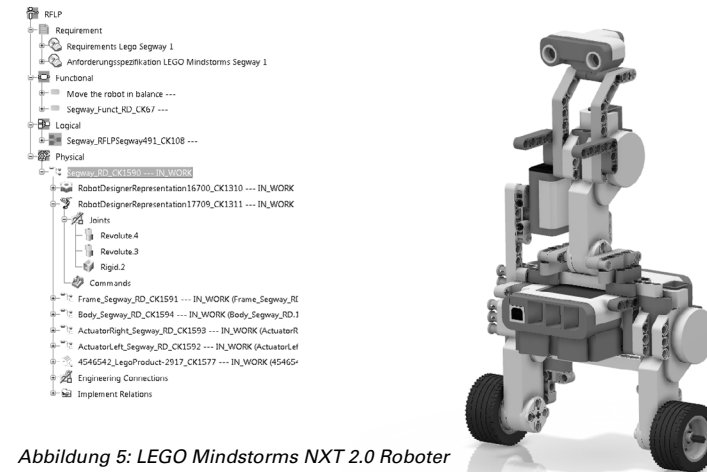


Abbildung 5: LEGO Mindstorms NXT 2.0 Roboter

zu Funktionen wie z.B. »Transformation der elektrischen Energie in mechanische Energie« oder »Abfrage der Bewegungsvorgabe« und »Anpassung der mechanischen Energie« detailliert. Die Verknüpfung der einzelnen Teilfunktionen ergibt eine Funktionsstruktur, die die Gesamtfunktion darstellt.

Das logische Design detailliert die funktionale Architektur durch die modellbasierte Entwicklung eines simulationsfähigen Verhaltensmodells für den Roboter auf Basis definierter Wirkprinzipien und ausgewählten Technologielösungen.

Die logische Architektur des Roboters besteht aus den einzelnen Elementen Sensorik, Controller, Aktorik und Regelstrecke. Dabei wurde als Sensor ein Gyrosensor zur Messung der Neigung und Lage des Roboters adaptiert. Die Wandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie (Aktorik) übernehmen zwei elektrische Servomotoren, die durch die Integration eines Drehsensors Parameter der Getriebestellung an den Controller übermittelt. Der Controller (32-Bit Mikroprozessor) dient zur Auswertung und Berechnung sämtlicher aufgenommener Signale und Befehle. Die zu regelnde Strecke wird dabei als invertiertes Pendel interpretiert, welches durch zwei Räder und einer Achse den Kontakt zum Fahrbahnuntergrund herstellt und durch einen im Controller implementierten PID-Regler geregelt wird.

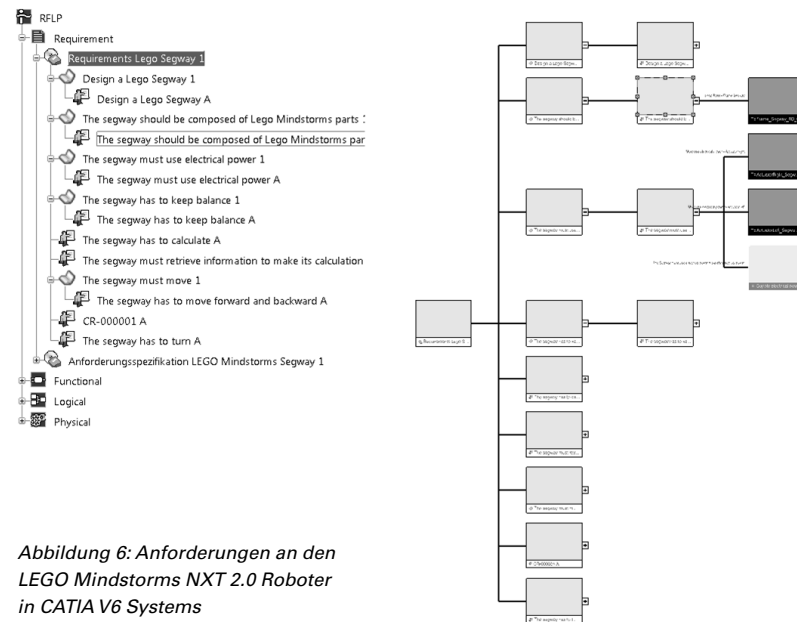


Abbildung 6: Anforderungen an den LEGO Mindstorms NXT 2.0 Roboter in CATIA V6 Systems

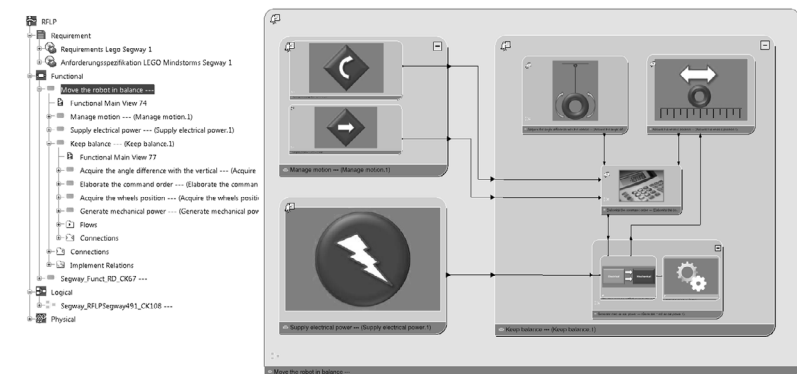


Abbildung 7: Funktionsstruktur der LEGO Mindstorms NXT 2.0 Roboters in CATIA V6 Systems

Mit Hilfe der Workbench Dynamic Behavior Modeling werden den Funktionen und logischen Bausteinen mit Hilfe von Modelica Verhaltensbeschreibungen hinterlegt, die anschließend auf Basis von Dymola in CATIA V6 Systems berechnet und simuliert werden. Abbildung 7 zeigt den mit Modelica erstellten elektrischen Antrieb des Lego Mindstorms NXT 2.0 Roboters.

Die CAD-Modellierung von Einzelteilen und Baugruppen in CATIA und die damit verbundene Festlegung von Gestalt und mechanischen Eigenschaften des Systems ist seit Jahren bekannt. Die integrierte CATIA 3D Body Modelica Bibliothek lässt nun das CAD-Modell direkten Einfluss auf das Simulationsverhalten nehmen und verschmelzt das physikalische Modell mit dem Verhaltensmodell. Parameter wie z. B. Masse, Trägheit und Dichte werden durch diese Modelica Bibliothek direkt aus der Geometrie bzw. dem 3D-CAD-Modell in die Simulationsumgebung überführt. Nach der Berechnung wird das Systemverhalten mit Hilfe der Simulation in Form von Diagrammen beschrieben und die Bewegung des 3D-Modells in einer Animation visualisiert. Der Simulationsverlauf wird mittels Live Plots aufgezeichnet, die ebenfalls zur Auswertung und Optimierung Verwendung finden. Abbildung 8 zeigt abschließend schematisch das Ausbalancieren des Roboters über den Zeitverlauf.

3 Einsatz des Systems Engineering und des RFLP-Ansatzes in der Praxis

Die Entwicklung komplexer technischer Produkte erfordert eine umfassende und multidisziplinäre Ingenieurstätigkeit und eine ganzheitliche Betrachtung in den frühen Entwicklungsphasen. Der RFLP-Ansatz ermöglicht eine disziplinübergreifende, modellbasierte Entwicklung sowie frühzeitige Untersuchung, Bewertung und Optimierung des technischen Systems. Auf Grundlage der PLM-Plattform V6 und speziell CATIA Systems wurde dieser Ansatz untersucht. Das repräsentative Anwendungsbeispiel in diesem Beitrag hat zudem die Verhaltenssimulation, die mit CATIA V6 Systems und der RFLP-Methode durchgängig unterstützt wird, evaluiert.

V6 bietet eine intuitiv zu bedienende und ergonomische Entwicklungsumgebung, die weit mehr als ein CAD-System für die graphische Repräsentation von Funktions- und Wirkstrukturen sowie Ideen und Konzepten bietet. V6 unterstützt beispielsweise die Spezifikation von Anforderungen und die modellbasierte Entwicklung auf Basis einer definierten Vorgehensweise und verknüpft die einzelnen Partialmodelle miteinander, die über verschiedenen Editoren erstellt werden.

Das Besondere an CATIA V6 Systems ist, dass die Repräsentationen der RFLP-Informationen auf einem integrierten Datenmodell basieren und somit beliebige Verknüpfungen zwischen den Entwicklungsphasen und -modellen erstellt werden können. Die RFLP-Partialmodelle sind durch sogenannte Implement Relations miteinander verknüpft und ermöglichen es z.B. von der einzelnen Funktion, unabhängig ob Haupt- oder Unterfunktion, zur umgesetzten Anforderung oder zum logischen Design zu gelangen. Die Nachvollziehbarkeit und Nachverfolgbarkeit der Entwicklungsschritte und -ergebnisse wird zudem mit Hilfe von informativen Darstellungen (z.B. Traceability Report) sichergestellt. Durch die Verknüpfungen der einzelnen RFLP-Repräsentationen ist somit eine ständige Validierung und Verifikation gewährleistet.

Mit den integrierten Simulationsmöglichkeiten können das ganzheitliche Verhaltensmodell und das mechanische 3D-Modell gemeinsam simuliert werden. So ist es möglich Wechselwirkungen der Disziplinen in der jeweilig anderen zu berücksichtigen. Beispielsweise führt eine Kollision an einem Anschlag im 3D-Modell zu einer Änderung des Verhaltens im logischen Modell.

Mit V6 kann das V-Modell zur Entwicklung technischer Produkte vom Anforderungsmanagement über die funktionale Analyse, der logischen Architektur bis hin zum physikalischen Design durchlaufen werden. Der Ingenieur erkennt somit auf einen Blick auf Basis welcher Anforderungen welches logische Verhalten implementiert wurde und welchen Einfluss dieses auf die 3D-Geometrie hat. Die PLM-Plattform V6 bietet daher eine durchgängige Lösung hinsichtlich Systems Engineering sowie Erzeugung und Management von Objekten, die während der Produktentwicklung entstehen. Sämt-

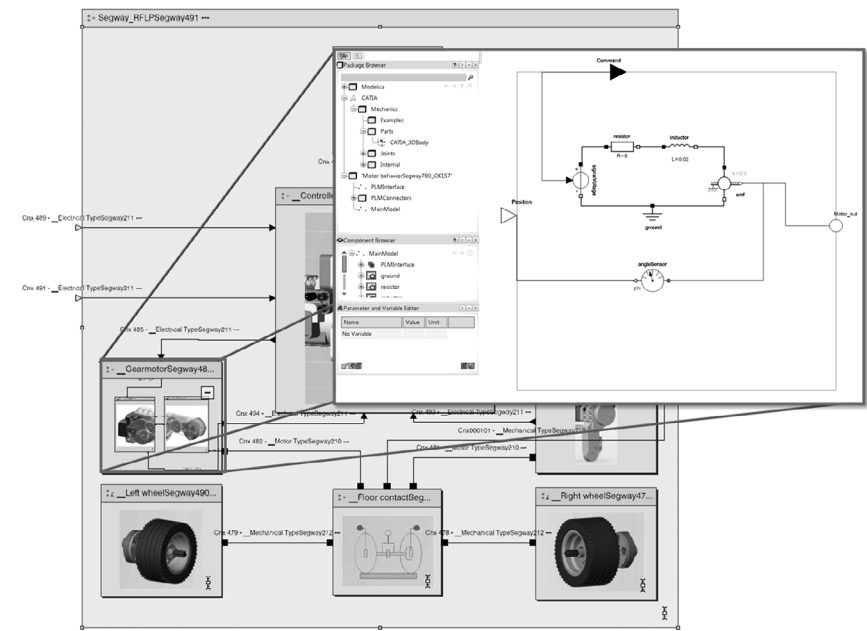


Abbildung 8: Verhaltensbeschreibung mit Modelica in CATIA V6 Systems

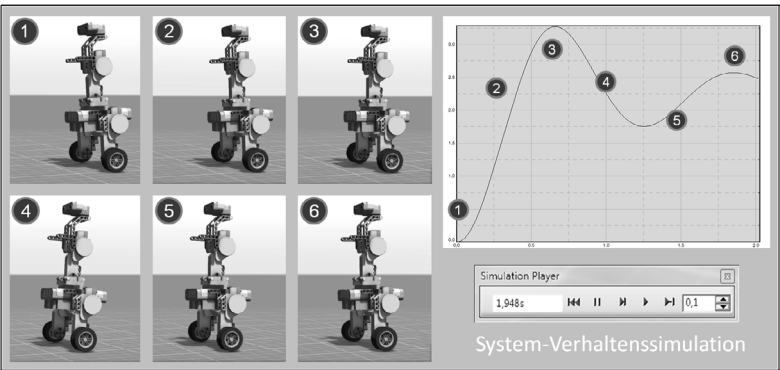


Abbildung 9: Simulation in CATIA V6 Systems

liche Modellierungsergebnisse und Produktinformationen sowie Simulationsdaten und Ergebnisse werden dazu in der zentralen ENOVIA PLM Umgebung abgelegt und stehen auf dem Datenbankserver objektorientiert und strukturiert zur Verfügung. Durch die durchgängige Nutzung der datenbankbasierten Plattform ist es möglich, ohne Schnittstellen und Medienbrüche ein gemeinsames Produktmodell für alle Disziplinen im Rahmen des Systems Engineering zu nutzen und die verschiedenen Sichten und Partialmodelle miteinander zu verknüpfen.

Wenn technische Systeme modellbasiert entwickelt werden sollen, benötigen die Ingenieure sowohl Kenntnis der modellbasierten Entwicklung als auch geeignete Modellierungssprachen. Um mit der modellbasierten Entwicklung im interdisziplinären Team mit mehreren Ingenieuren zu arbeiten, bedarf es entsprechenden Modellierungsmethoden und Techniken (z.B. Modellierungsregeln und Konventionen), um die Modelle transparent, robust und wartbar zu gestalten (Alt 2012). V6 bietet derzeit eine proprietäre Modellierungssprache für den funktionalen und logischen Entwurf. In der Praxis scheint sich allerdings SysML als Standardsprache durchzusetzen. Eine Unterstützung und Integration von SysML und weiterer Standards für die Systementwicklung, z.B. AUTOSAR in der Automobilindustrie, ist für eine unternehmensübergreifende modellbasierte Entwicklung notwendig.

Schließlich zeichnen sich aktuell bereits weitere Technologien und Trends ab, die in der Praxis heute schon eine gewisse Rolle spielen oder an Bedeutung gewinnen und damit das Systems Engineering im allgemeinen und die modellbasierte Entwicklung auf Basis des RFLP-Ansatzes im speziellen ergänzen (u.a. modellbasiertes Testen, automatische Codegenerierung, Co-Simulation).

Systems Engineering bietet ein allgemeines, nicht auf spezielle Entwicklungs Herausforderungen ausgerichtetes Vorgehensmodell und dient multidisziplinär zusammengesetzten Entwicklungsteams als gemeinsames Kommunikationsmittel (Züst 2004). Der RFLP-Ansatz bietet zudem eine Methodik, die die modellbasierte Entwicklung erfolgreich unterstützen kann. Die vorgestellten Methoden und Vorge-

hen wurden am Beispiel von V6 erfolgreich in der Praxis erprobt. Für die Einführung von Systems Engineering und des RFLP-Ansatzes ist die Auswahl und der Einsatz geeigneter integrierter oder föderativer IT-Werkzeuge für die Entwicklung notwendig aber noch nicht ausreichend: Es müssen die erforderlichen Entwicklungs- und unterstützende Prozesse eingeführt werden und die Projektbeteiligten am Systems Engineering qualifiziert und motiviert werden, um den umfassenden Ansatz erfolgreich in der Praxis einzuführen.

Literaturverzeichnis

- Alt, M. 2012: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. München: Hanser.
- Cellier, F. E.: Continuous System Modeling, New York: Springer Verlag, 1991
- Daenzer, W. F.; Huber, F. 1997: Systems Engineering Methoden und Praxis, Zürich: Verlag für Industrielle Organisation.
- Dassault Systemes 2012: www.3ds.com, abgerufen am 17.04.2012
- Gesellschaft für Systems Engineering e.V. 2012: GfSE e.V. und Systems Engineering. www.gfse.de, abgerufen am 17.04.2012
- Janschek, K. 2010: Systementwurf mechatronischer Systeme, Heidelberg: Springer.
- Kleiner, S. 2003: Föderatives Informationsmodell zur Systemintegration für die Entwicklung mechatronischer Produkte, Aachen: Shaker Verlag.
- Modelica Association 2012: www.modelica.org, abgerufen am 17.04.2012
- Otter, M. & Schweiger, C. 2004: Modellierung mechatronischer Systeme mit Modelica. Oberpfaffenhofen: DLR,.
- Pahl, G., Beitz, W.; Feldhusen J., Grote K.-H. 2007: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag,
- Sendler, U. 2012: www.plmportal.org, abgerufen am 22.03.2012
- Stark, R.; Beier, G.; Rothenburg, U.; Woll, R. 2012: Modellbasiertes Systems Engineering – Durchgängige Entwicklung mit erlebbaren Prototypen. In: Digital Engineering Magazin 3/2012, 2012
- Verein Deutscher Ingenieure 2003: VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ Düsseldorf: VDI-Gesellschaft.
- Verein Deutscher Ingenieure 1993: VDI-Richtlinie 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“. Düsseldorf: VDI.
- Züst, R. 2004: Einstieg ins Systems Engineering, Zürich: Orell Füssli Verlag.

Kontakt

Dr. Sven Kleiner
em engineering methods AG
Rheinstraße 97
64295 Darmstadt

06151/950 54 20
sven.kleiner@em.ag
www.em.ag

Fabian Klink, Rocco Gasteiger,
Harald Paukisch & Ulrich Vorwerk

Workflow zur generativen Herstellung von Felsenbeinfaksimilemodellen für die Optimierung von Cochlea-Implantat Operationen

1 Einleitung

Die Ursachen für hochgradige Schwerhörigkeit bzw. Taubheit können unterschiedlich sein. Zum einen liegt eine angeborene Hörstörung bei einem von tausend Neugeborenen vor (Willenborg et al. 2009). Zum anderen kann eine erworbene Taubheit durch verschiedene Erkrankungen, wie z.B. Meningitis, Enzephalitis, Masern oder Tuberkulose hervorgerufen werden. Wenn dann die Nutzung von konventionellen Hörgeräten für ein ausreichendes Hörvermögen nicht mehr in Frage kommt, wird eine elektronische Innenohrprothese verwendet. Dieses sogenannte Cochlea-Implantat (CI) wandelt die akustischen Signale in elektronische Signale um und überträgt diese direkt auf den Hörnerv. Für die Implantation des Cochlea-Implantates muss der Chirurg einen komplizierten und risikobehafteten Eingriff durchführen. Dafür schafft er mit Hilfe verschiedener Fräsköpfe einen Zugang zur Hörschnecke (Cochlea), in der er dann einen Elektrodenträger einführt und genau platziert (siehe Abbildung 2).

Entscheidend für eine erfolgreiche Operation sind vor allem das Geschick und die Erfahrung des Chirurgen. Für Ausbildungs- und Übungszwecke ist deshalb ein kontinuierliches Training notwendig.

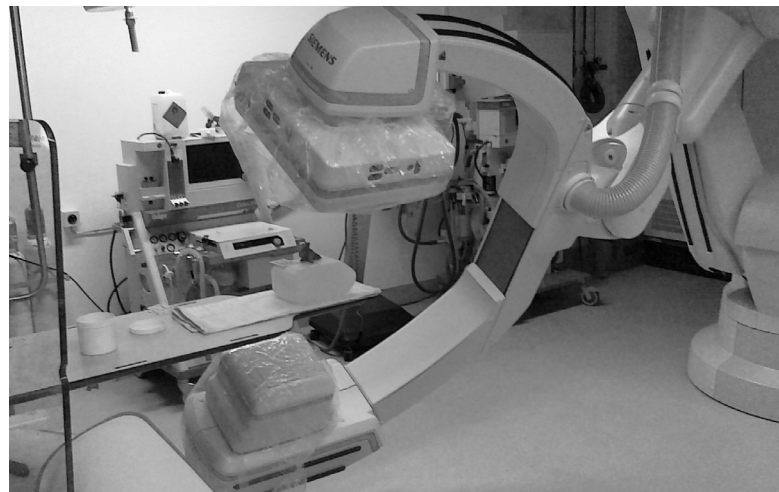
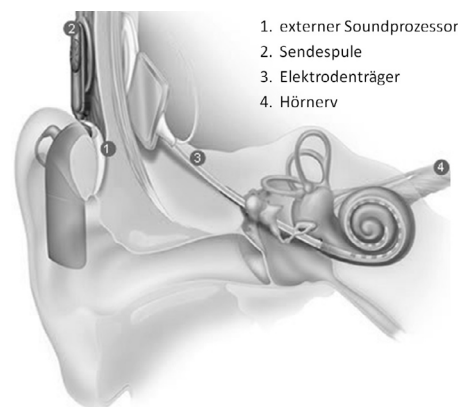


Abbildung 2: Artis Zeego, Datenaufnahme Leichenpräparat Felsenbein

Abbildung 1: Darstellung der Innenohrstruktur mit Implantat (Cochlea 2012)



Leider stehen Leichenpräparate der Felsenbeinstruktur nicht in einer ausreichenden Anzahl zur Verfügung (Vorwerk et al. 2011a), so dass die Entwicklung und Fertigung künstlicher Übungspräparate (Faksimilemodelle) für die Operationsvorbereitung dringend erforderlich sind. Diese Forschungstätigkeiten werden im Rahmen des Programms ego.-INKUBATOR mit Mitteln des EFRE (EFRE 2012) durchgeführt.

2 Zielsetzung

Vor jeder CI-Operation ist die Aufnahme von Computertomographiebildern (CT) des Patienten notwendig. Mit Hilfe dieser Daten kann der Chirurg die zu operierende Region im Vorhinein auf Auffälligkeiten untersuchen und mögliche Gefahren abschätzen. Um das Komplikationsrisiko weiter zu minimieren, ist es wünschenswert den Eingriff im Vorhinein unter vergleichbaren Gegebenheiten testweise durchzuführen. Die patientenindividuellen künstlichen Felsenbeinstrukturen sollen dafür vor jedem operativen Eingriff zur Verfügung stehen. Als Ausgangsdatensatz dienen die vom CT aufgenommenen DICOM-Datensätze. Diese müssen in ein STL-Datenformat umgewandelt werden, um eine generative Fertigung auf Rapid-Prototyping-Anlagen zu ermöglichen. In diesem Segmentierungsprozess werden die relevanten von den irrelevanten Bereichen des aufgenommenen Schädels separiert. Die daraus gewonnenen Daten können dann mittels einer speziellen Software in eine dreidimensionale Oberflächenstruktur (STL-Modell) überführt werden. Für ein genaues Modell ist neben einer gewissenhaften Segmentierung vor allem die CT-Datenqualität entscheidend.

2.1 Datenaufnahme

Für die Datenaufnahme steht der Universität Magdeburg ein Volumen-CT-System der Firma Siemens zur Verfügung. Dieses hochmoderne Multiachsensystem (Artis Zeego, siehe Abbildung 1) besteht aus einem C-Arm, der um das Untersuchungsobjekt flexibel positioniert werden kann und damit eine umfangreiche Zugänglichkeit gewährleistet. Es zeichnet sich durch eine ausgezeichnete räumliche Auflösung aus und ist besonders für hochauflösende Bilder von Knochenstrukturen mit feinen Kontrastunterschieden geeignet. Die durch das CT-System erzeugten Schichtbilder des Untersuchungsobjektes werden in einen sog. DICOM-Standard umgewandelt. Dieses weltweit akzeptierte Datenformat kann u.a. neben dem medizinischen Bildmaterial auch Objektinformationen beinhalten.

2.2 Datenverarbeitung

Der aus dem CT-System aufgenommene Bilddatensatz muss für ein generatives Fertigungsverfahren in einen kompatiblen Datensatz umgewandelt werden. Hierfür ist das aufgenommene digitale Bild in

inhaltlich zusammenhängende Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel zu segmentiert. Für die Segmentierung der Felsenbeinstruktur wurde das Schwellwertverfahren verwendet. Dafür wird auf die Grauwerte des Bildes zurückgegriffen, mit dem sich einzelne Teile des Schädels voneinander trennen lassen und farblich hervorgehoben werden können. Anschließend ist es möglich den markierten Bereich zu separieren und über weiterführende Verfahren in eine 3D-Punktwolke zu überführen. Daraus kann durch Triangulation der einzelnen Punkte ein STL-Datensatz erzeugt werden, der dann in eine Rapid-Prototyping-Anlage eingelesen werden kann.

Das bei der Computertomographie mittels Röntgenstrahlung erzeugte Bild, wird in unterschiedlichen Graustufen dargestellt. Hierbei ist die Absorptionsfähigkeit der Materialien gegenüber Röntgenstrahlen für die Segmentierung ausschlaggebend. Anhand der Hounsfield-Skala ist eine Charakterisierung von Gewebe- und Knochenstrukturen innerhalb eines CT-Bildes möglich. Aus der in Abbildung 3 zu entnehmenden Grafik, kann der Hounsfield-Wert (HE) von Knochen von 50-3000 HE schwanken (Akadhi et al. 2011). Diese Schwankung liegt in der unterschiedlichen Knochenzusammensetzung des menschlichen Körpers begründet. Während die äußere Knochenschicht (Kortikales) einen sehr hohen HE-Wert aufweist und leicht von den Gewebestrukturen zu segmentiert ist, muss die Separierung der schwammartigen Knochenschichten (Spongiosa) der im Innenohr befindlichen filigranen Gehörknöchelchen (Ambos, Steigbügel, Hammer) und der Cochlea-Schnecke für ein detailgetreues Felsenbeinmodell genauer erfolgen. In Abbildung 4 ist die segmentierte Felsenbeinstruktur des DICOM-Datensatzes zu erkennen.

2.3 Generative Fertigung

Das gewählte generative Fertigungsverfahren Stereolithographie erfüllte nach der testweisen Herstellung künstlicher Felsenbeinpräparate mit verschiedenen Rapid-Prototyping-Systemen die gestellten Anforderungen der HNO-Chirurgen am besten (Klink et al. 2011). Die Modelle entstehen auf einer höhenverstellbaren Bauteilplattform, die in einem Kunstharzbad stufenweise eintaucht. In jeder Stufe wird das flüssige Epoxidharz durch gezielte Laserbestrahlung an der Oberfläche des Bades schichtweise ausgehärtet. Für eine

gleichmäßige Benetzung der Harzoberfläche wird ein mechanischer Wischer verwendet (Hoyer et al. 2006).

Da bei diesem Verfahren das Ausgangsmaterial flüssig ist und kein zusätzliches festes Supportmaterial verwendet wird, ist es für die Fertigung der künstlichen Felsenbeinpräparate am besten geeignet. In den feinen Hohlraumstrukturen verbleibt das flüssige Kunstharz, dieses ist in der Operationssimulation problemlos mit Wasser ausspülbar. Dadurch kann dem Chirurgen beim Fräs- und Spülprozess ein praxisnahes Gefühl vermittelt werden. Mit der neusten RP-Anlagengeneration ProJet 6000 der Firma 3D Systems ist es möglich Schichtdicken von 0,05mm zu fertigen. Da für einen Operateur Poren erst ab einer Größe von ca. 0,4mm (Vorwerk et al. 2011b) visuell und haptisch relevant sind, ist die Fertigung mit dieser generativen Fertigungstechnologie möglich.

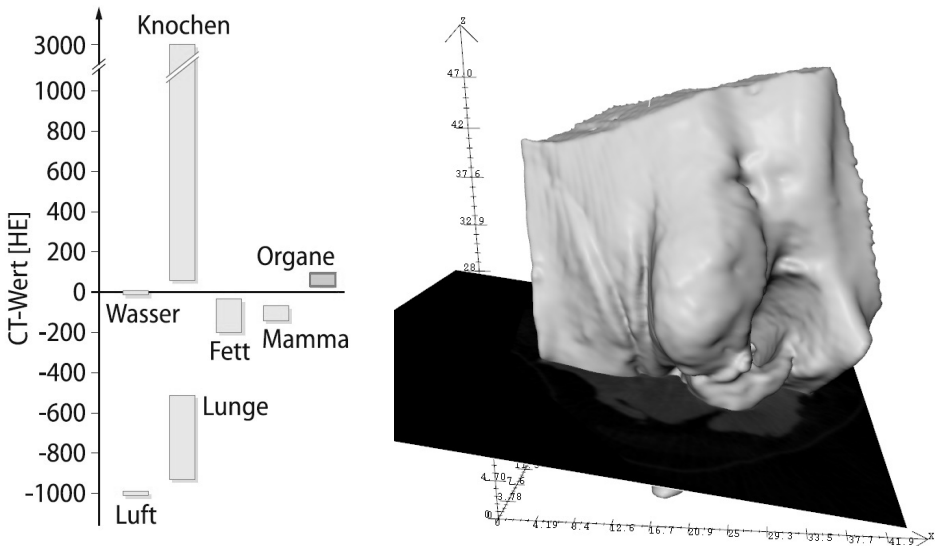


Abbildung 3 (links): Hounsfield-Skala (Akadhi 2011)
Abbildung 4 (rechts): CT-Aufnahme Felsenbeinstruktur

2.4 Präparierübungen am künstlichen Felsenbein

Erste Fräs- und Präparationsübungen der künstlichen Felsenbeinmodelle wurden im Rahmen des Magdeburger Operationskurses »Mikrochirurgie des Felsenbeins« an der Universitätsklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde im Januar 2012 durchgeführt. Den Teilnehmern wurde das notwendige Operationswerkzeug mit Fräs- und Spüleinheit und ein operationsnaher Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt. Unter Anleitung der anwesenden HNO-Spezialisten präparierten die auszubildenden Chirurgen die künstlichen Felsenbeinmodelle. Die Modelle mussten vor der Präparation in einen Schraubstock fest eingespannt werden (siehe Abbildung 5). Nun war es möglich durch Fräsen einen mechanischen Zugang zu schaffen (Mastoidektomie). Durch ständiges Spülen mit Wasser und gleichzeitiges Absaugen, konnten die abgetragenen Kunstharzspäne problemlos entfernt werden. An dem Modell waren die verschiedenen Wegpunkte bzw. Risikostrukturen (Antrum, posteriore Tympanotomie, Fazialisverlauf) zu erkennen. Dadurch konnte die Präparation realitätsnah bis zum Eingang der Cochlea erfolgen. Für eine vollständige Operationssimulation mussten abschließend die CI-Elektroden in die Cochleastruktur eingeführt werden.



Abbildung 5: Präparierübungen am künstlichen Felsenbein

3 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Herstellung künstlicher Felsenbeinpräparate waren im Vorfeld mehrere Arbeitsschritte notwendig. Bis zu den ersten Präparationsübungen musste eine interdisziplinäre Zusammenarbeit über die Datenaufnahme, Datenverarbeitung bis zur generativen Fertigung erfolgen. Es konnte in ersten Operationskursen gezeigt werden, dass die Modelle für Lehr- und Übungszwecke geeignet sind. Mit der Darstellung der verschiedenen Poren und filigranen Strukturen ist der Einsatz, der mittels Stereolithographie gefertigten künstlichen Felsenbeinpräparate, als Trainingsalternative vorstellbar. In Zukunft ist das Ziel neben der Modellfertigung für das regelmäßige Training angehender Chirurgen die künstlichen Präparate direkt für die Operationsplanung bzw. Operationsvorbereitung von Cochlea-Implantat-Operationen zu verwenden. Dafür müssen die verschiedenen Arbeitsschritte zeitlich so optimiert werden, dass ein Modell innerhalb weniger Tage zur Verfügung steht. Wenn eine sichere reproduzierbare generative Fertigung sichergestellt werden kann, ist auch die Herstellung anderer Knochenstrukturen (z.B. Nasenknochenstruktur) des menschlichen Körpers vorstellbar. Vor komplizierten Eingriffen kann dann der Operateur im Vorfeld die Operation an einem individuell gefertigten Präparat trainieren, bevor er den Eingriff durchführt. Dies kann dann zu einer Abnahme der Komplikationen während eines Eingriffes führen und somit Operationszeiten senken.

Literaturverzeichnis

- Willenborg, K.; Lenarz, T.; Lesinski-Schiedat, A. 2009: Bedeutung der MRT-Untersuchung in der Cochlea-Implantat-Voruntersuchung bei Kindern. In: Kind und Radiologie, 21, 22–23
- Cochlear Deutschland GmbH & Co. KG 2012: Wie funktionieren Cochlea-Implantate. <http://www.cochlear.com/de/cochlea-implantate/funktionsweise-erwachsene>, abgerufen am 07.03.2012
- Vorwerk, U.; Grote, K.-H.; Beyer, C.; Arens, C.; Vorwerk, W. 2011a: Die Realisierung von anatomischen Felsenbeinfaksimiles mit cochleären Hohlraumstrukturen. In: Laryngo-Rhino-Otol, New York: Georg Thieme Verlag KG, 747–752
- EFRE – Europäischer Fond für Regionale Entwicklung Sachsen-Anhalt 2007 bis 2013, ego.-INKUBATOR; www.europa.sachsen-anhalt.de, abgerufen am: 14.02.2012

- Akadhi, H.; Leschka, S.; Stolzmann, P.; Scheffel, H. 2011: Wie funktioniert CT? Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Klink, F.; Kuhlmann, K.; Döring, J.; Hahne, C.; Vorwerk, U. 2011: Entwicklung und Herstellung künstlicher Felsenbeinpräparate mittels Rapid-Prototyping Verfahren für die Optimierung von Cochlea-Implantat Operationen. In: Brökel, K.; Stelzer, R.; Feldhusen, J.; Rieg, F.; Grote, K.-H.: 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, 188-195, Rostock: Shaker Verlag
- Hoyer, J.; Uhl, C.; Beyer, C. 2006: Fortschritt-Berichte VDI Nr. 656 Virtual & Rapid Prototyping. Düsseldorf: VDI Verlag
- Vorwerk, U.; Hahne, C.; Grote, K.-H.; Klink, F.; Hessel, H.; Paukisch, H.; Skalej, M. 2011b: Operationsmodelle des menschlichen Felsenbeines zur Vorbereitung auf Cochlea-Implantat-Operation. In: Burgert, O.; Schipper, J.; Zachow, S.: CURAC 2011, 135–138, Magdeburg, Verlag Univ. Magdeburg,

Kontakt

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Fabian Klink
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
<http://imk.uni-magdeburg.de/ikt/>

Dipl.-Ing. Rocco Gasteiger
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Simulation und Graphik
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
<http://www.wisg.cs.uni-magdeburg.de/>

Dr. med. Harald Paukisch
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Neuroradiologie
Leipziger Straße 44, 39120 Magdeburg
<http://www.med.uni-magdeburg.de/inr.html>

Priv.-Doz. Dr. med. Ulrich Vorwerk
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Universitätsklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde
Leipziger Straße 44, 39120 Magdeburg
<http://www.med.uni-magdeburg.de/khno.html>

Daniel Krüger & Sandro Wartack

Ein Werkzeug zur schnellen Konfiguration biomechanischer Simulationen in der Produktentwicklung

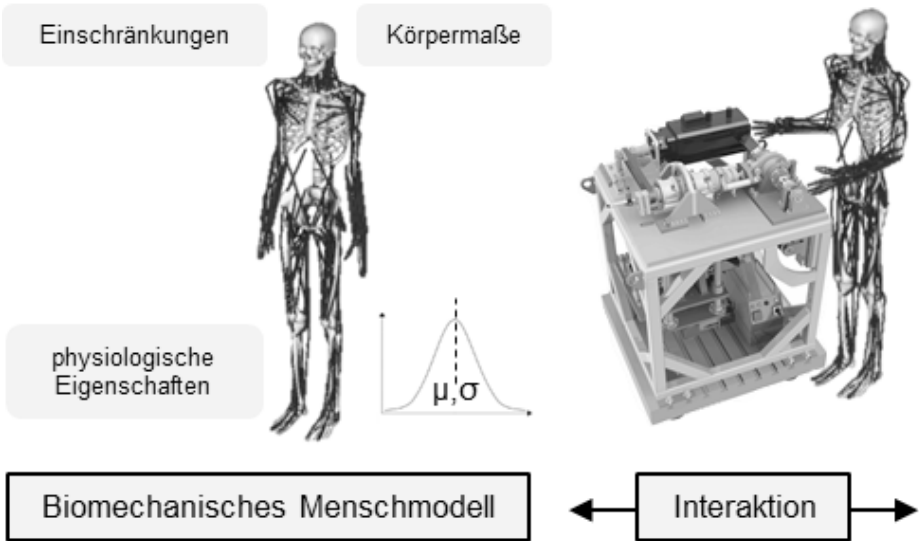
1 Simulation in der menschenzentrierten Produktentwicklung

Neben der Funktionserfüllung und den Kosten ist der wirtschaftliche Erfolg eines Produktes nicht zuletzt dadurch gegeben, wie gut es den Wünschen, Bedürfnissen und Fähigkeiten seiner Nutzer entspricht. Zwischen Nutzer und Produkt existieren vielfältige Wechselwirkungen, die erfasst und verstanden werden müssen, um Produktkonzepte hinsichtlich der oben genannten Kriterien bewerten und optimieren zu können. Die Philosophie der menschenzentrierten Produktentwicklung (MZZP) besteht folglich darin, in allen Phasen der Produktentwicklung konsequent das Gesamtsystem bestehend aus Nutzer, Produkt und Umwelt zu betrachten.

Aus dem Softwareengineering, wo menschenzentrierte Designansätze schon sehr lange verfolgt werden, stammt das Prozessmodell nach ISO 9241-210. Die Phasen des Entwicklungsprozesses sind durch eine starke Nutzerpartizipation gekennzeichnet. Entsprechende Methoden, wie die nutzerbasierte Evaluierung von Produktkonzepten können der Arbeit von Maguire (2001) entnommen werden. Viele dieser Methoden setzen voraus, dass bereits in der Konzeptphase die Möglichkeit besteht, den potentiellen Nutzer mit dem Produkt interagieren zu lassen, d.h. es müssen bereits sehr früh Prototypen zur Verfügung gestellt werden. In der Softwareentwicklung ist dies kein großes Problem, da die Produkte keine physische

Gestalt haben und Prototypen daher mit geringem Aufwand, z.B. in Form von Papiermodellen zu realisieren sind. Im Maschinen- und Fahrzeugbau hingegen ist der frühe Einsatz physischer Prototypen aus Kosten- und Zeitgründen äußerst problematisch. Es ist daher naheliegend, Möglichkeiten zur Analyse von Nutzer – Produkt Wechselwirkungen unter Verwendung virtueller Prototypen zu suchen.

Im Zusammenhang mit ergonomischen Fragestellungen müssen vor allem energetisch-effektorische Wechselwirkungen zwischen Nutzer und Produkt betrachtet werden. Hierzu zählen Beanspruchungs- und Ermüdungseffekte, die sich beim Nutzer während der Bedienung einer Maschine einstellen. Eine Möglichkeit, derartige Effekte simulativ unter Verwendung virtueller Prototypen zu erfassen, sind biomechanische Simulationen (Abbildung 1) bzw. biomechanische Menschmodelle. Biomechanische Simulationen bilden den menschlichen Bewegungsapparat als Mehrkörpersystem ab. Knochen werden als starre Körper betrachtet, die über Gelenke zu kinematischen Ketten verbunden sind. Muskeln stellen spezielle Aktuatoren dar, die den physiologisch bedingten Zusammenhang zwischen Kraft und Kontraktion des Muskels berücksichtigen. Die



Simulation ermöglicht, ausgehend von einer Zielbewegung und ggf. äußerlich auf den Körper einwirkenden Kräften, den inneren Beanspruchungszustand zu ermitteln. Dieser kann durch Größen wie die in den Gelenken wirksamen Drehmomente, Muskelaktivitäten sowie den Umsatz an mechanischer Energie beschrieben werden. (Delp et al. 2007)

Biomechanische Simulationen werden häufig in der Bewegungsmedizin zur Grundlagenforschung eingesetzt. In der Medizintechnik besteht eine Anwendung in der Ermittlung von Lastrandbedingungen zur strukturmekanischen Auslegung von Implantaten oder Prothesen (Grujicic et al. 2010). Um ein möglichst optimales Design für eine Handsäge zu ermitteln, wurde in (Rasmussen et al. 2001) der Energieumsatz der Armmuskulatur des Nutzers betrachtet. Dennoch sind biomechanische Simulationen in der Produktentwicklung eine Ausnahmeerscheinung, was nach Auffassung der Autoren an der äußerst aufwändigen Konfiguration der Simulationsmodelle, der mangelnden Integration in CAD/CAE Umgebungen sowie der für Ingenieure schwierigen Interpretation der Simulationsergebnisse liegt.



Abbildung 1: Biomechanisches Menschmodell zur Simulation von energetisch-effektorischen Nutzer - Produkt Wechselwirkungen mit virtuellen Prototypen

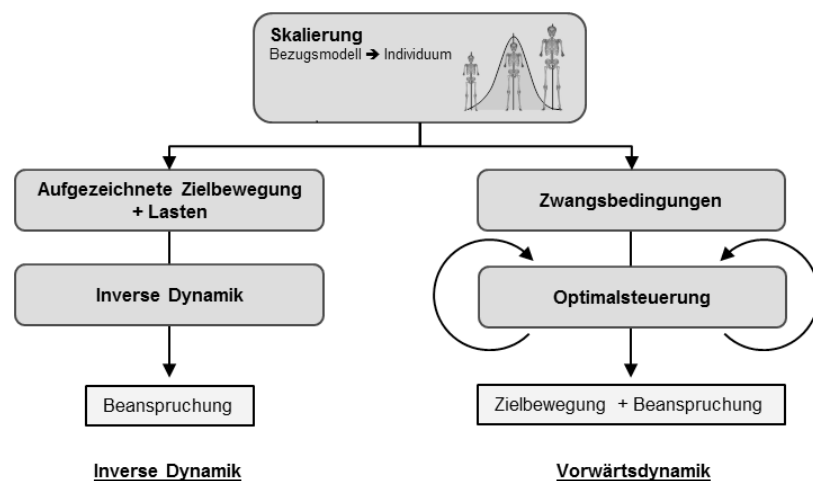


Abbildung 2: Inverse und vorwärtsgerichtete Dynamik

Dieser Beitrag möchte zur Anwendung von biomechanischen Simulationen in der menschenzentrierten Produktentwicklung motivieren. Hierzu werden Teile eines Ansatzes vorgestellt, mit dessen Hilfe der Aufwand zur Konfiguration eines Simulationsmodells drastisch reduziert und die Integration in die gewohnte Arbeitsumgebung des Produktentwicklers verbessert wird. Am Beispiel der Bedienung eines Lenkrades wird eine mögliche Anwendung aufgezeigt.

2 Methoden biomechanischer Simulationen

In Abbildung 2 sind zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur Durchführung biomechanischer Simulationen dargestellt. Beide Verfahren haben den Schritt der Modellskalierung gemeinsam. Um die Körpereigenschaften eines bestimmten Individuums in der Simulation zu berücksichtigen, muss ein generisches Bezugsmodell entsprechend skaliert werden. Die Skalierung umfasst die Segmentlängen und Massenverteilung der Extremitäten und des Rumpfes sowie die Krafteigenschaften der Muskulatur. Während die Längenmaße durch Messung ermittelt oder einer anthropome-

trischen Datenbasis (vgl. EN ISO 7250) entnommen werden können, müssen Massenverteilung und Krafteigenschaften oft abgeschätzt oder proportional zur Körpergröße angepasst werden.

Der Ansatz der inversen Dynamik geht von einer gegebenen Zielbewegung und bekannten äußeren Lasten aus. In der Praxis bedeutet dies, dass meist Bewegungen realer Testpersonen mit Hilfe von *motion-capture* Verfahren aufgezeichnet werden. Auch die Lasten werden mit speziellen Vorrichtungen gemessen bzw. abgeschätzt. Da die Bewegung somit kinematisch bereits eindeutig bestimmt ist, können die dazugehörigen dynamischen Größen (Beanspruchungen) sehr effizient durch direktes Auswerten der Bewegungsgleichungen berechnet werden. Obwohl das Verfahren in Simulationsumgebungen wie *OpenSim* (Delp et al. 2007) oder *Anybody* (Rasmussen et al. 2001) die Standardvorgehensweise darstellt und vor allem in Bewegungsmedizin und Sportwissenschaft weit verbreitet ist, ist die Anwendung in der Produktentwicklung nicht unproblematisch: Bei der Interaktion mit einem Produkt bewegt sich der Nutzer in einer bestimmten Weise, die einerseits von dessen Gewohnheiten und Körpereigenschaften abhängt, gleichzeitig aber auch ganz wesentlich durch die Gestalt und die physikalischen Eigenschaften des Produktes bestimmt wird. Gerade das Produkt liegt jedoch nur als virtueller Prototyp vor und ist der Testperson, deren Bewegung aufgezeichnet und analysiert wird, nicht zugänglich.

Zur Abbildung der Interaktion mit virtuellen Prototypen scheint der vorwärtsdynamische Ansatz geeigneter. Hierbei wird zunächst die Zahl der Freiheitsgrade des biomechanischen Modells durch die Definition von Zwangsbedingungen eingeschränkt. Dahinter steht die Erkenntnis, dass das Bewegungsziel nahezu immer darin besteht, das Endglied einer Extremität auf einer bestimmten Raumkurve zu führen. Überwiegend handelt es sich dabei um die Hand oder den Fuß. Beim Fahren eines PKW hat die Hand Kontakt mit dem Lenkrad und folgt dessen Bewegung, während die Füße die Pedale bedienen. Eine weitere Zwangsbedingung wäre nötig, um den Menschen auf dem Sitz zu fixieren. Da der menschliche Körper als dynamisches System vielfach unterbestimmt ist, existieren im Allgemeinen unendlich viele Möglichkeiten die Zielbewegung

auszuführen. Diesem Problem kann mittels Optimalsteuerung (Maas & Leyendecker 2010) begegnet werden. Hierbei werden die dynamischen Größen (Gelenkmomente) durch Lösen eines Optimierungsproblems berechnet. Die kinematischen Bewegungsgrößen folgen anschließend aus der Integration der Bewegungsgleichungen. Das Verfahren liefert also gleichzeitig die Zielbewegung und die Beanspruchungsgrößen. Die gefundene Bewegung hängt jedoch von der Wahl der bei der Optimierung verwendeten Kostenfunktionen und deren Gewichtung ab. Da das Bewegungsverhalten des Menschen bis heute nur ansatzweise verstanden ist, erfolgt die Auswahl der Kostenfunktionen prinzipiell willkürlich. Es ist also nicht garantiert, dass sich der Nutzer in der Realität auch wirklich wie angenommen bewegt. Zudem sind die algorithmischen Kosten des Simulationsverfahrens aufgrund der mehrfach notwendigen Integration der Bewegungsgleichungen enorm hoch.

3 Ansatz zur schnellen Konfiguration biomechanischer Simulationen

Im Folgenden wird ein Ansatz zur Integration von biomechanischen Simulationen in die Arbeitsumgebung des Produktentwicklers vorgestellt. Zielsetzung ist eine schnelle Konfiguration des Simulationsmodells zu ermöglichen, ohne dass vorher Versuche an realen Testpersonen durchgeführt werden müssen. Da Produkte selten nur für eine bestimmte Person entwickelt werden, müssen die Nutzer-Produkt Wechselwirkungen für mehrere Individuen der Zielgruppe analysiert werden, um eine statistische Aussage zu erhalten. Zusätzlich treten im Produktentwicklungsprozess immer wieder Iterationen auf, sodass unter Umständen eine sehr große Anzahl an Simulationen durchzuführen ist, was kurze Berechnungszeiten erfordert. Aus diesem Grund wird auf den *invers-dynamischen Ansatz* zurückgegriffen.

Kern des Verfahrens (vgl. Abbildung 3) ist ein kinematischer Dummy, der als Modul in die CAD/CAE-Entwicklungsumgebung integriert ist. Hierbei handelt es sich um ein vereinfachtes Menschmodell, welches ausschließlich die kinematische Struktur des Bewegungsapparates repräsentiert. Dieser Dummy interagiert mit

dem virtuellen Produktmodell. Hierzu werden ähnlich wie im Fall der Vorwärtsdynamik Zwangsbedingungen definiert, die jedoch Randbedingungen für ein *invers-kinematisches* Problem darstellen, das sich rechentechnisch nahezu unter Echtzeitbedingungen lösen lässt. Die generierte Bewegungssequenz wird zusammen mit äußeren Lasten über eine Datenschnittstelle an das biomechanische Modell übergeben. Die äußeren Lasten müssen aus anderen Simulationen der CAE-Umgebung gewonnen werden. Durch den kinematischen Dummy ist eine informationstechnische Abstraktion zwischen CAD/CAE - Umgebung und dem biomechanischen Simulationssystem realisiert, sodass keine Bindung an ein bestimmtes System vorliegt. Die Informationen zur Skalierung des Simulationsmodells werden aus einer Nutzerdatenbasis gewonnen, die sowohl Körpermaße als auch aufgezeichnete Bewegungssequenzen enthält. Ein Verfahren zur schnellen Datenerfassung wird in diesem Beitrag behandelt. Ebenso ist es aber auch möglich,

Abbildung 3: Ansatz zur Integration eines biomechanischen Modells in die CAD / CAE Umgebung

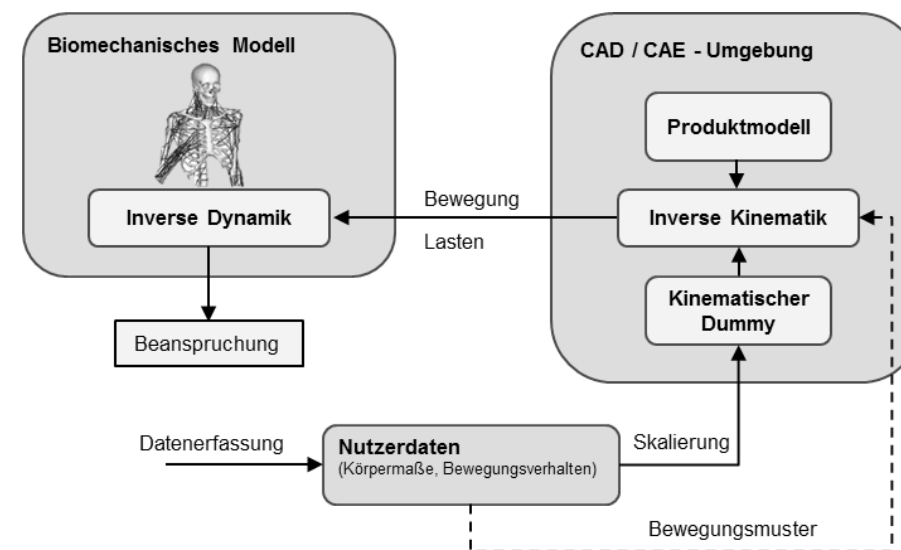




Abbildung 4: KINECT-Sensor (Microsoft)

bestehende Kataloge (vgl. EN ISO 7250) anzubinden. Zukünftig ist geplant, aufgezeichnete Bewegungsmuster aus der Datenbasis als Randbedingungen für den inversen Kinematiklöser einzusetzen, um den Realismus der generierten Bewegungen zu erhöhen. Nachfolgend werden zwei Teilaspekte des Ansatzes näher erläutert.

3.1 Schnelle Erfassung von Körpermaßen und Bewegungssequenzen

Bei medizinisch oder sportwissenschaftlich motivierten Bewegungsanalysen kommen meist markerbasierte optische Technologien zum Einsatz, um Körpermaße und Bewegung einer Testperson aufzuzeichnen. Obwohl die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren nicht in Frage gestellt werden kann, haben sie doch den Nachteil, sehr aufwändige Vorbereitungen zu erfordern. Das Kamerasystem muss kalibriert und die Testperson mit Markern präpariert werden. Im Jahr 2010 brachte die Firma *Microsoft* mit ihrem *KINECT-Sensor* (Abbildung 4) eine kostengünstige Tiefenbildkamera auf den Markt, die seitdem auch zunehmend in der Forschung Anwendung findet. Das für den Unterhaltungssektor konzipierte Gerät nutzt strukturiertes Infrarotlicht, um für jeden Bildpunkt zusätzlich eine Tiefenkoordinate zu berechnen. In Kombination mit der von der Firma *Prime Sense* veröffentlichten Bildverarbeitungsmiddleware *NITE* ist es möglich, menschliche Gestalten in den Bilddaten zu detektieren sowie die Position und räumliche Orientierung der Extremitäten zu extrahieren (Kühn 2011). Hierauf basierend wurde eine Software zur Erfassung von Körpermaßen und Bewegungssequenzen entwickelt, deren Funktionsweise im Folgenden erläutert wird.

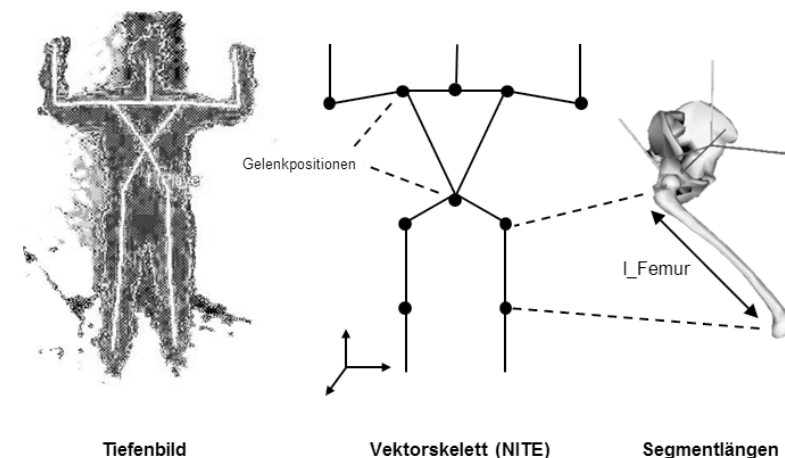


Abbildung 5: Segmentlängenbestimmung auf Grundlage von Tiefenbildern

Die Bestimmung von Körpermaßen kann unter Verwendung der NITE-Middleware einfach gelöst werden: Hat die Bildverarbeitung einen Menschen erkannt, werden die Positionen der Gelenke anhand der Körpersilhouette abgeschätzt und in einer entsprechenden Datenstruktur (Vektorskelett) bereitgestellt. Die Segmentlängen einer Extremität können anschließend einfach über die vektorielle Differenz der angrenzenden Gelenkpositionen bestimmt werden (Abbildung 5).

Gegenwärtig können so die Längen von Ober- und Unterschenkel, Rumpf, Kopf, sowie Ober- und Unterarm bestimmt werden. Auf Basis dieser Informationen können Skalierungsfaktoren berechnet werden, um ein biomechanisches Simulationsmodell an die Körpermaße eines bestimmten Individuums anzupassen. Jeder so erstellte Datensatz wird der Nutzerdatenbasis hinzugefügt und kann für spätere Analysen wiederverwendet werden.

Die Erfassung von Bewegungssequenzen basiert auf der Fähigkeit der NITE-Middleware, die räumliche Orientierung von detektierten menschlichen Extremitäten abzuschätzen und in Form einer Rotati-

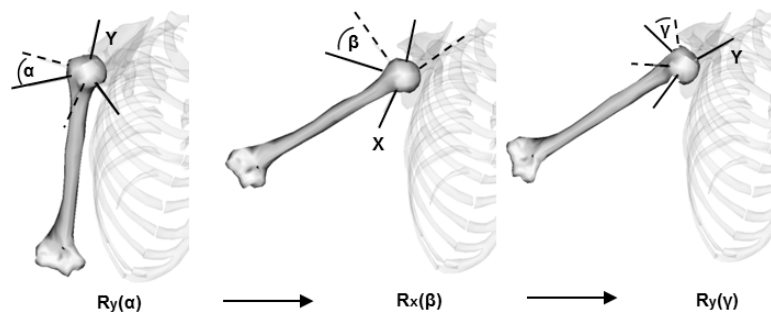


Abbildung 6: Euler-Rotationen des Schultergelenks

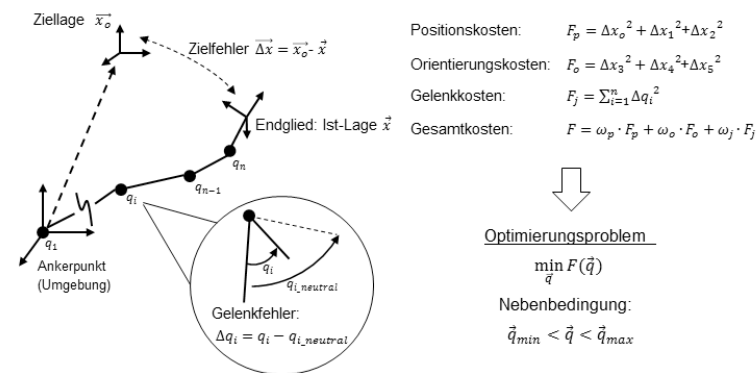


Abbildung 7: Lösen des inverskinematischen Problems durch Optimierung

onsmatrix zur Verfügung zu stellen. Bewegungen werden in Mehrkörpersimulationen jedoch in Form von Zeitfunktionen der generalisierten Koordinaten und nicht vektoriell durch Rotationsmatrizen ausgedrückt. Um die Übertragbarkeit auf ein biomechanisches Simulationsmodell zu gewährleisten, müssen die Orientierungen der Extremitäten in äquivalente Winkel der angrenzenden Gelenke umgerechnet werden. Dies soll am Beispiel des Oberarms (Abbildung 6) verdeutlicht werden: Die Orientierung des Oberarms gegenüber dem Rumpf wird durch das Schultergelenk festgelegt. Hierbei handelt es sich in erster Näherung um ein Kugelgelenk mit drei Frei-

heitsgraden, die durch drei aufeinanderfolgende Euler-Rotationen um zueinander senkrechte Achsen beschrieben werden können. Im vorliegenden Fall wird zunächst um die y-Achse, anschließend um die x-Achse und zuletzt nochmals um die nun neu orientierte y-Achse rotiert. Den einzelnen Rotationen sind die Eulerwinkel α , β und γ zugeordnet. Diese Rotationsreihenfolge lässt sich als das Produkt dreier Matrizen ausdrücken, die jeweils von einem der drei Eulerwinkel abhängen. Durch einen Vergleich der Produktmatrix mit der von der Bildverarbeitung ermittelten Orientierungsmatrix des Oberarms lassen sich die drei genannten Eulerwinkel bestimmen, welche als generalisierte Koordinaten die Bewegung des Schultergelenks beschreiben.

Mit Hilfe der entwickelten Software kann derzeit die Bewegung von Ellbogen-, Schulter-, Hüft- und Kniegelenk erfasst werden. Hierbei wird eine Bildwiederholfrequenz von 30 Hz erreicht.

3.2 Inverse Kinematik

Bei der Interaktion mit einem Produkt besteht das Bewegungsziel häufig darin, das Endglied einer Extremität auf einer vordefinierten Raumkurve zu führen, während der Körper sitzend oder stehend in der Umgebung verankert ist. Zwischen Endglied und Ankerpunkt entsteht so eine kinematische Kette, die von mehreren Körpersegmenten und den angrenzenden Gelenken gebildet wird. Diese Struktur ist im Allgemeinen mehrfach kinematisch unterbestimmt, d.h. es existieren unendlich viele Kombinationen der Gelenkwinkel, um das Endglied in die gewünschte räumliche Lage (Position und Orientierung) zu bringen. Da die Raumkurve, auf der das Endglied geführt wird als bekannt vorausgesetzt ist, kann die Bewegung des Nutzers durch Lösen eines inverskinematischen Problems bestimmt werden. Hierzu ist für jeden Punkt auf der Raumkurve ein Satz von Gelenkwinkeln zu bestimmen, der einerseits das Endglied in die vorgegebene Position und Orientierung überführt und andererseits ein möglichst natürliches Bewegungsmuster erzeugt. Inverskinematische Probleme können u.a. durch nichtlineare Optimierung (Krzysztof 2008) gelöst werden. Anhand von Abbildung 7 soll die Anwendung des Verfahrens zur Simulation menschlicher Bewegungen erläutert werden.

Die kinematische Kette zwischen Ankerpunkt und Endglied bestehe aus mehreren Segmenten, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Die Freiheitsgrade der Gelenke entsprechen den generalisierten Koordinaten des Systems und werden hier als Gelenkwinkel bezeichnet. Jeder Satz von Gelenkwinkeln q führt zu einer eindeutig bestimmbaren Ist-Lage des Endgliedes. Der gegenüber der vorgegebenen Ziellage bestehende Fehler wird als eine zu minimierende Größe betrachtet. Hierzu ist es notwendig den vektoriellen Zielfehler als reellwertige Kostenfunktion in Abhängigkeit der generalisierten Koordinaten zu formulieren. Da die Funktion nichtlinear ist, muss das Optimierungsproblem numerisch, z.B. mit Hilfe gradientenbasierter Verfahren gelöst werden. Es ist die Nebenbedingung zu beachten, dass alle Gelenkwinkel innerhalb ihrer physiologisch bedingten liegen. Um mehr Kontrolle über die Lösung zu erhalten, wird die Kostenfunktion in drei unterschiedlich gewichtete Summanden unterteilt. Während durch die Minimierung der Positions- und Orientierungskosten der Zielfehler im Idealfall verschwindet, dienen die neu eingeführten Gelenkkosten der Eingrenzung des Lösungsraumes. Die Gelenkkosten beschreiben die summierten quadratischen Abweichungen aller Gelenke von ihren Neutralstellungen. Eine Minimierung führt dazu, dass die Bewegung tendenziell mit Gelenkbewegungen nahe der Ruhelage ausgeführt wird. Ohne dieses zusätzliche Kriterium hätte die Kostenfunktion aufgrund der kinematischen Unterbestimmtheit des Systems kein globales Minimum. Wird das Optimierungsproblem für jeden Punkt der Raumkurve gelöst, erhält man als Ergebnis die gesuchten Zeitfunktionen der Gelenkwinkel.

Das beschriebene Verfahren wurde für einen menschlichen Arm als MATLAB-Programm implementiert. Neben dem eigentlichen inversen Kinematiklöser gehört hierzu auch der kinematische Dummy (Abbildung 3) zur Beschreibung der kinematischen Struktur des Armes. Er wird dazu benötigt, die Ist-Lage der Hand (Endglied) zu berechnen. Die Interaktion mit dem Produkt erfolgt durch Definition einer entsprechenden Raumkurve für die Hand.

4 Simulation einer Lenkbewegung

Zur Demonstration des vorgestellten Ansatzes wird die Bedienung eines Lenkrades betrachtet. Ziel ist, die bei der Ausführung der Lenkbewegung in den Gelenken des Armes wirksamen Drehmomente zu bestimmen. Der Einfluss der Muskulatur wird vorerst vernachlässigt.

4.1 Modellaufbau

Das verwendete Simulationsmodell (Abbildung 8) wurde mit Hilfe der freien Simulationsumgebung *OpenSim* erstellt. Es basiert auf dem Modell der oberen Extremitäten nach (Holzbaur et al. 2005). Es wird angenommen, dass die Lenkbewegung nur mit dem rechten Arm ausgeführt wird. Dieser ist als kinematische Kette mit sieben Freiheitsgraden modelliert. Ferner ist der Torso durch sechswertige Auflager fest mit der Umgebung verbunden, d.h. es werden keine Relativbewegungen gegenüber dem Fahrersitz zugelassen. Die Segmentlängen des Modells entsprechen denen eines 1,78 m großen Mannes und wurden mittels der unter 3.1 beschriebenen Methodik ermittelt. Es ist zu beachten, dass das in Abbildung 8 dargestellte Lenkrad (Produkt) kein Bestandteil des biomechanischen Simulationsmodells ist, sondern lediglich zur Visualisierung der Sitzposition dient.

Gemäß dem vorgestellten Ansatz, wird eine Abstraktion von biomechanischer Simulation und Produktmodell verfolgt. Demnach sind alle dem Produkt zugeschriebenen Eigenschaften, nämlich Sitzposition sowie Größe und Neigungswinkel des Lenkrades, als Teil des kinematischen Dummys implementiert. Im konkreten Fall bedeutet dies, dass eine Raumkurve für die Hand definiert wurde, deren relative Lage zum Torso des Dummys der Konfiguration von Lenkrad und Sitz entspricht. Die Orientierung der Hand gegenüber dem Lenkrad wurde hierbei wie in Abbildung 9 dargestellt gewählt. Während der Bewegung soll das Lenkrad um 45° in Fahrtrichtung nach links gedreht werden, wofür eine Dauer von 1,5 s angenommen wird. Der Raumkurve wurde ein sinoidenförmiges Geschwindigkeitsprofil aufgeprägt. Dies bedeutet, dass das Lenkrad zunächst beschleunigt und anschließend bis zum Stillstand abgebremst wird.

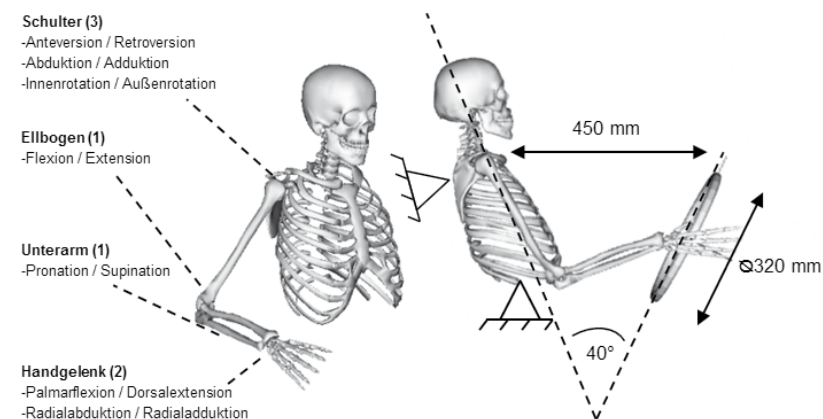


Abbildung 8: Simulationsmodell (links: Freiheitsgrade, rechts: Sitzposition)

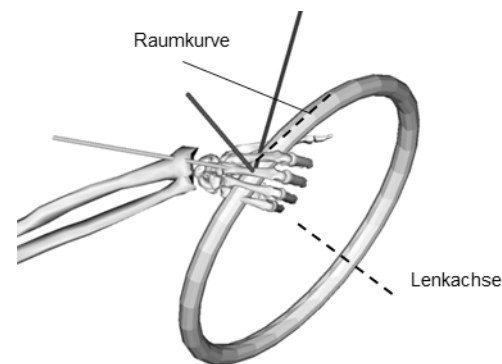


Abbildung 9: Definition der Zielbewegung durch eine Raumkurve (kinematischer Dummy)

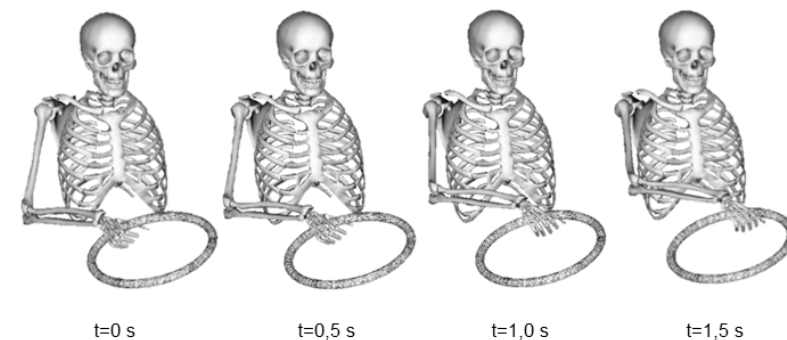


Abbildung 10: Berechnete Bewegungssequenz

4.2 Ergebnisse

Auf einer Intel i5 CPU betrug die Berechnungszeit für die betrachtete Lenkbewegung weniger als eine Sekunde. Die mit Hilfe der inversen Kinematik gefundene Bewegungssequenz ist in Abbildung 10 dargestellt. Durch die gegenüber den Positionskosten geringe Gewichtung der Orientierungskosten, wurde eine weiche Kopplung von Hand und Lenkrad erreicht. Dies bedeutet, dass die Hand zwar immer auf dem Lenkrad positioniert bleibt, jedoch die vorgegebene Orientierungsbedingung nicht exakt einhält, wodurch eine unnatürlich starke Beugung der Gelenke vermieden wird.

Abbildung 11 zeigt die mit Hilfe der inversen Dynamik bestimmten, vorzeichenbereinigten Zeitverläufe der Gelenkmomente für Schulter, Ellbogen, Unterarm und Handgelenk. Die Kurvenwerte zum Zeitpunkt $t = 0$ entsprechen den statischen Haltemomenten zur Überwindung der Gravitation. Da keine äußeren Lasten berücksichtigt wurden (insbesondere kein Rückstellmoment der Lenkung), geben die Kurven lediglich die innere Beanspruchung wieder, die sich beim Beschleunigen und Abbremsen des Armes einstellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Biomechanische Simulationen sind ein leistungsfähiges Werkzeug zur menschenzentrierten Gestaltung von Produkten. Im vorliegenden Beitrag wurde ein Ansatz zur Integration eines beliebigen biomechanischen Simulationssystems in die Arbeitsumgebung des Produktentwicklers vorgestellt. Der Ansatz basiert auf einer informationstechnischen Abstraktion der Biomechanik von der CAD/CAE-Umgebung bzw. dem Produktmodell. Die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Nutzer werden mit Hilfe eines inverskinematischen Verfahrens abgebildet, das die Realität nur vereinfacht wiedergibt, jedoch den Vorteil besitzt, unter Echtzeitbedingungen berechenbar zu sein. Hierdurch lässt sich in vertretbarer Zeit eine große Anzahl an Simulationsläufen realisieren, was insbesondere zur Generierung statistischer Aussagen erforderlich ist. Weiterhin wurde ein auf Bildverarbeitung basierendes Verfahren zur Erfassung von Körpermaßen und Bewegungssequenzen vorgestellt. Dieses ermöglicht, mit geringem Aufwand eine Nutzerdatenbasis

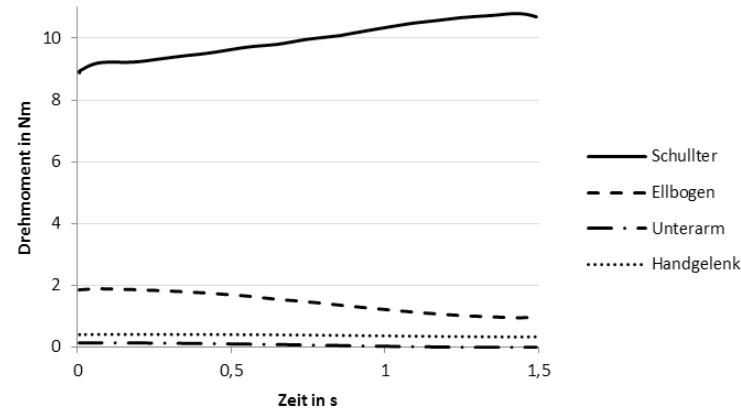


Abbildung 11: Zeitverläufe der Gelenkmomente

aufzubauen und zu pflegen, welche die Grundlage jeder mensch-zentrierten Produktentwicklung ist. Ziel des vorgestellten Ansatzes ist es, den Konfigurationsaufwand biomechanischer Simulationen zu reduzieren und diese so einem breiteren Anwenderkreis zugänglich zu machen. Gegenwärtig gehen noch keine Informationen über das Bewegungsverhalten realer Nutzer in die Berechnung der inversen Kinematik ein. Um den Realismus der generierten Bewegungssequenzen zu erhöhen, werden zukünftig aufgezeichnete Bewegungsmuster genutzt, um das Verhalten des Kinematiklösers zu beeinflussen. Darüber hinaus müssen Methoden entwickelt werden, um die bestimmten Beanspruchungsgrößen sinnvoll in den Produktentwicklungsprozess zurückfließen zu lassen.

Literaturverzeichnis

- Maguire, M. 2001: Methods to support human-centered design. In: International Journal of Human-Computer Studies, 55 (4), 587–634
- Delp, S. et al. 2007: OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. In: IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 54 (11), 1940–1950
- Grujicic, M. et al. 2010: Design-optimization and material selection for a femoral-fracture fixation-plate implant. In: Materials and Design, 31 (7), 3463–3473

- Rasmussen, J. et al. 2003: Musculoskeletal modelling as an ergonomic design method. International Ergonomics Association XVth Triennial Conference. Seoul
- Maas, R. & Leyendecker, S. 2010: Structure preserving optimal control simulation of index finger dynamics. The First Joint International Conference on Multibody System Dynamics IMSD. Lappeenranta, Finland
- Kühn, T. 2011: The Kinect Sensor Platform. In: Steinbach, E. (Hrsg.): Advances in Media Technology, Visuelle Umgebungsmodellierung für Robotik- und Spieleanwendungen, 1–4, München: Technische Universität München
- Krzysztof, Z. 2008: Solving IK problems for open chains using optimization methods. International Multiconference on Computer Science and Information Technology. Wisla, Poland
- Holzbaur, K. et al. 2005: A model of the upper extremity for simulating musculoskeletal surgery and analyzing neuromuscular control. In: Annals of Biomedical Engineering, 33 (6), 829–840

Kontakt

Dipl.-Ing. Daniel Krüger
 Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 91058 Erlangen
www.mfk.uni-erlangen.de

Cutane Mikrogewebspartikel – Lösungsansätze für eine neue Technologie zur Behandlung Schwerbrandverletzter

1 Problemstellung

Jährlich werden in Deutschland etwa 15.000 Patienten mit thermischen Verletzungen stationär behandelt, davon etwa 1.400 Fälle mit schweren und schwersten Verbrennungen intensivmedizinisch in spezialisierten Verbrennungszentren. 20-30% der Patienten sind Kinder. Obwohl die Überlebenswahrscheinlichkeit auch von Patienten mit schwersten thermischen Verletzungen (80 %-90 % verbrannte Körperoberfläche, vKOF) in den letzten Jahrzehnten deutlich erhöht werden konnte, liegt die Sterblichkeitsrate noch immer bei ca. 20 %. (Hartmann & Ottomann 2009, Pallua & von Bülow 2006)

Die chirurgische Standardtherapie zur Behandlung thermischer Verletzungen der Grade IIb und III besteht in der Entfernung der irreversibel geschädigten Haut (Nekrosektomie) und der sofortigen, permanenten Deckung der Wundflächen durch körpereigene (autologe) Haut. Studien haben gezeigt, dass eine frühzeitige Nekrosektomie die Überlebensrate Schwerbrandverletzter signifikant steigert (Burke et al. 1974). Da bei großflächigen thermischen Verletzungen jedoch keine ausreichend großen Spenderareale zur Gewinnung autologer Transplantate zur Verfügung stehen, kommen andere, kostenintensive und weniger effektive Verfahren des Hautersatzes

zum Einsatz. Dabei handelt es sich um verschiedene synthetische oder biologische temporäre Hautersatzmaterialien sowie gezüchtete autologe Keratinozytentransplantate. Keines der angewandten Verfahren ist jedoch derzeit in der Lage, eine dauerhafte Wiederherstellung der normalen Funktion der Haut zu ermöglichen. Das Problem der frühestmöglichen, dauerhaften Deckung kann trotz intensiver Forschungen auf dem Gebiet des Tissue Engineering bisher nur durch autologe Spalthaut sicher gelöst werden (Vogt et al. 2007).

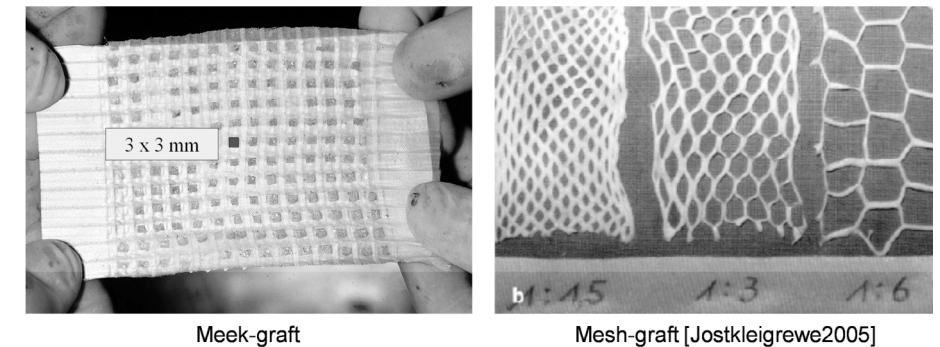
Ziel des Projektes ist daher die Verbesserung der Behandlung von Schwerbrandverletzten durch die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Generierung autologer Transplantate mit maximaler Flächenvergrößerung durch die Anwendung von Mikrogewebspartikeln.

2 Stand der Technik

Um eine Expansion von patienteneigener Spenderhaut zu erreichen, wurde seit Beginn des 20. Jahrhunderts eine Vielzahl an Methoden entwickelt, die zwar im Rahmen tierexperimenteller Studien und Einzelfällen zum Einsatz gekommen sind, aber nie in die klinische Praxis, insbesondere der Behandlung Schwerstbrandverletzter, übernommen wurden. Eine Ursache dafür ist möglicherweise die Tatsache, dass wesentliche biologische Parameter bezüglich der Wundheilung nicht oder nur unzureichend bekannt sind. Diese sind aber für eine optimale Herstellung von Hauttransplantaten notwendig.

Gegenwärtig finden bei der Behandlung von Brandverletzten im europäischen Raum zwei Verfahren zur Expansion von Spalthaut maßgeblich Anwendung. Grundlage bei beiden Verfahren ist die Entnahme der körpereigenen Haut mit speziellen Dermatomen in einer Dicke von 0,2 mm bis 0,4 mm. Im Anschluss wird die entnommene Eigenhaut mechanisch bearbeitet und expandiert auf die Wundfläche appliziert. Dabei basiert das Mesh-Verfahren nach Tanner und Vandeput auf der Erzeugung einer Gitterstruktur in der Spalthaut und deren Aufweitung zu einem Gitternetz. Bei der Methode nach Meek wird die Spalthaut in quadratische Partikel der Größe 3×3 mm zerteilt und mit Hilfe eines vorgefalteten Trägermaterials expandiert (siehe Abbildung 1 und 2, Kreis et al. 1994). Die

Abbildung 1: Verfahren zur Expansion autologer Spalthaut



Wundheilung erfolgt durch Schließen der Transplantatzwischenräume ausgehend von den Transplantaträndern durch sekundäre Epithelisierung.

Technisch sind mit beiden Verfahren Expansionen von 1,5:1 bis 9:1 möglich. Eine Erhöhung der Expansion führt zu einer Vergrößerung der Transplantatzwischenräume und bedingt damit längere Wundheilungsdauern. Eine Expansion $> 4:1$ wird daher nur in Ausnahmefällen angewandt, da sowohl die funktionellen als auch ästhetischen Ergebnisse aufgrund der langen Epithelisierungsdauer unbefriedigend sind.

Bei kleinen Expansionen wird in der klinischen Praxis überwiegend das Mesh-Verfahren eingesetzt. Die das Projekt begleitenden Mediziner begründen diesen Umstand damit, dass die Transplantate einfacher und schneller herzustellen sind. Weiterhin ist weniger Personal während der Operation bzw. Transplantation erforderlich. Die Handhabung von Mesh-Transplantaten wird jedoch mit zunehmender Expansion schwieriger (»Spaghetti«). Werden Expansionen größer als 4:1 notwendig, kommt häufig das aufwendigere Meek-Verfahren zum Einsatz. Beim Meek-Verfahren wird bedingt durch die Technologie immer ein zweites Operationsteam benötigt. Der grundlegende medizinische Vorteil des Meek-Verfahrens bei großen Expansionen ergibt sich aus der Art der Expansion und ermöglicht, dass die entstehenden Transplantatabstände gegenüber dem Mesh-Verfahren bei gleicher Expansion deutlich geringer sind.

3 Zielsetzung

Im mathematischen Ansatz des Meek-Verfahrens zeigt sich, dass eine Erhöhung der Expansionsrate bei gleichbleibenden oder verringerten Partikelabständen nur durch eine Reduzierung der Partikelgröße möglich ist. Beispielsweise kann ausgehend von den bisherigen Transplantatabständen des Meek-Verfahrens bei einer Expansionsrate von 1:4 durch eine Reduzierung der Partikelgröße auf 1 mm × 1 mm bei annähernd gleichbleibendem Partikelabstand die Expansionsrate theoretisch auf 1:15, bei einer Partikelgröße von 0,5 mm × 0,5 mm sogar auf 1:50, erhöht werden (Abbildung 2). Umgekehrt reduziert sich unter Beibehaltung der Expansionsrate von 1:4 durch eine Verkleinerung der Partikel auf 1 mm × 1 mm der bisherige Partikelabstand um ca. 60 %.

Es wird daher davon ausgegangen, dass sich mit diesem Szenario des Einsatzes von »Mikrogewebspartikeln« sehr gute medizinische Ergebnisse mit schnellen Heilungsraten und verringerter Narbenbildung erzielen lassen.

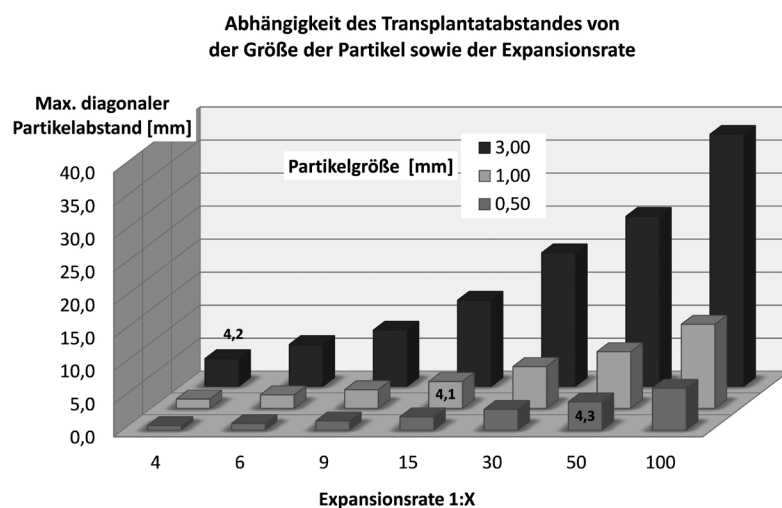


Abbildung 2: Diagonaler Partikelabstand in Abhängigkeit von Partikelgröße und Expansionsrate

Für die Erarbeitung eines technischen Konzeptes zur Realisierung einer Transplantationstechnologie auf der Basis von Mikrogewebspartikeln sind die folgenden drei operativen Schritte umzusetzen:

- Herstellung der Mikrogewebspartikel
- Expansion der Mikrogewebspartikel
- Transplantation der Mikrogewebspartikel

Eine wesentliche medizinische Anforderung bei der Herstellung ist dabei die Reduzierung bzw. Vermeidung der Schädigung der Mikrogewebspartikel. Das ist notwendig, um eine größtmögliche Vitalität und damit Proliferationsfähigkeit der Partikel zu erhalten. Die anschließende Expansion der Partikel sollte regelmäßig erfolgen. Postoperativ muss die Methode der Transplantation eine Wundbegutachtung bzw. einen frühzeitigen Verbandswechsel ermöglichen, ohne einen Verlust der Transplantate zu verursachen.

Folgende wesentliche Hauptanforderungen für eine neue Technologie zur Behandlung Schwerbrandverletzter können zusammengefasst werden:

- Vermeidung einer Gewebeschädigung in allen Schritten der zu realisierenden Prozesskette
- sicherer und genauer bzw. reproduzierbarer Verfahrensablauf/Prozess, insbesondere Erreichung der gewünschten Expansion
- Variabilität in der Expansion (und Partikelgröße)
- sichere und leichte Handhabbarkeit der Transplantate
- sichere und einfache Bedienbarkeit der Gerätetechnik
- Integration in den Operationsablauf sowie die Operationsumgebung, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Restriktionen
- Sterilisierbarkeit der Komponenten, welche Kontakt zur Spenderhaut oder sterilem Personal haben
- Erfüllung der gesetzlichen und normativen Anforderungen
- Reduzierung von Kosten bzw. Rechtfertigung von Mehrkosten durch Verbesserung von Behandlungsergebnissen (Nachweis der medizinischen Leistungsfähigkeit, Barz & Engelmann 2011)

4 Lösungsansätze und Realisierung

Die Herstellung der Mikrogewebspartikel erfordert ein geeignetes Verfahren zum Trennen des Gewebes in die gewünschte Form. Wesentliche Hauptanforderung an ein derartiges Verfahren ist die Vermeidung einer Gewebeschädigung, insbesondere an den Schnittträndern. Alle bisherigen, im klinischen Alltag zum Einsatz kommenden, Techniken arbeiten mit mechanischen Schneidwerkzeugen. Vordergründig werden Messerwalzen genutzt. Bei diesen handelt es sich um sterilisierbare Mehrwegprodukte mit einer, im Vergleich zu geschliffenen Schneiden von Skalpellern, relativ breiten Schneidkante. Ein erster Arbeitsschritt bestand daher, u. a. in der Untersuchung des Einflusses der Schneidfähigkeit mechanischer Werkzeuge auf die Vitalität und die Reepithelisierung der erzeugten Partikel.

Unter der Nutzung von mechanischen Schneidwerkzeugen wurden bzw. werden verschiedene Lösungskonzepte untersucht. Diese können in Bezug auf die Gleichförmigkeit der entstehenden Partikel in ein definiertes und undefiniertes Trennen unterschieden werden. Die Lösungsmöglichkeiten differenzieren dabei sowohl hinsichtlich der Schneidenform, Schneidenkontur und der Anzahl der Schneiden der verschiedenen Werkzeuge als auch in Bezug auf die angewandte Schnittart. Für alle Konzepte ergeben sich folgende Hauptanforderungen:

- Vermeidung bzw. Reduzierung einer Gewebeschädigung, durch entsprechend hohe Schneidfähigkeit (»Schärfe«)
- hohe Standzeit/ Schneidhaltigkeit der Werkzeuge im zeitlichen Rahmen der Operation (Auslegung als geschliffene Einwegprodukte)
- Flexibilität der Partikelgröße
- Minimierung von Werkzeugkosten bzw. zusätzlich notwendiger Verbrauchs- bzw. Verschleißmaterialien
- einfache Handhabung ohne Gefährdung des Personals

Eine wichtige Anforderung an das Herstellungskonzept ist die Erzielung einer hohen Flexibilität hinsichtlich der herstellbaren Partikelgröße. Dabei sollte nicht nur die Notwendigkeit des generellen Vorhaltens spezifischer Werkzeuge für einzelne Transplantatsze-

narien, sondern auch die Notwendigkeit eines Werkzeugwechsels im Operationsverlauf vermieden werden. Der Operateur soll in der Lage sein, die betroffenen Körperregionen entsprechend ihrer differenzierenden Anforderungen (z. B. kosmetisch wichtige oder funktionell sensible Bereiche) mit den notwendigen Transplantaten, bei Bedarf auch abweichend von der präoperativen Planung, versorgen zu können. Eine Variation der Partikelgröße innerhalb eines Transplantates stellt dabei das zu erzielende Optimum dar. Eine Problematik bei der Nutzung mechanischer Schneiden zur Zerkleinerung stellt das Anhaften der feuchten Spalthaut an den Schneiden dar. Ein möglicher Ansatz zur Lösung dieses Problems, ist die Nutzung ultraschallerregter Klingen. Durch die hochfrequente Oszillation, kann die notwendige Schnittkraft deutlich reduziert und die Standzeit des Schneidwerkzeuges erhöht werden. Gleichzeitig wird ein Anhaften der Spalthaut vermieden.

Ein Verfahren zum undefinierten Trennen durch mechanische Schneidwerkzeuge stellt das Mixen der Spalthaut mittels rotierender Schneidmesser dar. Da sich am Markt verfügbare Standardgeräte als ungeeignet für aussagekräftige Ergebnisse erwiesen, wurde ein eigenes Versuchsgerät konstruiert und gefertigt. In diesem kommen als Schneidwerk herkömmliche Skalpellmesser zum Einsatz, welche durch eine einfache Mechanik auf der Messerwelle positioniert und ausgetauscht werden können. Die Kühlung der Haut während des Trennprozesses, erfolgt durch die Zugabe von gekühlter, steriler Kochsalzlösung. Die durchgeführten Versuche zeigen die prinzipielle Machbarkeit. Die Technik erscheint zunächst von der Handhabung sehr einfach und lässt sich insbesondere im Hinblick auf die zeitlichen Restriktionen gut in den vorgegebenen Operationsablauf einbinden. Problematisch ist jedoch, dass eine Abhängigkeit der Partikelgröße von der Prozessdauer nur unzureichend definiert werden kann. Ebenso ist eine homogene Partikelgröße nicht für alle Partikelgrößen erreichbar. Damit ist die für die operative Planung notwendige Prozesssicherheit nicht gegeben. Weiterhin ist die Schädigung der Partikel insbesondere bei geringen Partikelgrößen höher. Aus diesen Gründen wird, in Abstimmung mit den das Forschungsprojekt begleitenden Medizinern, das Verfahren des Mixens von Haut gegenwärtig nicht weiterbearbeitet.

Einen völlig neuen Ansatz stellt das Abtragen mittels Laserstrahl dar. Die Technologie der Ultrakurzpulslaser ermöglicht das »kalte« Laserschneiden temperaturempfindlicher Materialien und wird bereits vielfältig in der refraktiven Chirurgie eingesetzt. Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit einer sowohl in Größe als auch Form vollkommen variablen Generierung von Gewebspartikeln ohne Wärmeinfluss und entsprechender Gewebeschädigung.

Im Projekt wird dafür ein Femtosekundenlaser genutzt. Da es nicht möglich war die Lasertechnik in einer sterilen Umgebung zu installieren, mussten für die Durchführung von ersten Versuchen spezielle Versuchskammern entwickelt werden. Diese ermöglichen eine sterile Bearbeitung der Spalthautproben bei gleichzeitig sehr guter optischer Qualität des Strahlganges. Ziel erster Versuche ist zunächst die Charakterisierung der Ablation von Hautgewebe durch Parameterstudien, um im Folgenden ein geeignetes Parameterset zur Erzielung der notwendigen Schnitttiefe bei gleichzeitig zeitlicher Optimierung des Prozesses (Maximierung der Ablationstiefe bzw. Reduzierung der notwendigen Schnitanzahl) ohne thermische Schädigung zu erarbeiten. Dabei ergaben sich in ersten Versuchen zwei grundlegende Probleme im Prozess:

- Probleme bei der Fokussierung durch starke Inhomogenitäten der Haut
- Austrocknung der Haut während der Prozessdurchführung

Ein späterer Einsatz im OP bedingt eine hohe Prozesssicherheit. Eine Definition einzuhaltender Rahmenparameter hinsichtlich der Qualität der gewonnenen Spalthaut ist aufgrund der biologische Variabilität und des Entnahmeverfahrens kaum möglich. Im Folgenden ist es daher notwendig, den Einfluss verschiedener Faktoren (z. B. Feuchtigkeit der Haut, Dickenunterschiede und Welligkeit der Hautoberfläche) sowie die Toleranzen der einzelnen Laserparameter zu ermitteln und gezielt aufeinander abzustimmen.

Prinzipiell kann die Aussage getroffen werden, dass bezüglich des ersten operativen Schrittes, die Herstellung der Mikrogewebspartikel, sowohl mechanische Schneidtechniken als auch die Lasertechnik

genutzt werden können. Die Problematik bei der Auswahl bzw. Weiterentwicklung erster geeigneter Konzepte besteht gegenwärtig darin, dass wesentliche, sowohl die Wundheilung als endgültige Zielgröße, als auch die Technologie beeinflussende, biologische Parameter nicht oder nur unzureichend bekannt sind. Dies sind:

- die biologisch minimale sinnvolle Partikelgröße und
- die Lage der Partikel zum Wundgrund

Beide Eigenschaften könnten, in Bezug auf ihre im Hinblick auf eine bestmögliche Wundheilung anzustrebende Ausprägung, eine die Technologie wesentlich bestimmende Restriktion darstellen. Für den Einfluss der Partikelgröße muss angenommen werden, dass sich die Epithelisierungspotenz der Partikel ab einer definierten minimalen Partikelgröße gegenläufig zu den erzielten Vorteilen der Reduzierung der Partikelabstände durch Minimierung der Größe verhalten wird. Dabei könnte die Größe der Partikel gleichzeitig einen Einfluss auf die notwendige Lage der Partikel zum Wundgrund besitzen. Zu beiden Fragestellungen finden sich in der Literatur differenzierte Aussagen.

Eine Beantwortung dieser medizinischen Fragestellungen kann jedoch nur durch in-vivo-Versuchsdurchführungen erfolgen. Daher waren sehr früh im Entwicklungsprozess erste Tierversuche notwendig, welche zunächst mit einem einfachen Versuchsaufbau zur Evaluierung von Technik und Tiermodell in kleiner Zahl durchgeführt wurden. Für eine Verifizierung der ersten Versuchsergebnisse war es notwendig eine Folgesystem zu entwickeln und zu fertigen, mit welchem eine deutlich reduzierte Herstellungszeit der Transplantate erreicht werden kann. Grundlage dafür waren u. a. die Erfahrungen aus den ersten Tierversuchen. Das System ermöglicht eine automatisierte und reproduzierbare Herstellung der verschiedenen Transplantate. Dazu wird die Spalthaut mittels eines Stanzwerkzeuges geschnitten und entsprechend dem Transplantatszenario geometrisch und lagerichtig definiert abgelegt. Aufgrund der geringen Formstabilität derart kleiner Hautpartikel sowie der starken Adhäsionsneigung war die Hauptproblematik dabei die Realisierung einer prozesssicheren und gewebeschonenden automatisierten Handhabung der Partikel.

Die Herstellung und Expansion von Mikrogewebspartikeln mit einer derartigen automatisierten Handhabungstechnologie ist sehr aufwändig und trotz der hohen Verfahrensgeschwindigkeiten sehr zeitintensiv. Das Konzept basiert jedoch auf der Idee, individuelle Transplantate zu erzeugen, deren Aufbau sich ausschließlich an den spezifischen Gegebenheiten der Wundgeometrie sowie der Körperregion orientiert. Dazu ist es notwendig mittels geeigneter Bodyscanning-Technologien, einen 3D-Datensatz der geschädigten Körperteile des Patienten zu erzeugen. Diese ermöglichen es, in Verbindung mit einer Flächenrückführungssoftware maßgeschneiderte Transplantate, etwa für Gelenkregionen, zu generieren. Hierbei kann der Operateur, je nach funktionellen und ästhetischen Erfordernissen, die Größe der Mikrogewebspartikel und die Expansionsrate variieren. Somit werden die vorhandenen Ressourcen an Spalthaut optimal genutzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Nach dem gegenwärtigen Stand der Arbeiten kann aus ersten Versuchsreihen belegt werden, dass die Nutzung cutaner Mikrogewebspartikel einen Lösungsansatz für die bessere Versorgung Schwerbrandverletzter darstellen kann. Die mechanisch hergestellten und transplantierten Gewebepartikel sind vital und besitzen eine entsprechende Proliferationspotenz. Die mechanische Herstellung eignet sich gut, um die noch offenen medizinischen Fragestellungen in fortführenden Tierversuchen zu beantworten und erlaubt einen Vergleich zur bisher angewandten Meek-Technik.

Hinsichtlich des umzusetzenden Lösungskonzeptes bezüglich der Herstellung der Mikrogewebspartikel für den späteren OP-Einsatz, sind sowohl eine mechanische Lösung, als auch ein Trennen mittels Lasertechnologie denkbar. Ein Nachteil der mechanischen Lösung besteht in der geringeren Flexibilität gegenüber der Lasertechnik. Durch die hohe Flexibilität dieses Wirkprinzips ist es möglich, maßgeschneiderte Transplantate zu generieren. Eine Voraussetzung dafür ist die Lösung der im Punkt 4 aufgeführten Probleme. Mit der Lasertechnik können bei gleichzeitig guten funktionellen und ästhetischen Ergebnissen, die vorhandenen Ressourcen an Spalthaut,

nach dem gegenwärtigen Stand der Bearbeitung des Projektes, optimal genutzt werden. Dies wiederum kann bedeuten, dass weniger Operationen notwendig sind und die Verweilzeit in medizinischen Einrichtungen verkürzt werden kann. Eine gesicherte Aussage, welches Wirkprinzip die Grundlage für die Herstellung von Hauttransplantaten aus cutanen Mikrogewebspartikel unter OP-Bedingungen ist, kann erst nach der eindeutigen Klärung aller die Technologie beeinflussenden biologischen Parameter getroffen werden. Bezüglich des zweiten erforderlichen operativen Schrittes, der Expansion der erzeugten cutanen Mikrogewebspartikel, wurden verschiedene Lösungskonzepte erarbeitet. Dies erfolgte parallel zur Erarbeitung von Lösungen für ein geeignetes Verfahren zum Trennen des Gewebes. Welches Lösungsprinzip alle in Bezug auf die bei der Expansion zu realisierenden Anforderungen erfüllt, hängt wiederum wesentlich von der Klärung der biologischen Parameter ab. Von großer Bedeutung ist hierbei eine gesicherte Aussage über die erforderliche Lage der Partikel zum Wundgrund. Weiterhin ist es von dem gewählten Lösungskonzept zur Herstellung der Mikrogewebspartikel abhängig. Technisch ist es aber möglich, für alle Szenarien Lösungen zum späteren OP-Einsatz zu generieren. Gegenwärtig befinden sich erste Lösungsprinzipien in der Entwicklungsphase. Es ist geplant, diese im Zuge der Durchführung von weiteren Tierversuchen zu testen. Dadurch soll es möglich sein, frühzeitig Aussagen zur Prozesssicherheit der einzelnen Lösungskonzepte treffen zu können.

Literaturverzeichnis

- Barz, I. & Engelmann, F. (2011): Die effektive Behandlung großflächiger thermischer Verletzungen – eine medizinisch-technische und wirtschaftliche Herausforderung. In: Brökel, K.; Stelzer, R.; Feldhusen, J.; Rieg, F. & Grote, K.-H. (Hrsg.): KT 2011 – 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011. Integrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt, Aachen: Shaker-Verlag, S. 180–187
- Burke, J. F.; Bondoc, C. C. & Quinby, W. C. 1974: Primary burn excision and immediate grafting: a method shortening illness. In: The Journal of Trauma, 14 (5), 389–395
- Hartmann, B. & Ottomann, Ch. 2009: Chirurgische Therapie von Erwachsenen. In: Kamolz, L.-P.; Herndon, D. N. & Jeschke, M. G. (Hrsg.): Verbrennungen – Diagnose, Therapie und Rehabilitation des thermischen Traumas, Wien: Springer-Verlag, S. 73–87

- Jostkleigrew, F. 2005: Behandlungsstrategien bei Brandverletzungen. In: Trauma Berufskrankh, 7, S. 185–193
- Kreis, R. W.; Mackie, D. P.; Hermans, R. R. & Vloemanns, A. R. 1994: Expansion techniques for skin grafts: comparison between mesh and meek island (sandwich) grafts. In: Burns, 20, 39–42
- Pallua, N. & von Bülow, S. 2006: Behandlungskonzepte bei Verbrennungen – Teil II: Technische Aspekte. In: Chirurg, 77, 179–188
- Vogt, P. M.; Kolokythas, P.; Niederbichler, A.; Knobloch, K.; Reimers, K. & Choi, C. Y. 2007: Innovative Wundtherapie und Hautersatz bei Verbrennungen. In: Chirurg, 78, 335–342

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Engelmann
Ines Barz, M. Sc.
Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena
Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen
Carl-Zeiss-Promenade 2
07745 Jena
www.wi-konstruktion.fh-jena.de

Tibor Bercsey & György Gyurecz

Surface Shape Correction by Highlight Lines

1 Introduction

The design of industrial products applies various construction aspects. Beside functionality and manufacturability conditions that are essential in technical design, products must also meet aerodynamic, hydrodynamic and aesthetic demands. These demands are particularly important in automotive, ship and airplane industry but they are also present in the design of medical replacements, household appliances, etc. The common objective of above aspects is to produce smooth and irregularity free surface shape. Quality and smoothness of surfaces of industrial objects can efficiently be evaluated by highlight lines.

2 Related work

Highlight lines is a highly sensitive method for displaying the reflection characteristics of the surfaces, suited for use in surface design. They are intuitive, view independent and they magnify surface discontinuities by one order. The method was developed by Klaus-Peter Beier and Yifan Chen (Beier & Chen 1994).

Methods for correcting surface by adjusting its highlight lines were first published by Klass (1980) and later Kaufmann and Klass (1988). Correlation between highlight lines and the defining parameters of

the surfaces i.e. control points is described by a non-linear equation system, which is too time consuming to solve, and the results are not always good enough. The articles leave open the question of highlight line adjustment.

The method developed by Zhang and Cheng (1998) introduces a great number of simplifications to obtain a linear system of equation to modify control points through highlight lines. However, the highlight line cannot accurately follow the points specified by the designer; the method yields adequate results only in a small range of the errors. The method adjusts highlight lines individually. The abnormal portions are chopped off and replaced by a cubic Hermite curve. The adjustment however doesn't consider the pattern of highlight lines, and the shape of the replacement curve might not always be satisfactory.

The major problem of the above methods is represented by the complex mathematic relation between the adjusted highlight line and the control points of the corresponding surface. Our method circumvents this problem by using genetic algorithms, which can find modified control points even in the absence of direct mathematical relations.

Another problem of these methods is the lack of proper solution concerning the structure and shape adjustment of highlight lines. Either they don't address the question (Klass 1980, Kaufmann & bKlass 1988) or the suggested method has limited applicability (Zhang & Cheng 1998).

Our method of surface shape correction (Table 1) starts with the computation of highlight lines. Inspection of the surface quality is carried out by using several light source settings and surface orientations. Next, the designer defines interactively the region of highlight lines to be adjusted and the regularity of the highlight line pattern is evaluated. The new, adjusted highlight lines are created based on the evaluation. This is followed by the automatic determination of the affected surface region and corresponding control points. Adjustment of the control points is carried out by a genetic algorithm.

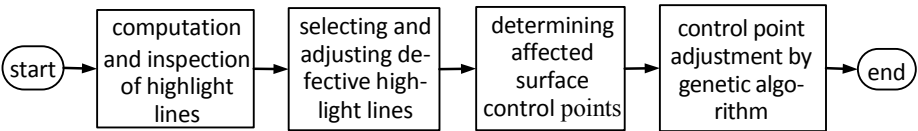


Table 1: Block diagram of the surface correction method

3 Surface Representation and Highlight Line Computation

Free-form surfaces in CAD are typically represented by a vector-valued parametric equation of the form:

S(u,v) = sum_{i=0}^m sum_{j=0}^n P_{ij} N_{ik}(u) N_{jl}(v) (1)

The shape of the surface S(u,v) is defined by an array of control points P_{ij} and the Bézier, B-spline or NURBS basis functions N_{ik}, N_{jl} of order k and l (Hoschek & Lasser 1993). A highlight line is created on the surface by the reflection of a linear light-source of infinite length. The highlight line consists of a set of highlight points. They are points on the surface where the corresponding surface normal and the light-source intersect each other that is the perpendicular distance between them is zero. The line of the light source can be described as L(λ) = A+Bλ where A is a point on L(λ), and B is a vector defining the direction of the line. The signed perpendicular distance d(u,v) between the normal N(u,v) at a surface point S(u,v) and the linear light source is:

d(u,v) = | [B x N(u,v)] · [A - S(u,v)] | / ||B x N(u,v)|| (2)

For a point on the highlight line d(u,v) = 0 holds, which must be solved for the control points of S(u,v). To design high quality surfaces, this relation has to be computed with high accuracy. We developed a robust method for computing points on highlight lines, which is described in detail in Gyurecz & Renner (2009). From these points a continuous highlight line is constructed. The interpolating curve

fitted to the highlight points is created in B-Spline representation. In the set of equations for determining the P_i control points of the curve $C(u)$ the control points are the unknown variables (Hoschek & Lasser 1993).

$$Q_k = C(u_k) = \sum_{i=0}^n N_i^r(u_k) P_i \quad (3)$$

To meet C^2 curve continuity, the degree r of the curve is set to 3. The distance between the highlight points can vary. The u_k parameter belonging to Q_k point of the curve (equation 3) are set proportional to the chord length between highlight points.

4 Highlight Line Adjustment

The highlight line adjustment is the result of the global and the local correction. The global correction repairs the pattern of highlight lines; the local correction replaces the defective highlight line parts according to the global correction.

4.1 Global Correction

The designer first interactively selects the region of highlight lines to be adjusted. The selection identifies the defective $C_i(u_i)_{i=R, R+N}$ highlight line curves and the $K_i = C_i(u_{i,K})$ and $V_i = C_i(u_{i,V})$ endpoints of defective portions. The values of the corresponding $E_i^K = C_i'(u_{i,K})$ and $E_i^V = C_i'(u_{i,V})$ tangential vectors and $U_i = (u_{i,K}, u_{i,V})$ curve parameter domain is also calculated (Figure 1). These parameters will be used in local curve adjustment. The number of defective highlight lines is N , the index of first defective highlight line is R .

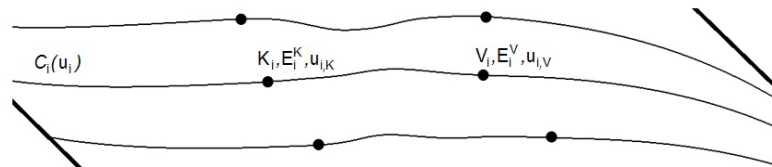


Figure 1: Selection of defective highlight lines.

The main characteristic of a correct highlight line structure is the uniform or uniformly changing highlight line pattern. To measure the irregularity in the pattern, intersection points, based on perpendicular cross directions are created. The variation of these points is considered as the evaluation tool of the global highlight line structure.

Let $M_{i-1} = C_{i-1}(u_{i-1})$ and $M_i = C_i(u_i)$ intersection points on two consecutive highlight lines (Figure 2). Let $A_i = M_i - M_{i-1}$ and $T_i = C_i'(u_i)$ the tangential vector in M_i . The requirement of perpendicularity is met if $A_i \cdot T_i = 0$. To reduce the influence of highlight line geometry, we modify the location of M_i to M'_i , according to following relation: $T'_i \cdot T_i = 0$. That is, the tangential vectors corresponding to consecutive intersection points must be parallel.

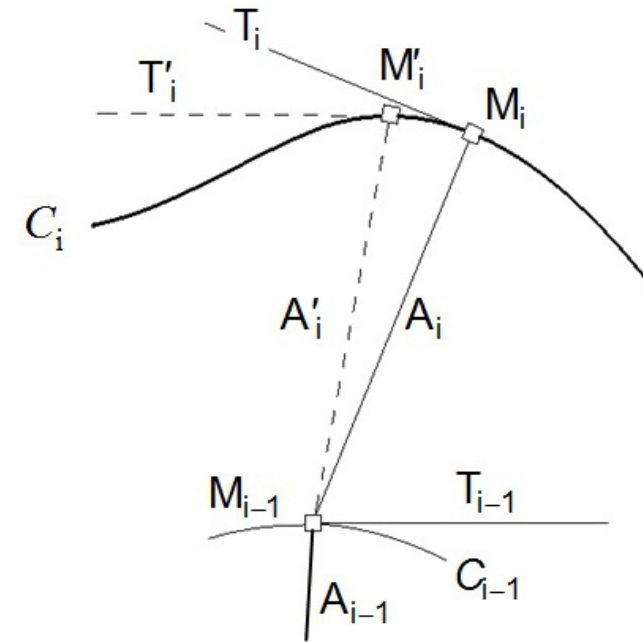


Figure 2: Interpretation of intersection points.

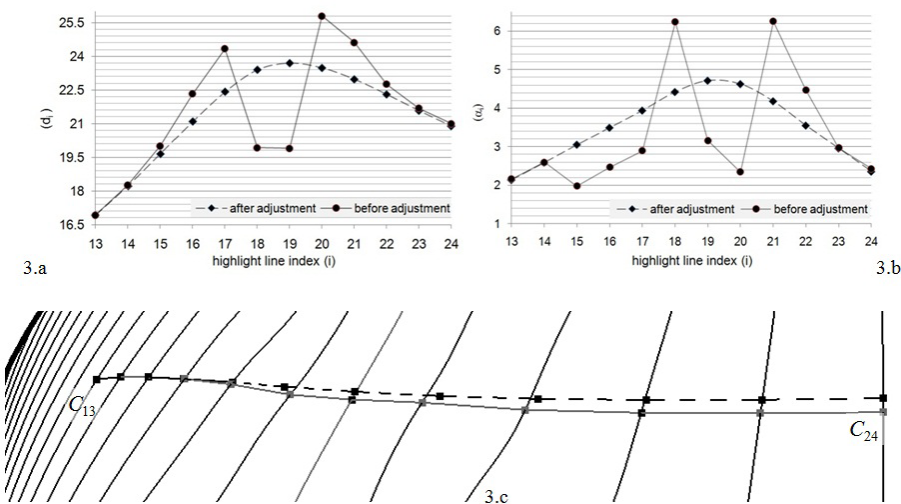


Figure 3: Intersection points before and after modification.

The variation of intersection points is measured by distance $d_i = \|M'_i\| - \|M_{i-1}\|$ and angle difference $\alpha_i = (A'_i - A_{i-1})$. For repairing the pattern we modify the intersection points in terms of d_i and α_i . The modified intersection points are determined by employing Hermite polynomials. In Figure 3.a and 3.b adjustment of intersection is seen. Figure 3.c shows the intersection points before and after adjustment. The modified points are connected by dashed lines.

4.2 Local Correction

The modified intersection points arranged by highlight lines (Figure 4) are used to create approximate replacement curve for defective highlight line parts. For the construction of the curve constrained least square method is used (Hoschek & Lasser 1993).

The creation of corrected highlight lines is followed by the automatic determination of the affected surface region and corresponding control points. Adjustment of the control points resulting the corrected highlight lines are determined by genetic algorithm.



Figure 4: Constructional parameters of replacement curve.

5 Concept of Genetic Algorithm

Genetic algorithms (GA) were first introduced by J. H. Holland (Herrera et al. 1998, Holland 1998). The basic idea is to apply the Darwinian mechanism of evolution in finding optimal solution to complex or non-linear problems. Solutions are represented by chromosomes, composed of genes that contain variable parameters of the solution. The chromosomes form a population and they are evaluated according to predefined criteria called fitness, which quantifies the optimality of the solution they represent. Chromosomes of next generations are created by genetic operators. The basic operators include selection, crossover and mutation. The algorithm runs until an acceptable solution is found.

6 Genetic Algorithm in Surface Correction

Our goal is to correct the shape of surfaces by means of their reflection characteristics through the shape and distribution of their highlight lines. The objective of GA is to adjust the parameters of surfaces resulting in a new surface shape that produces the corrected highlight lines. In this paper we give details of genetic representation and fitness function.

6.1 Structure of Genes and Chromosomes

Free form surfaces are determined by a number of parameters. However, the most effective parameter for surface modification is the control point $P_{i,j}$. In genetic representation those control points are included that have influence on the surface region that

designer wants to correct. They can be computed from the basis functions corresponding to particular control points. Their strength of influence is represented by the constant b_{ij} that is calculated by integrating the basis functions over the region of interest. A gene g_γ consist of control point modification ΔP_{ij} and constant b_{ij} applied to corresponding P_{ij} :

$$g_\gamma = \Delta P_{ij}(x,y,z), b_{ij} \tag{4}$$

where x , y and z are Cartesian coordinates of ΔP_{ij} , while γ is the identifier of genes within a chromosome. The chromosome of a surface has the following structure: $c_\beta = (g_1 \dots g_\gamma \dots g_J)$ where β identifies the chromosome in the population and J is the number of genes in the chromosomes.

6.2 Fitness Function

Fitness function contains geometric deviation between actual and corrected highlight lines. It consists of two components: accuracy and shape similarity. Accuracy is based on the distance, while shape similarity on angle difference of tangent vectors between corresponding highlight points. Denote h_i^{cor} the corrected, and h_i^{ce} the highlight line, created during the genetic search and $d_i(t_k)$ the deviation between corresponding highlight points at different t parameters of highlight lines. Then, the distance error component of the fitness function is

$$f_{dist} = \sum_{i=1}^l \left(\sum_{k=1}^{n_i} \left(d_i(t_k) - \frac{1}{n_i} \cdot \sum_{k=1}^{n_i} d_i(t_k) \right)^2 \cdot \frac{1}{n_i} \right) \tag{5}$$

where $d_i(t_k) = |h_i^{ce}(t_k) - h_i^{cor}(t_k)|$ while n_i denotes the number of examined highlight points. Variable l indicates the number of highlight lines. Angle difference of the error component f_{ang} is calculated in same manner, except the deviation is composed as follows:

$$d_i(t_k) = \arccos \left(\frac{h_i^{cor}(t_k) \cdot h_i^{ce}(t_k)}{|h_i^{cor}(t_k)| |h_i^{ce}(t_k)|} \right) \tag{6}$$

We analyzed the fitness components regarding their efficiency of correcting highlight lines. We found, that distance error component promotes the creation of accurate highlight lines, but their shape similarity is often poor. Tangency error component behaves in opposite way: it promotes producing highlight lines with good shape similarity, but on the expenses of their accuracy. We eliminated the disadvantages of fitness components by letting the distance dominate in the beginning of the search and make the tangency dominate at the end. This is realized with the following fitness function:

$$f = f_{dist} (w_{dist}^0 \mp \Delta w) + f_{ang} (1 - w_{dist}^0 \pm \Delta w) \tag{7}$$

where w_{dist}^0 is the weight of distance error component of the initial population. Expression $\Delta w = (2w_{dist}^0 - 1) \cdot (1 - (c_{var}^0 - c_{var}^{\tau-1}))$ denotes the change in the ratio. It is driven by the change in the chromosome variability. Variables c_{var}^0 and $c_{var}^{\tau-1}$ denote chromosome variability of the initial, and the previous generation (τ denotes the index of the current generation). The best results were achieved by using $w_{dist}^0 = 0,75$.

7 Analysis and Results

The method was applied to several industrial surfaces, the data of two examined surfaces are given in Table 2. The algorithm's efficiency was tested through different error domains and sizes. The error domain is represented by the number of affected control points, while the size of the error is defined through maximum distance between defective and corrected highlight lines.

| ID | max. distance [mm] | total number of CPs | affected CPs |
|----|--------------------|---------------------|--------------|
| S1 | 5.54 | 874 | 79 |
| S2 | 9.32 | 484 | 21 |

Table 2: Data for testing the algorithm through real world surfaces.

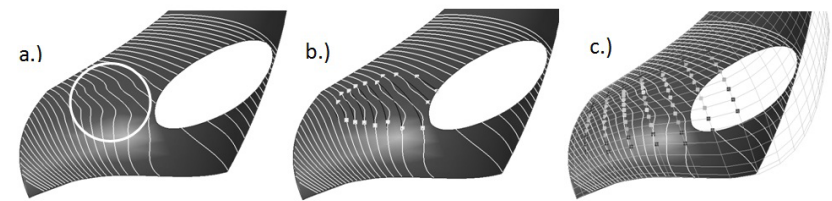


Figure 5: a.) Disclosing defective highlight lines
b.) Redesign of highlight lines c.) Affected CP-s.

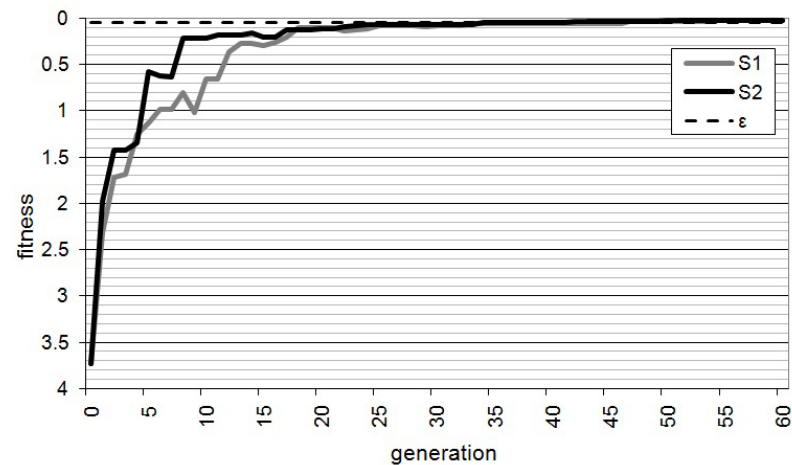


Figure 6: The change of fitness through generations.

The application of our method starts with the evaluation of surface reflection status. Figure 5.a displays the erroneous highlight lines of the surface. It can be seen, that irregularities occur in the region indicated by white circle. The domain of highlight lines for correction is marked and corrected by the method described in chapter 4 (parts between yellow rectangles in Figure 5.b. The affected control points are selected automatically (they are represented with different grey shaded rectangles in Figure 5.c: lighter shade indicates higher influence on defective highlight line parts.

Next, genetic search is performed with the above fitness function. The GA runs until the user defined stop criteria is fulfilled. We defined it as the allowable residual error, set to 5%. Figure 6 shows the GA run-offs of example surfaces. It can be seen that the stop criteria (ϵ - shown as dashed line) was met in both cases.

We verify the results visually in Table 3. In first row, rendered images are shown. In second row, highlight lines of the original, in third row highlight lines of the corrected surfaces are seen. Notice that while rendered images seem to be smooth, highlight lines disclose irregularities on surfaces.

| S1 (back of a concept car) | S2 (trunk lid of an existing car) |
|----------------------------|-----------------------------------|
| | |
| | |
| | |

Table 3: Analysed surfaces in their defective and corrected form.

8 Summary

Method for correcting surface shape errors by highlight lines was presented. The correction of highlight lines structure is achieved in two consecutive steps. In first step highlight line pattern is repaired, in next step the geometry of highlight lines is corrected. The correction is partly intuitive, partly automated. The intuitive elements are mainly in selection of defective highlight line portions, the positioning of highlight points is automated. Adjustment of the surface control points resulting the corrected highlight lines are determined by genetic algorithm. We circumvent the time consuming computing highly non-linear correlations between control points and highlight lines. Our method is robust and intuitive. It is applicable to surfaces of any shapes and any kinds of CAD representations, for a wide range of highlight line and surface errors.

Literature

- Beier, K P, Chen, Y, 1994: Highlight-line algorithm for real time surface quality assessment: *Computer Aided Design*, 26(4), 268-277
- Deb, K. et al. 2002: A computationally efficient evolutionary algorithm for real parameter optimization: *Evolutionary Computation*, 10(4), 371-395
- Gyurecz, Gy, Renner, G, 2009: Robust computation of reflection lines: *Journal of Machine Manufacturing*, 9(1), 1-6
- Herrera, F. et al. 1998: Tackling real-coded genetic algorithms: *Artificial Intelligence Review*, 12(4), 265-319
- Holland J H, 1998: *Adoption in natural and artificial systems*, MIT Press Edition
- Hoschek J, Lasser D, 1993: *Fundamentals of Computer Aided Geometric Design*, AK Peters
- Klass R, 1980: Correction of local surface irregularities using reflection lines: *Computer-Aided Design* 12(2), 73-77
- Kaufmann E, Klass R, 1988: Smoothing surfaces using reflection lines for families of splines: *Computer-Aided Design*, 20(6), 312-316
- Zhang C, Cheng F, 1998: Removing local irregularities of NURBS surfaces by modifying highlight lines, *Computer-Aided Design*, 30(12), 923-930

Kontakt

Dipl.–Ing. György Gyurecz
Óbuda University
Institute of Machine Design and Safety Engineering
Bécsi út 96/B.
1034 Budapest, Hungary
uni-obuda.hu

Prof. Dr.–Ing. Tibor Bercsey
Budapest University of Technology and Economics
Department of Machine and Product Design
Műegyetem rakpart 3-9.
1111 Budapest, Hungary
www.bme.hu

Jana Hadler & Klaus Brökel

Analyse des monetären und qualitativen Nutzens schwimmender Energiekonverter

Technische Neu- und Weiterentwicklungen sowie eine Änderung der Marktverhältnisse sind maßgebliche Motive für Investitionen. Im Bereich der Kleinwasserkraft sind Investitionen – quantitativ betrachtet – bedingt durch die aktuelle Konjunkturlaute nach der Finanzkrise gesunken. Auf der anderen Seite setzt die Politik verstärkt auf die Nutzung erneuerbarer Energien, um das Konzept der Nachhaltigkeit auf diesem Gebiet zu forcieren.

A Einleitung

Die Nutzung der Energie freier Strömungen ist seit Menschengedenken von großem Interesse. Schöpfräder und Schiffsmühlen, als Wasserräder zur Wasserverteilung und für Mahlvorgänge eingesetzt, haben ihr technisches Niveau im 19. Jahrhundert erreicht. In der heutigen Zeit erleben Wasserräder ihr Comeback, da sie Teil von Forschungsprojekten und eine Neuaufgabe wert sind.

Für die Beschleunigung der Entwicklung neuer oder neu aufgelegter Technologien zur Nutzung der Energie aus Wasser werden seit Jahren im Rahmen verschiedener Förderprogramme öffentliche Gelder zur Verfügung gestellt. Mit dem EU-Projekt *HYLOW* (Akronym für Hydropower converter for very low head differences) ist unter anderem die Entwicklung und Herstellung von Kleinwasserkraftanlagen mit integrierten Wasserrädern unterstützt worden.

B HYLOW und seine Ergebnisse

Das Projekt *HYLOW* erstreckte sich über fast vier Jahre und bediente in dieser Zeit drei Forschungsfelder, die sich mit Kleinwasserkraft beschäftigten: Mikroturbinen in Versorgungsleitungen, installierte Staudruckräder in Flusswehren und freischwimmende Energiewandler (Free Stream Energy Converter – FSEC). Letztere sind Gegenstand dieser Ausführungen.

B.1 Das Großmodell des FSEC

Der FSEC überzeugt mit seiner Größe – 7.500 mm in der Länge, 2.400 mm in der Breite und mit dem Wasserrad etwa 3.300 mm in der Höhe – und mit seinem robusten Stahlkörper. Abbildung 1 zeigt das Modell in einem seiner Einsatzgebiete, einem Flora-Fauna-Habitat in Norddeutschland. Fast zwei Monate lang ist es dort getestet worden. Neben Fließgeschwindigkeiten und Leistungswerten wurden auch Wasserstände und Geräuschpegel gemessen, um einen Eindruck von den Auswirkungen auf die Umwelt zu gewinnen (Hadler et al. 2011). Technische und ökologische Beobachtungen und Ergebnisse sind in Berichten und Veröffentlichungen ausgewertet worden (siehe auch: www.hylo.eu).

Abbildung 1: Das Testmodell des FSEC im Einsatzgebiet



Jedoch ist der FSEC auf Grund seiner geringen Leistungswerte nicht marktfähig. Das Versuchsmodell ist ein Prototyp, an dem zahlreiche Umbauten und Änderungen vorgenommen wurden, und der rein kostentechnisch für den Markt nicht interessant sein kann. Gefordert ist eine Lösung, die ökologisch unbedenklich, technisch ausgereift und kostentechnisch attraktiv ist. Doch zunächst sollen die technischen Ergebnisse betrachtet werden.

B.2 Qualitative Ergebnisse der Versuche

Das große Modell hätte nicht in dieser Form getestet werden können, wären diesem Großversuch nicht zahlreiche kleinmaßstäbliche Versuche voraus gegangen. Die Grobgeometrie ist vorgegeben – zwei Schwimmkörper, die die Kulisse bilden, sind über eine Bodenplatte miteinander verbunden. In verschiedenen europäischen Strömungsrinnen in Laboren und schnellfließenden Bächen in der Natur sind in Bauart, Größe und Material unterschiedliche kleine Modelle getestet worden. Der qualitative Extrakt aller Versuche ist nachfolgend aufgelistet (Hylo 2012):

- Der Strömungszulauf ist konvergent mit einem Öffnungswinkel von 120°–130°.
- Der Strömungsauslauf ist für unidirektional angeströmte Anlagen gerade, für bidirektional angeströmte Anlagen schräg. Die Form des Auslaufs hat keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungsmessung.
- Die Positionierung der Wasserradwelle ist mittig und kann für unidirektionale Anlagen auch im hinteren Bereich der Anlage vorgenommen werden.
- Strömungsabrisskanten zur Ablenkung von Turbulenzen und zur Verhinderung von Rückstaus im Auslaufbereich sind unterhalb des Hecks vorteilhaft.
- Eine Spalthöhe (Abstand von der unteren Wasserradschaufel zur Bodenplatte) von 10 %–12 % der Gesamteintauchtiefe trägt zur Leistungserhöhung bei.
- Pro 0,25 m/s Fließgeschwindigkeit sollte sich die unidirektional angeströmte Anlage um 1° bis 1,5° heckseitig neigen. Die erforderliche Ballastierung kann innerhalb der Schwimmkörper reguliert werden.

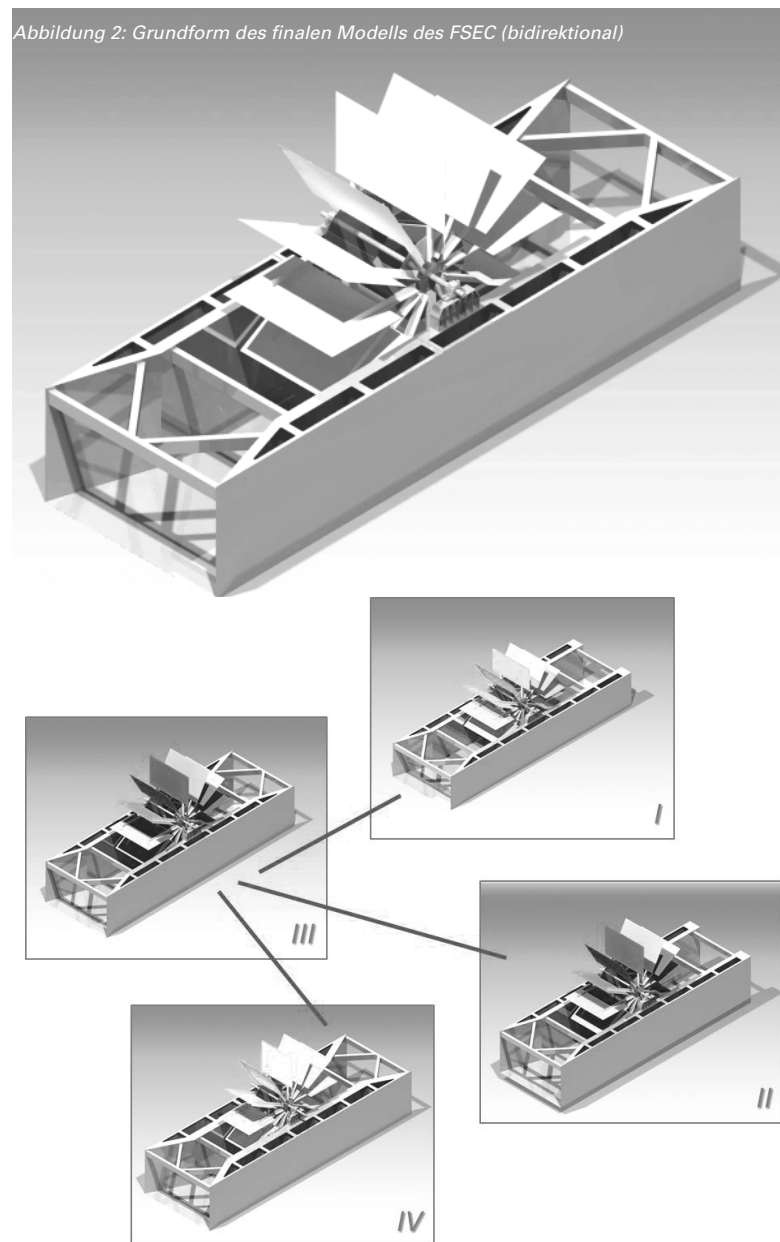


Abbildung 3: Abgeleitete Varianten aus der Grundform des FSEC

Die finale Variante des FSEC hat eine doppelsymmetrische Grundform, wie nachfolgende Abbildung 2 zeigt.

C Ableitung von vier Modellvarianten

Aus der oben beschriebenen Grundform des FSEC leiten sich weitere drei Varianten für unterschiedliche Einsatzgebiete ab. Die erste Variante verfügt über eine gerade Heckform und ist somit nur unidirektional anzuströmen. Mit ihrer niedrigen Pontonhöhe ist sie besonders gut für flache Gewässer mit mäßigen Fließgeschwindigkeiten geeignet. Die zweite Variante gleicht der ersten hinsichtlich ihres geraden Hecks, jedoch sind die Pontons höher, womit sie für den Einsatz in stärkeren Strömungen angelegt ist. Durch die höheren Pontons können auch längere Schaufelblätter realisiert werden. (Abbildung 3, rechts)

Die dritte Variante stellt die Grundform selbst dar; sie ist bidirektional ausgeführt. Die Symmetrie ist in Längs- und Querrichtung hergestellt, was diese Variante für den Einsatz in Tidegebieten prädestiniert. Die letzte, in Abbildung 3 unten links dargestellte Variante ist von allen die am meisten robuste – ihre Schwimmkörper sind sehr breit angelegt. Die gesamte Anlage ist für Fließgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s ausgelegt und kommt an strömungsintensiven und -turbulenten Stellen zum Einsatz.

D Investitionsrechnungen und Vorteilsnachweis

D.1 Amortisation

Im Allgemeinen sind schwimmende Energiekonverter in ihrer Anschaffung teuer. Nachgefertigte Einzelstücke des FSEC gehen auf ein Angebotsspektrum von 30.000 € bis über 46.000 € (pro Anlage) zurück. Unter gleichen Rahmenbedingungen fällt die Wahl auf das Angebot mit dem günstigsten Kaufpreis. Wird die Anschaffung der Anlage finanziert, addieren sich zu den jährlichen Wartungs-, Service- und Instandhaltungskosten noch die Kosten für die Kredittilgung.

Im Folgenden wird das günstigste Angebot anhand der Kapitalwertmethode, einer Methode der dynamischen Investitionsrechnung, bewertet.

„Der Kapitalwert K_0 ergibt sich aus dem Barwert aller einem Investitionsvorhaben zurechenbaren Einzahlungen E_t und Auszahlungen A_t .“

(Wöhe et al. 2010)

Zusammen mit dem Kalkulationszinsfuß i und einer Investitionsdauer n entsteht: Aus den Ergebnissen lässt sich folgendes ableiten (Wöhe et al. 2010):

$$K_0 = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) \cdot (1 + i)^{-t}$$

- $K_0 > 0$: Die Investition amortisiert sich im Zeitraum der Nutzungsdauer und das eingesetzte Kapital fließt mit Gewinn an den Investor zurück.
- $K_0 = 0$: Die Investition amortisiert sich am Ende der Nutzungsdauer und das eingesetzte Kapital fließt an den Investor zurück.
- $K_0 < 0$: Die Investition amortisiert sich nicht. Aus rein wirtschaftlicher Sicht ist von einer Investition abzuraten.

In Tabelle 1 wird über die Nutzungsdauer von 20 Jahren die Entwicklung des Kapitalwertes dargestellt. A_0 ist in diesem Fall der Anschaffungswert und i als Abzinsungszinssatz wird mit 5,22% angegeben. Die Auszahlungen A_t setzen sich aus Kosten für die Gewässerpacht, Wartung und Instandhaltung sowie Servicekosten (Versicherung, Steuern, Verwaltung) zusammen. Et sind jene Vergütungen, die für die Stromeinspeisung in das öffentliche Netz gezahlt werden. Für Deutschland beläuft sich die Einspeisevergütung auf 0,1267 € pro Kilowattstunde. Um in der 20-jährigen Nutzungsdauer eine Amortisation der Anlage zu erreichen, müssen kontinuierlich 3,2 kW an Leistung erzeugt werden. Dieses ist in Regionen mit Fließgeschwindigkeiten zwischen 2,5 und 3,5 m/s und einer doppeltbreiten Variante des FSEC möglich. Allerdings wäre dann der Anschaffungspreis ein anderer und die Rechnung ginge noch nicht auf.

| t [Jahr] | 0 | 1 | 2 | ... | 19 | 20 |
|--------------|---------|-------------|-------------|-----|-----------|-----------|
| A_0 [€] | 30 000 | – | – | ... | – | – |
| E_t [€] | | 3 329,68 | 3 329,68 | ... | 3 329,68 | 3 329,68 |
| A_t [€] | | 1 040,00 | 1 040,00 | ... | 1 040,00 | 1 040,00 |
| i | | 5,22% | 5,22% | ... | 5,22% | 5,22% |
| Σ [€] | | 2 387,50 | 4 656,99 | ... | 29 865,40 | 30 776,66 |
| K_0 [€] | -30 000 | - 27 612,50 | - 25 343,01 | ... | - 134,60 | 776,66 |

Tabelle 1: Berechnungen zum Kapitalwertverlauf

Der Kapitalwertverlauf für die Kleinwasserkraftanlage mit dem Anschaffungswert von 30.000 € ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Kapitalwertkurve schneidet kurz vor dem Ende der Nutzungsdauer die Nulllinie und bleibt im positiven Bereich. Wird nach dem 20. Jahr die Zahlung der Einspeisevergütung eingestellt, und ist die Anlage komplett bezahlt, kann weiter, sofern sie noch Nutzungsvorrat enthält, für den Eigenbedarf Strom erzeugt werden. Diesem steht der aktuell durchschnittliche Strompreis von etwa 0,25 €/ kWh gegenüber.

D.2 Vorteilsnachweis der Investition

Im Vorfeld von Investitionsentscheidungen ist es naheliegend, dynamische Amortisationsrechnungen unter verschiedenen Bedingungen anzustellen und diese durch entsprechend auszuwählende Rentabilitätskennzahlen des Investitionsobjektes zu ergänzen. Dabei ist natürlich auch die sogenannte Alternativinvestition zu beachten, deren grundsätzliche und einfachste Variante stets das Unterbleiben der Investition ist. Das könnte besonders interessant für den Vorteilsnachweis beim Bau von Kleinwasserkraftanlagen in erwähnten entlegenen Regionen sein.

Der qualitative Nutzen einer Anlage kann unabhängig vom monetären Nutzen derselben das ausschlaggebende Kriterium für die Investition sein. Bei Investitionen in Kleinwasserkraft muss ein entscheidender Aspekt ergänzt werden: Entscheidungen werden für

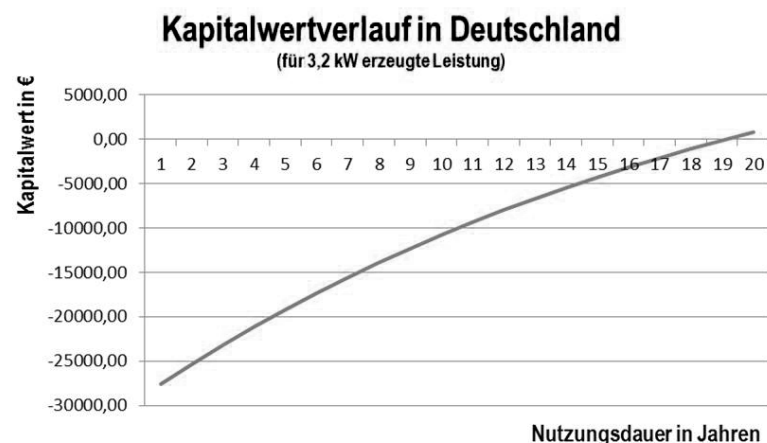


Abbildung 4: Graphische Darstellung des Kapitalwertverlaufs

einen langen Zeitraum getroffen. Die Amortisationszeiten sind oft unüberschaubar lang und die einflussnehmenden Randbedingungen kaum kalkulierbar. Für hochindustrialisierte Regionen, in denen Strom zu Tag- und Nachtzeiten zur Verfügung steht, sind Kleinwasserkraftanlagen im beschriebenen Leistungsbereich entbehrlich. In entlegenen Regionen, in denen Forschungsstationen, Wohnhäuser oder Versorgungszentren jedweder Art an kein Stromnetz angeschlossen sind, könnten solche Kleinwasserkraftanlagen bei vorhandenen nutzbaren Fließgewässern eine bedeutende Rolle spielen. Genutzt werden können sie in jedem Fall auch, wenn Energieengpässe bestehender Stromnetze überbrückt werden sollen.

E Ausblick

Das Projekt *HYLOW* ist in seiner vierjährigen Forschungszeit an Grenzen bezüglich der Untersuchungen zur Nutzung der Kleinwasserkraft gestoßen. Das großmaßstäbliche Modell (Abbildung 1) ist zwar in einem Flora-Fauna-Habitat ausgiebig getestet worden. Allerdings beschränkten sich die Untersuchungen auf einen recht kurzen Zeitraum und auf ein Gebiet mit eher mäßigen Fließgeschwindigkeiten. Das Erforschen des Verhaltens der Versuchsanlage in einem

Tidegebiet mit wechselnden Strömungsrichtungen und differenten Geschwindigkeiten ist ausgeblieben. Gleichwohl ist in den Untersuchungen weiteres Entwicklungspotential erkannt worden: Wasserräder gehören nicht zum alten Eisen. Die Technologie, die in dieser robusten Anlage steckt, ist ausbaufähig. Mit breiten Schaufeln, optimierten Schwimmkörpern und einer durchdachten Lastabnahme können diese Kleinwasserkraftanlagen durchaus den Markt erobern. Denn die Aspekte der Mobilität, der schadstofffreien Stromerzeugung in entlegenen bzw. infrastrukturell schwach erschlossenen Regionen oder aber die mögliche Inanspruchnahme der Einspeisevergütung sind nicht von der Hand zu weisen und erhöhen sowohl den monetären als auch den qualitativen Nutzen einer Investition.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

Literaturverzeichnis

- Hadler, J. & Brökel, K. (2011): Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit mobiler Energiewandler, 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Aachen: Shaker Verlag, 336-342
- Hylow, 2012: Design Guide, Free Stream Energy Converter, Datum der Veröffentlichung: 2012
- Wöhe, G. & Döring, U. (2010): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, München: Verlag Franz Vahlen

Kontakt

Dipl. Wi.-Ing. Jana Hadler
 Prof. Dr.-Ing. Klaus Brökel
 Universität Rostock
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
 Albert-Einstein-Straße 2
 18059 Rostock
<http://www.kt.uni-rostock.de/ktc>

Benedikt Posner, Alexander Keller,
Hansgeorg Binz & Daniel Roth

Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren

1 Einleitung und Motivation

Leichtbau beabsichtigt, die Funktion des Produkts bei gleichbleibendem Gewicht zu steigern (Wiedemann 2007). Leichtbaugerechtes Konstruieren verbessert die Funktionserfüllung bei konstantem Gewicht oder senkt das Gewicht bei gleicher Funktionserfüllung. Da auf Produkte neben der Erdbeschleunigung auch noch weitere Beschleunigungen und damit Kräfte wirken, ist nicht das Gewicht, sondern vielmehr die Masse neben der Funktion die entscheidende Eigenschaft, die im Leichtbau optimiert werden soll. Um folglich Produkte leichtbaugerecht zu konstruieren, müssen diese sowohl funktions- als auch massegerecht konstruiert werden. Die funktions- und massegerechte Konstruktion von Produkten kann den Energieverbrauch eines Produkts, wie z. B. den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs, reduzieren und damit dessen ökonomische und ökologische Eigenschaften verbessern (Ponn & Lindemann 2011). Zusätzlich zur Massenreduzierung kann eine verbesserte Massenverteilung die physische Belastung des Produktnutzers reduzieren, indem Kräfte und Momente, die durch die Masse auf den Nutzer ausgeübt werden, minimiert werden. Außerdem kann eine bessere Massenverteilung weitere dynamische Produkteigenschaften verbessern, z. B. höhere erreichbare Kurvengeschwindigkeiten eines Kraftfahrzeugs. Die Massen- und Trägheitsmomentreduzierung kann außerdem höhere Beschleu-

nigungen ermöglichen (Ponn & Lindemann 2011). Zu einem ganzheitlichen leichtbau- und damit funktions- und massegerechten Konstruieren gehört folglich die Betrachtung der Masse, der Massenverteilung und des Trägheitsmoments.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Konstruktionsmethoden werden eingesetzt, um ein zielgerichtetes Vorgehen bei der Produktentwicklung zu unterstützen (Lindemann 2009). Eine Methode zum funktions- und massegerechten Konstruieren unterstützt die Entwicklung ganzheitlich leichtbaugerechter Produkte. Zur Bewertung und Entwicklung einer Methode müssen wie auch im Produktentwicklungsprozess Anforderungen erarbeitet werden. Verschiedene Autoren führen einzelne Punkte auf, die bei der Gewichtsoptimierung berücksichtigt werden müssen (Ponn & Lindemann 2011, Feyerabend 1990, Klein 2011). Sie entwickeln aber nicht systematisch eine Anforderungsliste, die als Grundlage für die Bewertung der Methoden des Stands der Forschung oder zur Entwicklung einer neuen Methode und zu deren Validierung dienen kann. Es sollen daher in diesem Beitrag Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren diskutiert und eine Anforderungsliste erstellt werden. Daher stellt sich folgende Forschungsfrage: Welche Anforderungen werden an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren gestellt?

Zur Beantwortung dieser Frage werden Anforderungen formuliert, die allgemein an Konstruktionsmethoden gestellt werden und im Stand der Forschung beschrieben sind. Diese werden durch eine Literaturrecherche zu den Anforderungen an Methoden zum leichtbau- und damit zum funktions- und massegerechten Konstruieren erweitert, angepasst und spezifiziert.

3 Stand der Forschung der Anforderungen an das leichtbaugerechte Konstruieren

Zahlreiche Autoren beschäftigen sich mit Leichtbaustrategien, wie z. B. dem Werkstoff-, Form-, Fertigungs-, Konzept- (Klein 2011), Bedingungs- oder Systemleichtbau (Kopp et al. 2011). Für die Konstruk-

tion im Leichtbau werden die allgemeingültigen Vorgehensweisen zum Konstruieren z. B. nach VDI 2221 (VDI 1993) vorgeschlagen (Klein 2011, Albers & Braun 2011). Es werden jedoch keine Anforderungen entwickelt, die diese Vorgehensweisen bei der Anwendung zum leichtbaugerechten Konstruieren erfüllen müssen. Als spezielle Konstruktionsmethode für das leichtbaugerechte Konstruieren schlägt Feyerabend (1990) die Wertanalyse Gewicht vor. Diese Methode wurde durch den Transfer der Wertanalyse von der Anwendung auf Kosten auf die Anwendung auf Gewicht entwickelt (Feyerabend 1990). Es werden spezielle Kriterien genannt, die beim leichtbaugerechten Konstruieren berücksichtigt werden müssen, wie z. B. das Berücksichtigen von Masse und Massenverteilung. Schmidt (2003) schlägt eine Methode zum Transfer von erfolgreichen Leichtbaulösungen auf neue Probleme vor. Er entwickelt dabei eine rechnergestützte Methode, für die er Anforderungen bezüglich der Rechnerunterstützung aufstellt. Die Anforderungen an die Methoden von Schmidt (2003) und Feyerabend (1990) werden jedoch nicht systematisch und vollständig erarbeitet. Dabei werden unter anderem die allgemeinen Anforderungen, die an alle Methoden zum Konstruieren gestellt werden nicht berücksichtigt. Stockinger (2007) beschreibt die Entwicklung eines Assistenzsystems zur Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen. Er nennt Aspekte der Unterstützung, die bei der Entwicklung des Assistenzsystems berücksichtigt wurden. Eine systematisch erarbeitete Anforderungsliste unter Berücksichtigung von Anforderungen an Konstruktionsmethoden wird nicht dargestellt. Im Konzept zur rechnergestützten Konzeption und Prinzipiellösungsmodellierung flächiger Leichtbaukomponenten beschreibt Hauck (2006) ebenfalls Anforderungen an das System Funktions-Prinzipiellösungs-Modellierer. Diese Anforderungen entsprechen aber nicht den Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren. Der Stand der Forschung beschreibt folglich nur einzelne Anforderungen an das leichtbaugerechte Konstruieren im Allgemeinen. Es werden keine vollständigen, d. h. auch unter Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen an Konstruktionsmethoden, wie sie z. B. Keller & Binz (2009) formulieren, und systematisch aufgestellten Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren formuliert.

4 Allgemeine Anforderungen an Konstruktionsmethoden

Keller & Binz (2009) fassen die allgemeinen Anforderungen an Konstruktionsmethoden zusammen und ordnen diese Anforderungsgruppen zu. Diese Anforderungsgruppen sind die Überprüfbarkeit, die wissenschaftliche Stichhaltigkeit, die Nachvollziehbarkeit, die Strukturierung und Kompatibilität, die Flexibilität, die praktische Relevanz und die Problemspezifität. Diese Anforderungsgruppen umfassen 19 Anforderungsbereiche, aus denen 98 Richtlinien abgeleitet wurden (Keller & Binz 2010), anhand derer die Erfüllung der Anforderungen überprüft werden kann. Darüber hinaus wurde auch die relative Wichtigkeit der einzelnen Richtlinien und damit Anforderungen in einer Umfrage untersucht (Keller & Binz 2010).

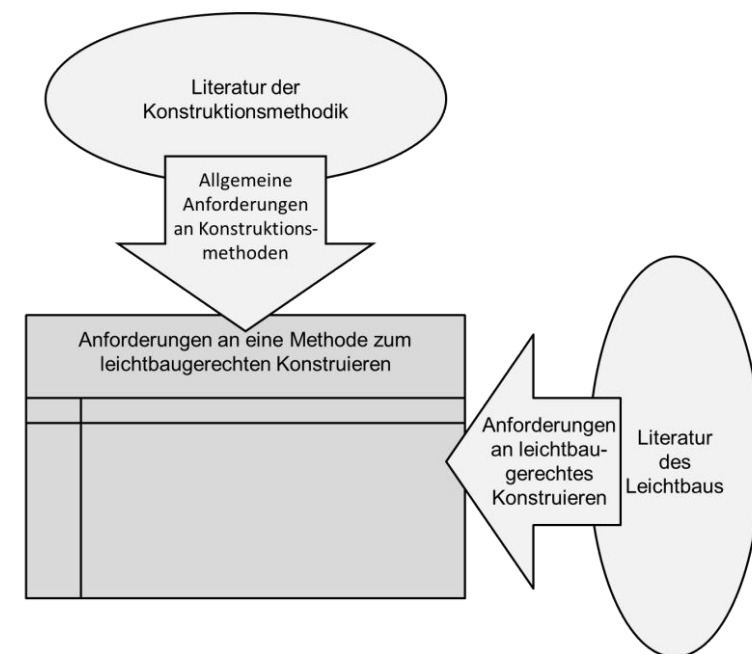


Abbildung 1: Vorgehen beim Erarbeiten der Anforderungen

5 Erarbeitung der Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren

Abbildung 1 stellt das Vorgehen dar, mit dem die Anforderungen erarbeitet wurden. Dabei wurden die Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren aus den allgemeinen Anforderungen an Konstruktionsmethoden abgeleitet und durch Anforderungen, die aus der Literatur des Leichtbaus recherchiert wurden, ergänzt und spezifiziert. Vor allem die Nützlichkeit, der die Effektivität und die Effizienz einer Methode untergeordnet sind, muss im speziellen Kontext der Leichtbaugerechtheit betrachtet werden.

Tabelle 1 zeigt in den beiden linken Spalten die Anforderungsgruppen nach Keller & Binz (2009, 2010), Binz et al. (2011) und in der rechten Spalte die Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren, die nachfolgend aus den allgemeinen Anforderungen abgeleitet werden. Die erste Anforderungsgruppe nach Binz et al. (2011) ist die Überprüfbarkeit. Die Überprüfbarkeit kann untergliedert werden in Verifizierung und Validierung. Die Methode muss auf die Anforderungen, die an sie gestellt werden, hin überprüft werden. Dies setzt voraus, dass die Anforderungen so formuliert sind, dass eine Validierung durchgeführt werden kann. Die in diesem Beitrag vorgestellten Anforderungen sind daher so formuliert, dass Methoden auf deren Erfüllung hin überprüft werden können.

Der wissenschaftlichen Sinnhaftigkeit werden die Validität, die Zuverlässigkeit und die Objektivität zugeordnet (Binz et al. 2011). Aussagen und Ergebnisse der Methode dürfen sich nicht widersprechen, damit sie valide sind. Außerdem muss die Methode zuverlässige Ergebnisse produzieren. Das bedeutet, dass die Ergebnisse nicht durch verschiedene Einflüsse, wie z. B. den Einfluss des Methodenanwenders, so weit voneinander abweichen können, dass die Ergebnisse unbrauchbar oder gar irreführend sind. Dies setzt auch die Forderung nach Objektivität voraus. Durch die Überprüfung der Methode muss eine ausreichende Objektivität belegt werden, sodass die verschiedenen Probanden als Methodenanwender mit ihrem subjektiven Einfluss Ergebnisse erhalten, die sich nicht widersprechen und für die Zielerreichung der Methodenanwendung nutzbar sind.

Die Methode muss durch die Forderungen nach Verständlichkeit, Wiederholbarkeit, Erlernbarkeit und Anwendbarkeit die Nachvollziehbarkeit erfüllen (Binz et al. 2011). Der Verständlichkeit wird die Forderung zugeordnet, dass alle Schritte und Zusammenhänge der Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren transparent und logisch nachvollziehbar sind. Außerdem muss die Methode von einem Konstrukteur verstanden werden können. Des Weiteren müssen dieser Wissenstand und die mit dem Ingenieurstudium zusammenhängenden Fertigkeiten ausreichen, um die Methode erlernen zu können. Die Wiederholbarkeit der Methode muss in der Form gegeben sein, dass bei einer mehrfachen Anwendung der Methode auf das gleichartige Problem keine widersprüchlichen Ergebnisse produziert werden.

Der Anforderungsgruppe der Strukturierung und der Kompatibilität werden die Untergruppen Strukturieren, Komplexitätsbewältigung, Kompatibilität und Problemlösen zugeordnet (Binz et al. 2011). Die Methode muss den Konstrukteur dabei unterstützen, systematisch das Problem und/oder das Objekt oder ausgewählte Teile davon zu strukturieren. Darüber hinaus muss die Methode bei der Komplexitätsbewältigung unterstützen. Dies kann z. B. durch eine vereinfachende Modellbildung erfolgen. Des Weiteren muss die Methode mit weiteren Methoden und dem Produktentwicklungsprozess, z. B. nach VDI 2221 (VDI 1993), kompatibel sein. Um die Umsetzung und Anwendung der Methode per Rechner unterstützen zu können, muss sie in ihrem Aufbau auch so dargestellt werden, dass eine Rechnerunterstützung möglich wird.

Die Flexibilität der Methode muss derart gegeben sein, dass einzelne Schritte, falls diese nicht notwendig sind, weggelassen bzw. übersprungen werden können. Außerdem muss ein iteratives Durchlaufen der Methode möglich sein, damit, falls dies nötig ist, einzelne Schritte z. B. für eine weitere Optimierung erneut durchlaufen werden können.

Damit die praktische Relevanz der Methode gegeben ist, muss sie innovativ und konkurrenzfähig sein (Binz et al. 2011). Das heißt, sie muss entweder mindestens einen Anwendungsfall abdecken, den

| Anforderungsgruppen | Untergruppen | Nr. | Anforderung |
|----------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| nach (Keller & Binz 2011) | | | |
| Überprüfbarkeit | Validierung | 1 | Methode muss anhand der Anforderungsliste validiert werden. |
| | Verifizierung | 2 | Methode muss verifiziert werden. |
| Wissenschaftliche Sinnhaftigkeit | Validität | 3 | Aussagen der Methode dürfen sich nicht widersprechen und müssen damit valide sein. |
| | Zuverlässigkeit | 4 | Methode muss zuverlässige Ergebnisse liefern. |
| | Objektivität | 5 | Subjektive Einflüsse dürfen die Effektivität der Methode nicht behindern. Damit muss die Methode ausreichend objektiv sein. |
| Nachvollziehbarkeit | Verständlichkeit | 6 | Schritte und Zusammenhänge der Methode müssen transparent und logisch nachvollziehbar sein. |
| | | 7 | Vorwissen in Form eines Ingenieurstudiums muss ausreichend sein, um die Methode und deren Anwendung zu verstehen. |
| | Erlernbarkeit | 8 | Wissen und Fertigkeiten eines Ingenieurs reichen aus, um die Methode erlernen zu können. |
| | Anwendbarkeit | 9 | Ingenieur muss die Methode anwenden können. |
| | Wiederholbarkeit | 10 | Die Ergebnisse der Methode dürfen bei einer mehrfachen Anwendung sich nicht widersprechen. |
| | Strukturierung und Kompatibilität | Strukturieren | 11 |
| Komplexitätsbewältigung | | 12 | Methode muss bei der Komplexitätsbewältigung unterstützen. |
| Problemlösen | | 13 | Methode muss beim Problemlösen unterstützen. |
| Kompatibilität | | 14 | Methode muss mit VDI 2221 kompatibel sein. |
| | | 15 | Methode muss rechnerintegrierbar sein. |
| Flexibilität | Flexibilität | 16 | Einzelne Schritte müssen im Einzelfall ausgelassen oder übersprungen werden können. |
| | | 17 | Iteratives Durchlaufen der Methode muss möglich sein. |
| Praktische Relevanz | Innovativität | 18 | Methode muss neu sein. |
| | Konkurrenzfähigkeit | 19 | Ergebnisse der Methode dürfen nicht durch bestehende Methoden erarbeitet werden können. |
| Nützlichkeit | Effektivität | 20 | Methode muss die Analyse der Funktionen unterstützen. |
| | | 21 | Methode muss bei der Massenreduktion durch Analyse, Visualisierung und Ableiten von Handlungsempfehlungen unterstützen. |
| | | 22 | Methode muss Analyse bestehender Produkte unterstützen. |
| | | 23 | Methode muss die Massenzielsetzung in frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützen. |
| | | 24 | Methode muss die Masse als Optimierungskriterium in frühen Phasen der Produktentwicklung berücksichtigen. |
| | | 25 | Methode muss die Massenverteilung durch Analysieren, Visualisieren und Ableiten von Handlungsempfehlungen berücksichtigen. |
| | | 26 | Methode muss die Trägheitsmomente durch Analysieren, Visualisieren und Ableiten von Handlungsempfehlungen berücksichtigen. |
| | | 27 | Methode muss bei Wahl der Leichtbaustrategie unterstützen. |
| | | 28 | Methode muss bei Synthese von Lösungen unterstützen. |
| | | 29 | Methode muss weitere Kriterien bei der Lösungsbewertung und Lösungsauswahl berücksichtigen. |
| | 30 | Methode muss Bewertungswerkzeug enthalten. | |
| Effizienz | 31 | Aufwand darf den Nutzen nicht übersteigen. | |
| | 32 | Methode muss dem Nutzer effizient erscheinen. | |
| Problemspezifität | Problemspezifität | 33 | Methode muss Problemspezifität aufweisen, die es einem Nutzer erlaubt, sie als für sein Problem passend zu erkennen. |

Tabelle 1: Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren

keine andere Methode abdeckt, oder sie muss im Allgemeinen effizienter z. B. leichter erlernbar sein oder Vorteile hinsichtlich anderer Anforderungen gegenüber den bestehenden Methoden besitzen.

Die Nützlichkeit umfasst die Effektivität und die Effizienz (Binz et al. 2011). Ziel und damit der gewünschte Effekt der Methode soll die Unterstützung des Konstrukteurs beim leichtbau- und damit beim funktions- und massegerechten Konstruieren sein. Das bedeutet, dass sowohl die Funktion als auch die Masse von der Methode berücksichtigt werden müssen. Es ist erforderlich, dass die Methode den Konstrukteur mit Hilfsmitteln bei der Analyse und der Strukturierung der Funktionen unterstützen muss. Außerdem muss die Methode Funktionen auf ihre unterschiedliche Wichtigkeit für den Kunden hin untersuchen: Funktionen, die der Kunde nicht will, können z. B. weggelassen werden und damit kann Masse eingespart werden, weil jede Funktion zu ihrer Erfüllung Masse benötigt.

Massegerechtes Konstruieren erfordert, dass die Methode die Masse als Optimierungskriterium berücksichtigt. Da leichtbaugerechte Produkte das Ziel sind, muss der Konstrukteur bei der Massenreduktion unterstützt werden. Hierzu müssen die Bauteil- und Baugruppenmassen analysiert, visualisiert und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Am Anfang des Produktentwicklungsprozesses müssen Massenziele erarbeitet und festgelegt werden, um die Zielerreichung bewerten zu können (Ponn & Lindemann 2011). Diese Ziele müssen Wettbewerbs- und Vorgängerprodukte sowie Kundenwünsche berücksichtigen.

Um Wettbewerbs- und Vorgängerprodukte zu optimieren oder um Rückschlüsse aus ihnen für eine Neuentwicklung zu gewinnen, muss der Konstrukteur diese analysieren. Die Methode muss den Konstrukteur beim Analysieren bestehender Produkte systematisch unterstützen. Wird die Masse und ihre Verteilung erst in späten Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt, können Nacharbeit und Iterationen im Produktentwicklungsprozess nötig werden, weil die definierten Ziele nicht erreicht wurden (Ponn & Lindemann 2011). Damit ergibt sich zum einen die Forderung, dass die Masse als Optimierungskriterium schon in frühen Phasen der Produktentwicklung

berücksichtigt werden muss. Zum anderen muss die Verteilung der Masse innerhalb des Produkts berücksichtigt werden, da eine reine Massenreduktion ohne Betrachtung der Massenverteilung zu einer verschlechterten Massenverteilung führen kann und damit Produkteigenschaften negativ beeinflusst werden können. Für rotatorisch bewegte Bauteile ist neben der Masse und der Massenverteilung das Trägheitsmoment bedeutend. Daraus lässt sich die Forderung ableiten, dass auch das Trägheitsmoment systematisch berücksichtigt werden muss.

In der Literatur des Leichtbaus werden verschiedene Leichtbaustrategien aufgeführt (Kopp 2011, Klein 2011). Die Methode muss die Anwendungsmöglichkeiten aller Leichtbauansätze aufzeigen und bei der Auswahl der passenden Leichtbaustrategie unterstützen (Stokinger 2007). Außerdem muss der Konstrukteur beim Synthetisieren von Lösungen mit Hilfe der Leichtbauansätze unterstützt werden.

Mit Leichtbau ist unter anderem die Betrachtung von Eigenfrequenzen, Eigenformen, Akustik, Sicherheit (Ponn & Lindemann 2011), Steifigkeit, Kosten (Wiedemann 2007), Fertigbarkeit (Degischer 2009) und Rezyklierbarkeit (Kopp et al. 2011) verbunden. Um diese Kriterien zu berücksichtigen, müssen sie in die Bewertung und Auswahl der entstandenen Lösungen eingehen. Im Einzelfall ist dabei zu entscheiden, welche Kriterien mit welcher Gewichtung eingehen. Um den Konstrukteur bei der Bewertung zu unterstützen, muss die Methode ein Bewertungswerkzeug enthalten:

- Erzielt die Methode diese Effekte, so weist sie einen Nutzen auf. Es ist erforderlich, dass dieser Nutzen größer ist, als der Aufwand der für die Anwendung der Methode entsteht. Damit ist die Methode effizient.
- Die Methode muss eine ausreichende Problemspezifität aufweisen, die es dem Nutzer ermöglicht, sie als für sein Problem passend zu erkennen (Binz et al. 2011).
- Da die in Tabelle 1 formulierten Anforderungen alle von der Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren erfüllt werden müssen, wird nicht zwischen Forderungen und Wünschen unterschieden, wie dies von Pahl und Beitz (Pahl et al. 2007) vorgeschlagen wird.

6 Diskussion der Ergebnisse

Das Erarbeiten der Anforderungen hat gezeigt, dass vor allem die Anforderungen, die die Nützlichkeit der betrachteten Methode betreffen, spezifiziert werden mussten. Dies zeigen die Anforderungen Nr. 20 bis 30, in die die Ziele eingehen, die mit der Anwendung der Methode erreicht werden sollen. Auch zu den Anforderungen zur Kompatibilität der Methode gehören spezielle Forderungen, wie die nach der Kompatibilität mit der Vorgehensweise nach VDI 2221 (VDI 1993) oder nach der Rechnerintegrierbarkeit. Diese Forderungen lassen sich nicht auf alle Methoden der Konstruktion übertragen. Jedoch können alle anderen Anforderungen, die erstellt und aus den Anforderungsgruppen nach Keller & Binz (2009, 2010) und Binz et al. (2011) abgeleitet wurden, an alle Methoden der Konstruktion gestellt werden.

Für eine Bewertung bestehender Methoden oder eine Evaluation einer neu entwickelten Methode stellt sich die Frage, wie sich die Anforderungen überprüfen lassen. Dies ist für einige Anforderungen, wie z. B. Anforderung 12, die die Unterstützung bei der Komplexitätsbewältigung fordert, nicht trivial. Dennoch müssen für die einzelnen Anforderungen Kriterien formuliert werden, die zumindest eine qualitative Überprüfung ermöglichen. In manchen Fällen, wie beispielsweise Anforderung 32, die fordert, dass die Methode dem Nutzer effizient erscheinen muss, ist nicht im Vorfeld sicherzustellen, dass diese Anforderung in jedem Fall und für jeden Anwender zutrifft. Auch hier müssen (qualitativ) überprüfbare Kriterien gesucht werden, die in Pilotstudien auf generelle Gültigkeit überprüft werden und Indizien für die Erfüllung der Anforderung liefern.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufbauend auf der breiten Recherche der Anforderungen und Anforderungsgruppen an Konstruktionsmethoden nach Keller & Binz (2009, 2010), (Binz et al. 2011) konnten Anforderungen an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren abgeleitet werden. Durch eine Literaturrecherche im Bereich Leichtbau und Leichtbaumethodik konnten die allgemeinen Anforderungen an Konstruktionsmethoden konkretisiert und durch leichtbauspezi-

fische Anforderungen ergänzt werden. Dadurch ist eine Anforderungsliste an eine Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren entstanden. Anhand dieser Anforderungsliste können bestehende Methoden zum leichtbaugerechten Konstruieren bewertet werden. Außerdem ist diese Anforderungsliste die Basis für die Entwicklung einer neuen Methode zum leichtbaugerechten Konstruieren. Die Anforderungsliste kann hierbei zwei Zwecken dienen. Zum einen stellt sie die geklärte Aufgabenstellung dar, zum anderen unterstützt sie die Evaluation dieser neu entwickelten Methode.

8 Danksagung

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts BI 746/11-1 Entwicklung einer Methode zum funktions- und masserechten Konstruieren.

Literaturverzeichnis

- Wiedemann, J. 2007: Leichtbau, 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Ponn, J. & Lindemann, U. 2011: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Lindemann, U. 2009: Methodische Entwicklung technischer Produkte, Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag
- Feyerabend, F. 1990: Wertanalyse Gewicht, Methodische Gewichtsreduzierung - am Beispiel von Industrierobotern. Paderborn: Gesamthochschule Paderborn
- Klein, B. 2011: Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 9. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag
- Keller, A. & Binz, H. 2009: Requirements on Engineering Design Methodologies. In: Bergendahl, N. et. al. (Hrsg.): Proceedings of ICED'09, 203-214, Glasgow: Design Society
- Kopp, G., Burkardt, N. & Majic, N. 2011: Leichtbaustrategien und Bauweisen. In: Henning, F. & Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung, 57-76, München, Wien: Hanser-Verlag
- Verband Deutscher Ingenieure 1993: VDI 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: Beuth Verlag
- Albers, A. & Braun, A. 2011: Der Prozess der Produktentwicklung. In: Henning, F. & Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung, 5-30, München, Wien: Hanser-Verlag

- Schmidt, W. 2003: Methodische Entwicklung innovativer Leichtbau-Produkte. In: Verband Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 369, Düsseldorf: VDI-Verlag
- Stockinger, A. 2007: Neuartige Synthese- und Analysemethoden im Entwicklungsprozess flächiger Leichtbauteile. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 18. Symposium, 159-170, Neukirchen: Universität Erlangen-Nürnberg
- Hauck, C. 2006: Beitrag zur methodischen, rechnergestützten Konzeption und Prinzipiellösungsmodellierung flächiger Leichtbaukomponenten. In: Verband Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 393, Düsseldorf: VDI-Verlag
- Keller, A. & Binz, H. 2010: Methodisch-wissenschaftliche Anforderungen für die Gestaltung von Entwicklungsprozessen in interdisziplinären Forscher- und Entwicklergruppen. In: Brökel, K. et al. (Hrsg.): KT2010, 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 13-18, Barlebsen: docupoint Verlag
- Binz, H., Keller, A., Kratzer, M., Messerle, M., Roth, D. 2011: Increasing Effectiveness and Efficiency of Product Development, A Challenge for Design Methodologies and Knowledge Management. In: Birkhofer, H. (Hrsg.): The Future of Design Methodology, 79-90, Berlin: Springer-Verlag
- Degischer, H. P. & Lüftl, S. (Hrsg.) 2009: Leichtbau, Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag
- Pahl, A. et al. 2007: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

Kontakt

Dipl.-Ing. Benedikt Posner
 Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Keller, M. Sc.
 Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz
 Dipl.-Ing. Daniel Roth
 Universität Stuttgart
 Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
 Pfaffenwaldring 9
 70569 Stuttgart
www.iktd.uni-stuttgart.de

Bettina Alber-Laukant, Markus Zimmermann,
 Florian Nützel, Michael Frisch & Frank Rieg

Anforderungen an die grafische Oberfläche eines FE-Systems aus Sicht des Ingenieurs

Einleitung

In der Produktentwicklung hat sich die numerische Simulation mittels Finite Elemente Analyse als Standardverfahren etabliert. Die Wandlung von einem Spezialistenwerkzeug zu einem generellen Ingenieurtool bringt mit sich, dass theoretisches Wissen zur FEA beim Benutzer nicht vorausgesetzt werden kann und demzufolge im Programm geeignet implementiert sein muss. Ingenieure sind im Umgang mit CAE-Tools (FEM, CFD, CAD) und theoretischen Methoden (VDI 2221, DSM, DfX) im Produktentstehungsprozess vertraut. In diesem Zusammenhang ist die aktuelle Herausforderung eine Verbindung beider etablierten Werkzeugklassen zu schaffen, die bisher nicht erfolgt ist. Es fehlt die benutzerspezifische Anpassung von computergestützten Werkzeugen an die Denkweise von Ingenieuren und deren Nutzungskontext. Methodische Wissensbasen, Retrieval-Möglichkeiten und Suchroutinen für abgeschlossene Projekte sind in CAE-Programmen nicht integriert. Ergänzt werden diese Nachteile durch die hohen Anschaffungskosten von Software in Kombination mit schlechter Usability.

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Entwicklung einer Strategie für die Integration methodischer Unterstützung in eine Simulationsumgebung. Hierzu muss die Software zunächst essentielle Qualitätsmerkmale aufweisen, um für die FEA ähnliche Qualitätsstandards zu erreichen, wie sie in anderen Schritten des Produktentwicklungsprozesses üblich sind. Weiterhin muss eine Prozessunterstützung erfolgen, da für eine erfolgreiche FE-Berechnung viele Entscheidungsschritte nötig sind. Aus Akzeptanzgründen ist die Nutzbarkeit durch eine intuitive Benutzerführung, wie die Verwendung von Ablaufschemata und Best Practices in den Hilfedokumenten und den Aufbau der Menüs nach Workflowgesichtspunkten obligatorisch. Durch die umfassende Unterstützung des Anwenders kann die FEA sowohl Experten als auch Anfängern im jeweils erforderlichen Umfang bereitgestellt werden. Dies verbessert die Rahmenbedingungen für die Verwendung computergestützter Werkzeuge innerhalb des Produktentwicklungsprozesses.

Zielsetzung

Die Verwendung von computergestützten Werkzeugen für die Produktentwicklung können bei effizientem Einsatz entscheidende Vorteile im Wettbewerb erzielen. Doch vor allem ein schlechtes Pre- und Postprocessing der zur Verfügung gestellten Informationen verursacht die meisten Verzögerungen im Bereich Engineering Design. Auch fehlende Simulationsstrategien und Handlungsempfehlungen senken die Effizienz im Entwicklungsprozess. Dabei würde die Vermeidung unnötig durchgeführter Schritte im FE-Workflow Kosten stark senken. Das Primärziel ist daher die Entwicklung einer Plattform für die Integration einer unterstützenden Engineering-Methode in die Simulationsumgebung, um die ständig steigende Komplexität der FEA besser und effizienter handhaben zu können.

Anforderungen an aktuelle FEA-Systeme

Um die Anforderungen des Benutzers an moderne FEA-Systeme effektiv in der Benutzeroberfläche umzusetzen, müssen diese zunächst definiert werden. Dazu können Benutzerforen, Workshops, Support-E-mails oder Interviews mit Nutzern von FEA-Software ausgewertet

werden. In einem ersten Schritt werden das unterschiedliche fachspezifische Wissen und die verschiedenen Problemfelder erfasst. Im nächsten Schritt erfolgt eine Untersuchung der bestehenden Benutzeroberflächen und Hilfe-Systeme in Softwaresystemen, um den Stand der Technik zu analysieren sowie deren Vor- und Nachteile bewerten zu können. Mit Hilfe dieses Vorgehens konnten folgende Problembereiche aktueller FEA-Software herausgearbeitet werden:

- Eine mangelnde Verknüpfung zwischen gemeinsamen verwendeten Software-Tools verursacht Schnittstellenprobleme für den Datenaustausch
- Die Berücksichtigung unterschiedlichen Knowhows der Benutzer findet nicht statt
- Die Programme entsprechen nicht den vom Ingenieur erwarteten Qualitätsmerkmalen
- Es fehlen Best-Practices zur Unterstützung der Anwender, ohne dabei die eigenen Kreativität einzuschränken
- Eine situationsabhängige Benutzer-Unterstützung ist nicht vorhanden
- Bisher wird eine abschreckende Wirkung durch die Informationsflut vieler Hilfe-Dokumente erzielt, die Hilfe-Artefakte sind auf Dokumente beschränkt
- Keine Möglichkeiten abgeschlossene Projekte und Suchroutinen für Analogien aufrufen zu können
- Definition von Qualitätskriterien und programmtechnische Umsetzung

Um sich dieser Herausforderung, der Entwicklung einer neuen graphischen Oberfläche zu stellen, musste die gesamte Idee des User-Supports innerhalb der Simulation grundlegend neu überdacht werden. Das Thema Workflow wird dazu aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Die konstruktive Bauteilauslegung mittels FEA stützt sich auf festgelegte Schritte, welche für eine sichere und zuverlässige Auslegung notwendig sind. Das primäre Ziel ist, eine Software zu entwickeln, welche den Qualitätsstandards von Ingenieuren gerecht wird und dadurch Akzeptanz findet. In der Literatur finden sich diverse Ansätze von Qualitätsmerkmalen für Softwaresysteme, wobei der Begriff »Qualität« subjektiv und in der praktischen Anwendung schwierig zu definieren ist. Legt man die inter-

normale Norm ISO/IEC 9126 zugrunde, findet eine Definition von interner und externer Qualität der Software statt, wobei der Softwareentwickler typischerweise die Merkmale der inneren Qualität, wie Portierbarkeit, der Softwareanwender die äußeren Merkmale, wie Benutzbarkeit im Blick hat.

Im Kontext des Ingenieurs sind natürlich die Richtigkeit der Ergebnisse und die Reproduzierbarkeit eines Ergebnisses unter gleichen Randbedingungen essentiell. Die Software trägt durch korrekte Programmerroutinen dazu bei, das gewünschte Ergebnis zu erhalten, gleichzeitig kann jedoch die Benutzerunterstützung in der FEA an dem Punkt ansetzen, dass durch korrekte Wahl des FE-Typs, der Netzparameter und Randbedingungsangabe ein verlässliches Ergebnis entsteht. Die Hauptaufgabe der Benutzeroberfläche ist die Benutzerfreundlichkeit. Die Bedienungsreihenfolge stringent aufzubauen, den Ablauf konsequent von links nach rechts, von oben nach unten vorzugeben, lässt ein routinemäßiges Vorgehen bei mehrmaliger Anwendung der Software zu. Unterstützend finden Assoziationen, Analogien und redundante Signale bei der Verwendung der Icons in der graphischen Darstellung Verwendung, um damit die Aussagekraft und Wiedererkennungsfähigkeit zu erhöhen.

Die Programmierung trägt hauptsächlich zur Effizienz bei. Durch die Verwendung einer Programmiersprache, wie z.B. C, wird die Geschwindigkeit des Programmes erhöht, denn im Allgemeinen ist die Schnittstelle zu allen Betriebssystemen eine C-Schnittstelle, sodass C-Programme den schnellsten ausführbaren Maschinencode liefern. Die Benutzerunterstützung kann aber durch Zugriff auf die Hardware die Nutzung der vorhandenen Rechnerkapazitäten verbessern, indem bei der Berechnung eine Verwendung eines mehrprozessorfähigen Solvers auf mehrere CPUs erfolgt. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung einer international genormten Programmiersprache ist die Portabilität des Programmes auf unterschiedlichste Betriebssysteme, da sich neben Windows-Bürorechnern beispielsweise zunehmend MAC Betriebssysteme durchsetzen.

Die Änderbarkeit der Software ist im Bereich der Ingenieursanwendungen sehr wichtig, nachdem zunehmend gekoppelte Simulatio-

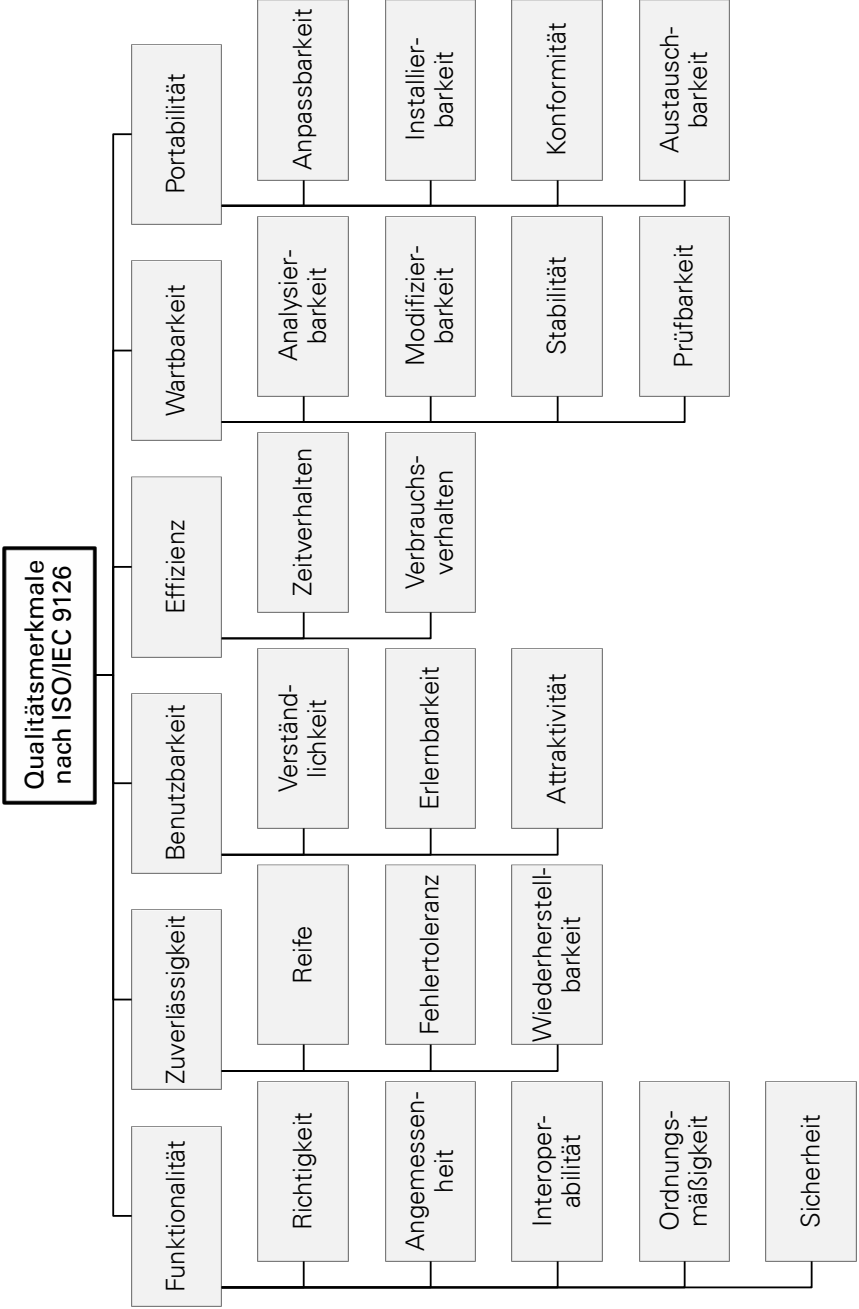


Abbildung 1: Qualitätsmerkmale von Softwaresystemen nach ISO/IEC 9126, Teil 1 (ISO/IEC 2001)










| | | | |
|----------------------|---|--|---|
| Redundant Signale |  Contour plot |  Solver |  Licht |
| Assoziationensketten |  Superelement |  Knotenpicking |  Einstellungen |
| Analogien |  Knoten |  Thermische Berechnung |  Tastatur |

Abbildung 2: Aussagekraft und Wiedererkennungswert von Icons

nen Verwendung finden. Dies ist programmiertechnisch durch einen modularen Aufbau der ProgrammROUTINEN möglich. Seitens der Benutzeroberfläche kann durch wechselnde Seitenmenüs und daraus aufrufbare Pop-Up Fenster die Variabilität gewährleistet werden.

Für die Erlernbarkeit des Programmes stehen Ingenieuren mehrere methodische Vorgehen zur Verfügung, die geeignet in das Programm eingebunden werden müssen. Üblicherweise existieren zwei Möglichkeiten den Benutzer bei seiner Aufgabenstellung zu unterstützen: Auf der einen Seite gibt es ein umfangreiches Handbuch, mit allen verfügbaren Informationen zu einem Programm oder einem Prozess, auf der anderen Seite gibt es immer ausgefeiltere Systeme, die mit Hilfe einer Checkliste, wie sie in klassischen Workflow-Management-Systemen verwendet werden, anzeigen, welche Schritte bereits ausgeführt wurden bzw. was noch zu tun sind. Beide Systeme eignen sich nur für mehr oder weniger fortgeschrittene Anwender. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass zu keinem Zeitpunkt des Prozessschrittes eine genaue Angabe der benötigten Informationen gemacht wird (Zapf et al. 2010).

Die Entwicklung eines Prozessführungstools, hier SPIDER (systematic procedures for simulation driven engineering research) genannt, stellt ein Konzept der situationsabhängige Benutzerunterstützung dar, welches verschiedene methodische Ansätze sinnvoll kombiniert. Neben einer einfachen Führung durch den Prozess, muss der Anwender mit den für die Lösung seiner Problemstellung notwendigen Informationen versorgt werden. Durch die Kombination von kontextspezifischen Tooltips, nützlichen und informativen Dokumenten, Best-Practices, Videos, Entscheidungsmatrizen (DSM), Benutzerabfragen sowie durch den internen Abruf und die Auswertung systemspezifischer Daten (Prozessorleistung, Graphikkarte, etc. ist es möglich, den Benutzer mit den Informationen zu versorgen, die er aktuell benötigt ohne ihn dabei mit überflüssigen Angaben zu überladen. Das Verfahren selbst wird an Hand eines praktischen Beispiels, des FEA Systems Z88Aurora, das vom Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth entwickelte wurde, erklärt. Durch ein zusätzlich aktiviertes SPIDER-Andockfenster, welches den Workflow der jeweiligen Simulation enthält, können schnell verschiedene Informationsartefakte kontextbezogen abgerufen werden. Dabei wird der Fortschritt der Simulation ebenso wie die Ergebnisse dokumentiert.

Workflowdefinition

Um für einen Workflow die verschiedenen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten zu definieren, müssen diese natürlich bekannt sein. Diese einzelnen Schritte können durch Sub-Prozesse beschrieben oder mit Hilfe von Design-Structure-Matrizen erfasst werden (Nützel et al. 2011). Damit können standardisierte Verfahren für die CAx-Prozesskette verwendet werden. Zum Einsatz kommt hier dafür das Prinzip ICROS (intelligent cross-linked simulation), das Prozesse chronologisch und sachlich logisch verknüpft (Alber et al. 2007).

Der Aufbau eines Berechnungsmodells unterteilt sich in unterschiedliche Schritte, die nacheinander abgearbeitet werden müssen, bis die Berechnung gestartet werden kann: Bereitstellung der Bauteilstruktur (Import) – Vorbereitung (Preprocessing) – Berech-

nung (Solver) – Analyse und Interpretation der Ergebnisse (Postprocessing): Das sind üblicherweise die vier großen Abschnitte einer FEA (Abbildung 3).

Der erste Schritt ist der Datei-Import. Die Auswahl eines geeigneten Austausch-Dateiformats ist immer noch eine kritische und wichtige Fragestellung. Einige Formate (STEP, STL, etc.) sind weit verbreitet, was nicht bedeutet, dass alle implementierten Datenstrukturen ohne Einschränkungen übertragen werden. Diese gebräuchlichsten Schnittstellen müssen in der Software enthalten sein, um eine breite Palette praktischer Anwendungsfälle abzudecken (Troll 2009).

Um Bauteile berechnen zu können, müssen sie durch ein FE-Netz diskretisiert werden. Erst dann können die Randbedingungen und Lasten aufgebracht werden. Normalerweise enthalten FE-Programme nur ein Vernetzungsmodul. Z88Aurora stellt verschiedenen Free- und Mapped-Mesher mit diversen einstellbaren Vernetzungsparametern bereit. Damit kann in Abhängigkeit der jeweiligen Aufgabenstellungen die FE-Netzqualität angepasst werden.

Um realistische Lastsituationen simulieren zu können, müssen die entsprechenden Randbedingungen und Lasten schnell und sicher von Benutzer auf das vernetzte Bauteil aufgebracht werden.

Die vorbereitete FE-Aufgabenstellung wird anschließend mit Hilfe eines FE-Solvers gelöst. Z88Aurora stellt in Abhängigkeit des FE-Modells und der verwendeten Computer Hardware verschiedene FE-Solver bereit. Damit kann das FE-Modell bzgl. von Kriterien wie Berechnungszeit und Speicherbedarf effektiv bewertet werden.

Das Postprocessing zeigt die Ergebnisse wie Verschiebungen, Spannungen, Kräfte und andere Informationen an, um die Bauteile nach den Auslegungskriterien bewerten zu können.

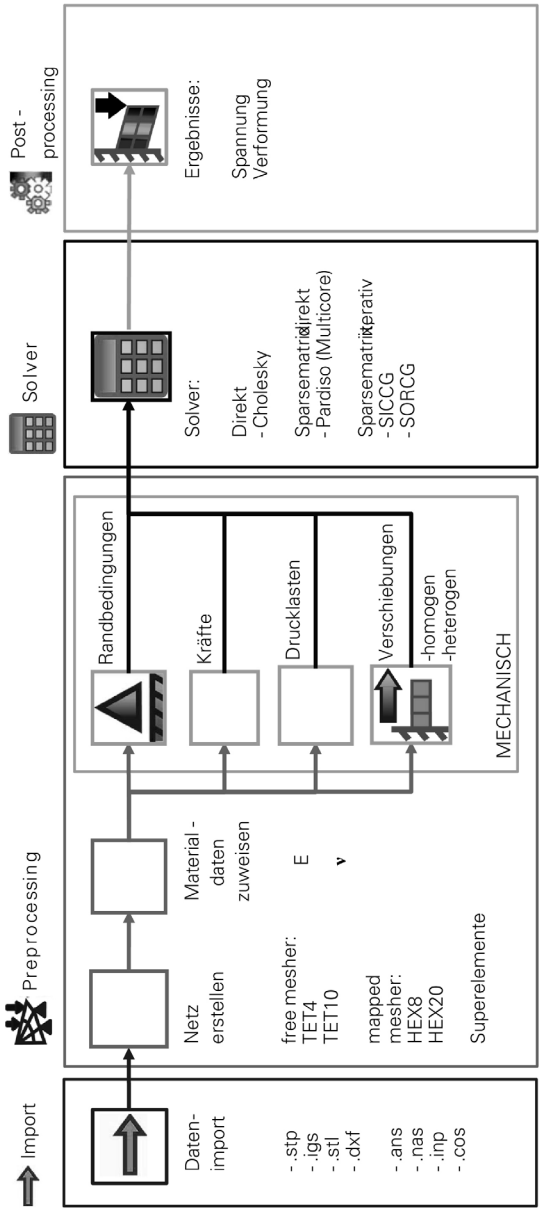


Abbildung 3: Workflow für eine statisch-mechanische FEA

SPIDER

Die kontextsensitive FE-Wissensbasis SPIDER wurde sowohl zur effektiven Unterstützung von Anfängern als auch für Experten auf dem Gebiet der FEA konzipiert. Effektiv bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das angestrebte Ergebnis mit höherer Wahrscheinlichkeit oder mit geringerem Risiko mit einer Kombination von Techniken, Methoden und Werkzeugen erreicht wird, als mit einer anderen Vorgehensweise.

| | Benutzer mit spezifischem FE-Wissen | | | Benutzer ohne FE-Wissen | |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | |
| Hilfedokumente | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | |
| Videos | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | |
| Forum | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | |
| Email | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | |
| SPIDER-Workflows | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | |

Abbildung 4: Einteilung der FEA-Anwender

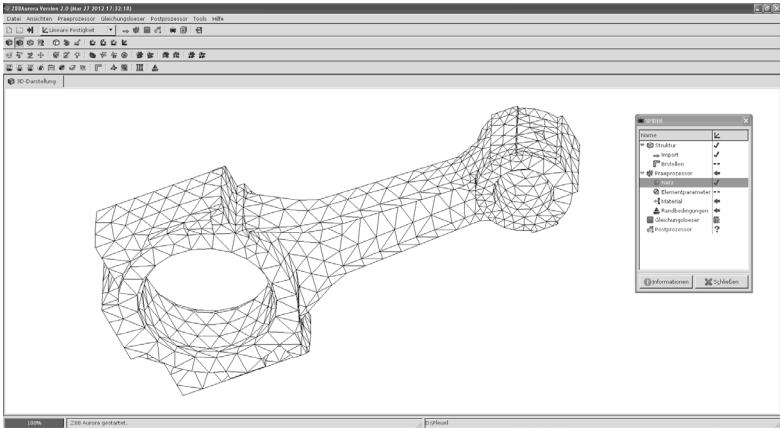


Abbildung 5: Integration von SPIDER innerhalb des FE-System Z88Aurora

Jeder einzelne Schritt des aktuellen FE-Prozesses wird mit einer Reihe von Hilfe-Funktionen und –Dokumenten unterstützt (Abbildung 4), die je nach Benutzerwissen ausgewählt werden können. Eine Checkliste zeigt den Fortschritt im FE-Workflow.

Die Benutzer des FEA-Systems können nach ihrem FE-Wissen in zwei Gruppen eingeteilt werden: In die Benutzergruppe mit bzw. ohne FE-Hintergrundwissen. Z88Aurora stellt mehrere Hilfe-Funktionalitäten (Handbücher, Mail-Support, User-Forum) bereit, die dem gängigen Benutzerverhalten angepasst wurden (Abbildung 4):

- Fortgeschrittene Benutzer der ersten Gruppe (links außen) benötigen nur wenig Hilfe, vor allem für sehr spezielle Fragen, die per Email oder im Hilfe-Forum beantwortet werden
- Weniger FE-erfahrene Ingenieure lesen die Anleitungen, um die Grundlagen zu verstehen oder verwenden die Videos
- FE-Benutzer mit geringem FE-Wissen, die selten FEA durchführen und Handbücher nicht lesen, werden durch die Video-Tutorials und Support-Emails problem-spezifisch unterstützt

Wird die SPIDER-Unterstützung in Z88Aurora gestartet, kann mit Hilfe einer Checkliste der Fortschritt im FE-Workflow angezeigt werden (Abbildung 5). Grüne Haken deuten an, dass ein Prozessschritt vollständig und richtig durchgeführt wurde und rote Kreuze, dass für die Durchführung der FEA noch weitere Angaben benötigt werden. So kann bspw. der Solver erst gestartet werden, wenn alle Angaben des Preprocessings vollständig absolviert wurden. Zusätzlich kann die noch durchzuführende Modellierungsdauer abgeschätzt werden. Klickt der Benutzer auf das Prozess-Icon, gelangt er direkt in das entsprechende Menü. Zudem besteht die Möglichkeit alle zum Prozessschritt notwendigen Dokumente und Videos direkt anzusehen.

Durchführung

Die praktische Nutzung von SPIDER wird anhand der Implementierung in das FEA-System Z88Aurora gezeigt. Natürlich könnte diese Methode zur Benutzerunterstützung auch in ein anderes Software-System integriert werden. Die Anforderungen an ein FEA-Programm, das mit einem Prozessunterstützungssystem ausgestattet werden soll, sind:

- Eine anpassbare Benutzeroberfläche
- Verschiedene problemspezifisch modifizierbare Solver
- Modulares Programmkonzept anpassbar an verschiedene Benutzer mit unterschiedlichen FE-Wissen
- Abfrage situationsspezifischer Daten zur Benutzerunterstützung

In fast der gleichen Weise muss das Programm einen Zugang zu den Programmroutinen bieten, muss demnach funktional als auch erweiterbar sein. Die Entwicklung neuer Funktionalitäten, insbesondere die Integration neuer Module in einer funktionalen Oberfläche,

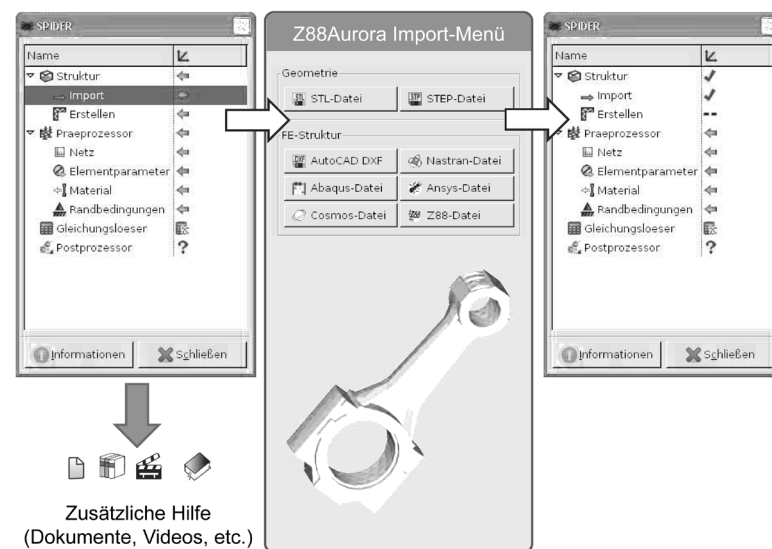


Abbildung 6: Datei-Import mit Benutzerunterstützung im FE-System Z88Aurora

muss einfach zu handhaben sein. Zudem soll die Integration neuer FE-Solver unkompliziert sein. Um das Programm schnell zu halten, erfolgt eine Aufteilung in einzelne Module: eine grafische Benutzeroberfläche, die FE-Solver und Ergänzungsmodule.

Startet der Benutzer die SPIDER-Unterstützung öffnet sich ein Menü, indem von oben nach unten der Fortschritt im FE-Workflow angezeigt wird. Der Benutzer ist angehalten die einzelnen Menüpunkte in dieser Reihenfolge durchzuarbeiten, um effizient zu handeln. Zunächst wird der Benutzer aufgefordert eine Struktur zu importieren. Klickt er im SPIDER-Menü auf Import, öffnet sich das Import-Menü von Z88Aurora. Dort besteht die Möglichkeiten diverse Geometrie- bzw. FE-Struktur-Formate zum Import auszuwählen. Unerfahrene FE-Benutzer können die dort angebotenen Hilfedokumente oder Video-Tutorials nutzen, falls sie nicht wissen, welches Dateiformat sie z.B. als Export-Format im CAD-System wählen sollen oder welche Export-Parameter für das gewählte Export-Format im CAD-System zu wählen sind (Abbildung 6). Ist der Datei-Import erfolgreich abgeschlossen, erscheint im SPIDER-Menü ein grüner Haken. Analog erfolgt die Benutzerunterstützung für z.B. Vernetzung, Randbedingungen, Solver, Ergebnisdarstellung, etc.

Ein weiterer Anwendungsbereich für SPIDER ist die Verwendung und Handhabung der Picking-Funktion in Z88Aurora (Abbildung 7) mit der Randbedingungen und Materialzuweisungen vorgenommen werden. Mit Hilfe von z.B. Video-Tutorials wird die Selektion einzelner Bauteilbereiche erklärt. Nach kurzer Einarbeitung wird der Benutzer jedoch bemerken, wie intuitiv das Picking funktioniert, da auf die Markierungsfunktion vertrauter Office-Programmen zurückgegriffen wird. Das Picking-Menü bietet auch die Möglichkeiten verschieden ausgewählte Bauteilsektionen mit Hilfe von Booleschen Operationen zu bearbeiten.

Eine weitere unterstützende Funktionalität von SPIDER ist die Einbindung der FE-Modellspezifikationen in Kombination mit der vorhandenen Hardware zur Auswahl des FE-Solvers. Abhängig von der jeweiligen Situation wird der am Besten geeignete FE-Solver vorgeschlagen (Tabelle 1).

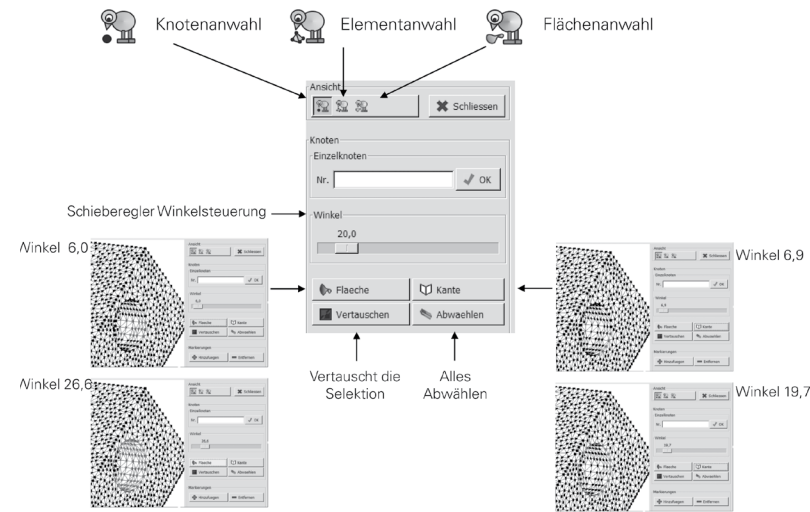


Abbildung 7: Picking-Funktion innerhalb des FE-System Z88Aurora

| FE-Solver | Cholesky | SOR-CG | SIC-CG | Pardiso |
|------------------------|-----------------------|---|---|-----------------------------|
| Typ Lösungsverfahren | direkt | iterativ | iterativ | Direkt |
| Speicherformat | Jennings | sparse | sparse | Sparse |
| Mehrprozessorfähigkeit | nein | nein | nein | Ja |
| Speicheranforderung | sehr groß | minimal | minimal | Groß |
| FE-Modellgröße | klein | sehr groß | sehr groß | je nach RAM |
| FE-Problemstellung | lange Berechnungszeit | Ergebnisse sind von Konvergenz des Gleichungssystems abhängig | Ergebnisse sind von Konvergenz des Gleichungssystems abhängig | mehrere CPU-Kerne notwendig |

Tabelle 1: Situationsabhängiger FE-Solver-Vorschlag

Qualität, Ergebnisse und Ausblick

Rechnergestützte Werkzeuge haben die Produktentwicklung in eine virtuelle Umgebung transferiert. Viele CAx-Programme sind nicht mit dem herkömmlichen methodischen Vorgehen eines Konstrukteurs verknüpft. Die verschiedenen Software-Hersteller bieten dem Benutzer häufig keine problemspezifische Hilfestellung in Echtzeit. Daraus resultieren mehrere Probleme:

- Aufgrund der schnellen Software-Entwicklung entstehen Divergenzen zwischen Programm-Funktionalität und Benutzer-Training
- Realistische Simulationen erfordern einen hohen Schulungsaufwand
- Änderungen zwischen verschiedenen Software-Versionen verursachen Probleme bei der Wiederverwendung von existierenden Datenpools
- Programmpotentiale werden wegen fehlender Vorgehensweisen meist nicht vollständig ausgeschöpft
- Fehlen eines richtigen User-Supports und einer Best Practices-Vorgehensweise in übersichtlicher Art u. Weise
- Datenbanksysteme können das Aufrufen und Bearbeiten alter Datensätze erschweren
- Verwendung von numerischen Methoden impliziert eine kritische Prüfung der Ergebnisse
- Ergebnisinterpretation ist von entscheidender Bedeutung für die Simulationen
- Gefahr der Fehlinterpretation

Das Prozessführungstool SPIDER verknüpft am Beispiel des FEA-Systems Z88Aurora mit der Entwicklungsmethodik und liefert einen Ansatz, um solche Probleme im Produktentstehungsprozess zu vermeiden. Mit der Hilfe von SPIDER erfolgt eine benutzerspezifische Anpassung von computergestützten Werkzeugen an die Denkweise von Ingenieuren und deren Nutzungskontext. Durch das vorgestellte Verfahren soll der Produktentwicklungsprozess effizienter gestaltet werden. Die Methodik hinter SPIDER soll im Grundsatz für diverse andere Software-Systeme anwendbar sein und sich nicht ausschließlich auf die FEA beschränken.

Literaturverzeichnis

- Alber, B.; Rieg, F.; Hackenschmidt, R. 2007: Bauteilentwicklung mit Hochleistungskunststoffen. In: MP Materials Testing, Vol. 49, p. 402-408, 2007.
- Troll, A. 2009: Systematische Einbindung der CAE-Werkzeuge in den Entwicklungsprozess. In: Meerkamm, H.; Henrich, A.; Jablonski, S.; Krcmar, H.; Lindemann, U.; Rieg, F.: Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung: Prozesse – Daten – Navigation. Shaker-Verlag GmbH, Aachen, 2009.
- Zapf, J.; Alber-Laukant, B.; Rieg, F. 2010: Customized Design Processes of Polymer Parts by Computer Aided Tools. In: Proceedings of the Design 2010, Dubrovnik, 2010.
- Nützel, F.; Alber-Laukant, B.; Neidnicht, M.; Wehmann, C.; Rieg, F. 2011: Die Korrelation von Modell- und Modellierungsparametern in der Kontaktanalyse bei Maschinenelementen. In: Veröffentlichung zu 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, Rostock.
- ISO/IEC 9126-1: Software Engineering Product Quality Part 1: Quality Model, 2011.

Kontakt

Dr.-Ing. Bettina Alber-Laukant
 Dipl.-Ing. Markus Zimmermann
 Dipl.-Ing. Florian Nützel
 Michael Frisch, M.Sc.
 Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
 Universität Bayreuth
 Universitätsstraße 30
 95447 Bayreuth

Jan Erik Heller, Judith Pollmanns & Jörg Feldhusen

Bestimmung des Produktentwicklungsaufwands basierend auf Kennzahlen am Beispiel der Luftfahrzeugentwicklung

1 Einleitung

Um im Vorfeld einer Neuentwicklung die Wirtschaftlichkeit des Produkts abschätzen zu können, müssen neben den zu erwartenden Erlösen auch die voraussichtlichen Kosten bekannt sein.

Die Bestimmung der reinen Entwicklungskosten bereits zu Projektbeginn ist in der überwiegenden Anzahl der Fälle jedoch nicht zuverlässig möglich. Zu viele und nicht quantifizierbare Einflussgrößen machen eine Prognose ungenau und führen zu meist völlig unrealistischen Kostenangaben.

Oft beschränken sich Vorhersagen auch lediglich auf eine Angabe der zu erwartenden Fertigungs- und Montagekosten und lassen die Ausgaben für den eigentlichen Entwicklungsprozess außer Acht. Mit bestehenden Methoden wie zum Beispiel dem Feature-basierten Kosteninformationssystem FEKIS (Wolfram 1994) oder dem extendierten Kosten Informationssystem XKIS (Horváth et al. 1997) lassen sich – teilweise auch schon begleitend zur Produktentwicklung – die durch die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen verursachten Aufwendungen bestimmen. Zwar überschreiten diese die Entwicklungskosten im Allgemeinen (Ehrlenspiel et al. 2007), jedoch sehen sich Unternehmen zunehmend gefordert, neben den

Herstellkosten auch die Ausgaben für die Durchführung von Entwicklungsprojekten zu minimieren (Feldhusen und Koy 2002).

Vorhandene Methoden zur Bestimmung des Entwicklungsaufwands sind vielfach darauf ausgelegt, verhältnismäßig exakte Werte zu bestimmen und benötigen daher auch entsprechend genaue Eingangsgrößen. Manche beruhen etwa auf Extrapolationsverfahren, die beispielsweise von der Anzahl der Stücklistenpositionen auf den zu erwartenden Aufwand schließen lassen. Andere basieren auf der genauen Kenntnis von spezifischen Größen des ausgestalteten Produkts, wie etwa Massen einzelner Bauteile, und bieten Formeln für die Zusammenhänge zwischen diesen und den Entwicklungskosten an. Oftmals sind zu Beginn eines Entwicklungsprojekts weder Stücklistenpositionen bekannt noch Bauteile ausgestaltet, also die für bestehende Methoden notwendigen Eingabegrößen noch nicht ausreichend definiert.

Um dennoch eine Prognose des Entwicklungsaufwands in diesem Stadium trotz des vorherrschenden unscharfen Konkretisierungs-niveaus zu erhalten, ist es notwendig eine Methode zu entwickeln, die auf wenigen, aus Grundanforderungen abgeleiteten und a priori bekannten, technischen Parametern, den sogenannten Entwurfspa-rametern, basiert.

2 Stand der Technik

Für die klassische Produktentwicklung sind Schätzungsverfahren der Kosten des Projekts für die frühen Phasen einer Neuentwicklung kaum beschrieben. Typische Ansätze basieren auf Schätzungen des Aufwands ausgehend von Erfahrungen aus Vorgängerprojekten zur Entwicklung ähnlicher Produkte. So ist es beispielsweise üblich, die Anzahl der notwendigen Zeichnungen und Dokumente abzuschätzen und in Quadratmetern zu erstellender Dokumente abzubilden. Mit entsprechenden firmeninternen Erfahrungswerten für die Anfertigungsdauer eines Dokumentenquadratmeters kann damit auf den tatsächlichen Aufwand geschlossen werden. Allerdings setzt dieses Vorgehen eine genaue Kenntnis über die Produktstruktur und insbesondere die Anzahl und Art der zu entwickelnden Kom-

ponenten voraus. (Hichert 1976) Damit stellt es sich als ungeeignet für eine Abschätzung des zu erwartenden Aufwands noch vor der eigentlichen Entwicklung oder während der frühesten Phasen der Entwicklung heraus.

Im Ansatz ähnlich sind Verfahren, die von der Anzahl der zu erwartenden Stücklistenpositionen ausgehen und basierend auf typischerweise unternehmensspezifischen Faktoren die erforderlichen Arbeitsstunden pro Stücklistenposition ermitteln. Auch bei Vorgehensweisen dieses Typs ist es notwendig, über eine genaue Kenntnis der Stückliste des zu entwickelnden Produkts zu verfügen, um Schätz-werte für den Entwicklungsaufwand zu ermitteln.

Bereits seit mehreren Jahrzehnten bedient man sich jedoch in der Softwareentwicklung Schätzverfahren, die zum Ziel haben, den Aufwand der eigentlichen Entwicklung zu bestimmen. Softwarepro-dukte rufen im Allgemeinen zu verhältnismäßig großen Teilen Ent-wicklungskosten hervor und ihre Produktion beschränkt sich üblicher-weise auf das Herstellen eines Datenträgers und einer Verpackung. Das Constructive Cost Model (COCOMO) wurde bereits 1981 von Barry Boehm vorgestellt (Boehm 1981). Es wurde kontinuierlich erweitert aber basiert im Kern nach wie vor auf der Schätzung des Aufwands aus der zu erwartenden Programmgröße des Produkts, also der zu erstellenden Anzahl an Quellcodezeilen. Des Weiteren existieren insgesamt siebzehn Faktoren, die vom Anwender der Me-thode vorab bestimmt werden müssen. Unter anderem zählen dazu die Komplexität der Entwicklung, die Ähnlichkeit mit vorhandenen Entwicklungen, die geplante Zuverlässigkeit des späteren Produkts und die Zusammenarbeitsfähigkeit des Entwicklerteams. (Boehm et al. 1995)

Eine Adaption auf die klassische Produktentwicklung maschinen-baulicher Erzeug-nisse ist bereits durchgeführt worden (Feldhusen et al. 2010). Die siebzehn Faktoren des COCOMO-II-Modells sind dazu auf die speziellen Bedürfnisse der Disziplin angepasst und zu insgesamt sieben Parametern zusammengefasst worden. So ist etwa der Innovationsgrad im Sinne der zu erwartenden Neuart-igkeit des Produkts auch in der klassischen Produktentwicklung

messbar (Hauschild und Schlaak 2001) und damit direkt zur Aufwandsbestimmung anwendbar. Dazu kommen weitere Faktoren wie zum Beispiel die Gleichartigkeit mit bereits durchgeführten Entwicklungsprojekten und die Qualifikation des Personals, die neben der Verteilung des Teams auf verschiedene Standorte eine entscheidende Rolle spielt. Obwohl viele der benötigten Faktoren bereits im Vorfeld bekannt sind oder deren Bestimmung oftmals unabhängig vom zu entwickelnden Produkt erfolgen kann, ist dennoch die Kenntnis der Größe des Produkts (also das Gegenstück der zu erwartenden Zeilen an Quellcode, beispielsweise die Anzahl der Stücklistenpositionen) unabdingbar. Somit stellt sich auch diese Methode als nicht zielführend dar, um ausgehend von den Entwurfsparametern den zu erwartenden Entwicklungsaufwand im Vorfeld adäquat zu bestimmen.

Speziell für die zivile und militärische Flugzeugentwicklung sind darüber hinaus mehrere Methoden entwickelt worden, um Lebenszykluskosten eines Flugzeugs zu bestimmen. Insbesondere wird auch auf Entwicklungskosten eingegangen.

So stellt beispielsweise Raymer eine Formel vor, um die notwendigen Stunden zu errechnen, die für die Entwicklung eines Flugzeugtyps erforderlich sind. Die Formel basiert auf sogenannten Cost Estimation Relationships und bezieht das Leergewicht des Flugzeugs, seine maximale Geschwindigkeit sowie die Größe des Flugzeugtyps ein. Über unternehmensinterne Faktoren können dann aus den abgeschätzten Stunden Kosten ermittelt werden. (Raymer 1989) Allerdings gilt die Formel ausschließlich für Flugzeuge, die zu überwiegenden Teilen aus Aluminium hergestellt werden und ist somit zum einen nicht ohne grundlegende Überarbeitungen auf moderne, zu großen Teilen aus Verbundwerkstoffen hergestellte Flugzeuge übertragbar und zum anderen auch nicht ohne weiteres auf Branchen außerhalb der Luftfahrtindustrie generalisierbar.

Eine weitere von Raymer vorgeschlagene Möglichkeit besteht darin, die Entwicklungskosten als Anteil der Produktionskosten anzugeben (Raymer 1989). Allerdings setzt dieses Vorgehen voraus, dass die Produktionskosten bekannt sind. Typischerweise sind

Abschätzungen aber erst gegen Ende oder im Anschluss an die Entwicklungsphase möglich, so dass eine Eignung zur Prognose in den frühesten Phasen ausgeschlossen ist.

Ebenfalls spezifisch für die Flugzeugentwicklung ist das von Roskam vorgestellte Modell. Er bestimmt die Entwicklungskosten in Abhängigkeit von Gewichten einzelner Schlüsselkomponenten des zu gestaltenden Flugzeugs. So ist es beispielsweise notwendig, das Leergewicht des Flugzeugs sowie die einzelnen Gewichte von Rädern, Bremsen, Triebwerken, Startern, Kühlmitteln, allen aus Gummimaterialien hergestellten Bauteilen, Batterien, Instrumenten, Feuerlöschsystemen, Klimaanlage und der APU zu kennen, bevor eine Kostenschätzung vorgenommen werden kann. (Roskam 1990) Typischerweise sind jedoch diese detaillierten Gewichtsaufteilungen zu Beginn einer Neuentwicklung noch nicht bekannt. Nachteilig für eine Adaption dieses Modells erweist sich ferner, dass die zugrunde liegende Datenbasis aus den 1970er Jahren stammt. Mit einer einfachen Aktualisierung der Datenbanken lässt sich das Modell nicht zufriedenstellend anpassen, da wesentliche technologische Entwicklungen nicht im Formelwerk erfasst worden sind. Darüber hinaus erscheint wie beim vorhergehend vorgestellten Modell von Raymer eine Übertragbarkeit auf andere Branchen schwierig. Da nicht jede Entwicklung eines Produkts eine Neuentwicklung ist, können folglich nicht immer Abschätzungsverfahren für Neuentwicklungen angewendet werden. Roskam schlägt daher einen Komplexitätsfaktor (difficulty factor) vor, der jedoch nach eigenem Ermessen mit den errechneten Kosten multipliziert wird, um ein realistischeres Ergebnis zu erhalten. (Roskam 1990)

Die existierenden Methoden ermöglichen es, Entwicklungsaufwand gemessen in Stunden oder direkt die Entwicklungskosten zu bestimmen. Allerdings benötigen sie jeweils verhältnismäßig genaue und detaillierte Eingabegrößen, die weit über die grundlegenden Entwurfsparmeter hinausgehen und typischerweise erst in fortgeschrittenen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt werden können.

3 Methodik zur Bestimmung des Produktentwicklungsaufwands

Im Folgenden soll daher eine Methodik vorgestellt werden, deren Ziel es ist, ausgehend von Entwurfparametern oder grundlegenden Anforderungen die zu erwartenden Kosten der Produktentwicklung zu bestimmen.

3.1 Konzeption und Aufbau der Methodik

Die Methodik besteht aus zwei Komponenten, von denen die erste eine Methode darstellt, die dazu dient, das im zweiten Schritt zu verwendende Modell aufzustellen und mit bestehenden Daten zu füllen. Die zweite Komponente ist die eigentliche Methode zur Bestimmung des Entwicklungsaufwands. Sie bedarf eines funktionsfähigen Modells, also muss die erste Methode mindestens einmal durchgeführt werden, bevor mit der Aufwandsbestimmung begonnen werden kann. Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Methodik und das generelle Vorgehen.

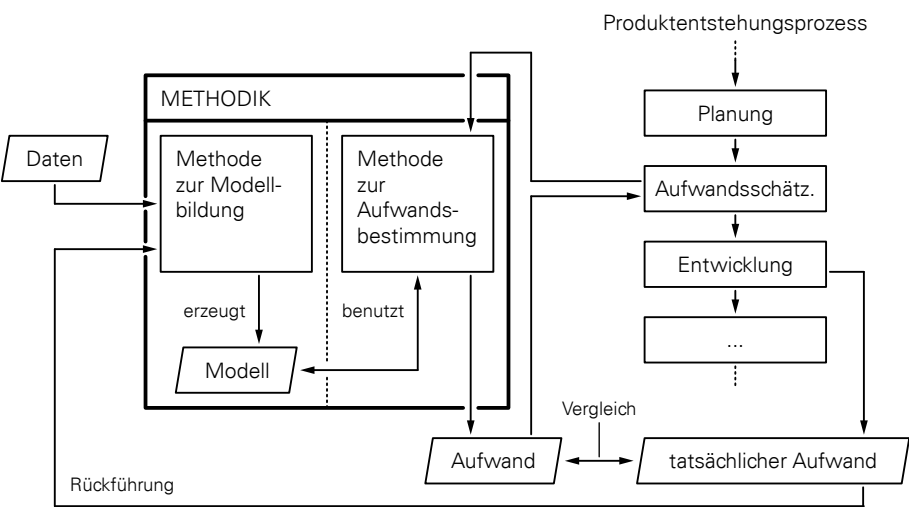


Abbildung 1: Aufbau der Methodik und generelles Vorgehen beim Bestimmen des Aufwands

Der Methodik liegt die Hypothese zugrunde, dass sich Produkte unter anderem durch physikalische Parameter beschreiben lassen. Als Beispiel seien Masse oder Volumen eines Produkts oder einer Komponente aufgeführt. Weiterhin besagt die Hypothese, dass sich aus diesen technischen Parametern Zusammenhänge mit ökonomischen Daten, wie etwa den Entwicklungskosten ermitteln lassen. Typischerweise können drei Arten von Zusammenhängen identifiziert werden: Skaleneffekte, statistische Modelle oder auf Formeln basierende, mathematische Zusammenhänge. (Duverlie und Castelain 1999) Letztere sollen für die hier vorgestellte Methodik zum Einsatz kommen. Außerdem soll die Hypothese gelten, dass der Aufwand einer Entwicklung abhängig vom jeweiligen Jahr, in dem sie durchgeführt wird, ist. Auf Grund des technischen Fortschritts erscheint es legitim davon auszugehen, dass eine Entwicklung eines Produkts zu einem bestimmten Zeitpunkt einen größeren Aufwand hervorgerufen hat, als die Entwicklung desselben Produkts mehrere Jahrzehnte später.

3.2 Modellbildung

Bevor die Methode zur Aufwandsbestimmung angewendet werden kann, ist es notwendig, die Modellbildung durchzuführen, um die mathematischen Zusammenhänge zwischen Parametern und ökonomischen Daten aufzustellen. Die dazu nötigen Schritte können Abbildung 2 entnommen werden.

Der erste Schritt ist das Ermitteln eines geeigneten Satzes an technischen Parametern. Geeignet bedeutet hierbei, dass idealerweise solche Parameter herangezogen werden, die das Produkt eindeutig klassifizieren und einen wichtigen Einfluss auf den Entwicklungsaufwand haben. So ist beispielsweise die Masse ein wesentlich sinnvollerer Parameter als etwa die Farbe, da diese im Allgemeinen keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf die Produktentwicklung hat. Darüber hinaus hat es sich als zielführend erwiesen, aus den Entwurfparametern Kombinationen zu bilden, um ein besseres Maß für den Aufwand zu erhalten. Zum Beispiel ist die benötigte Länge der Landebahn eines Passagierflugzeugs alleine betrachtet zwar schon ein Maß für den Aufwand, da Flugzeuge, die nur eine kurze Landestrecke benötigen, technologisch aufwendiger

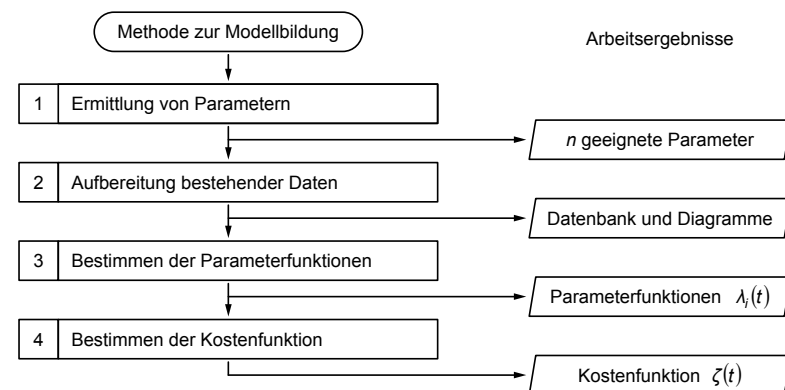
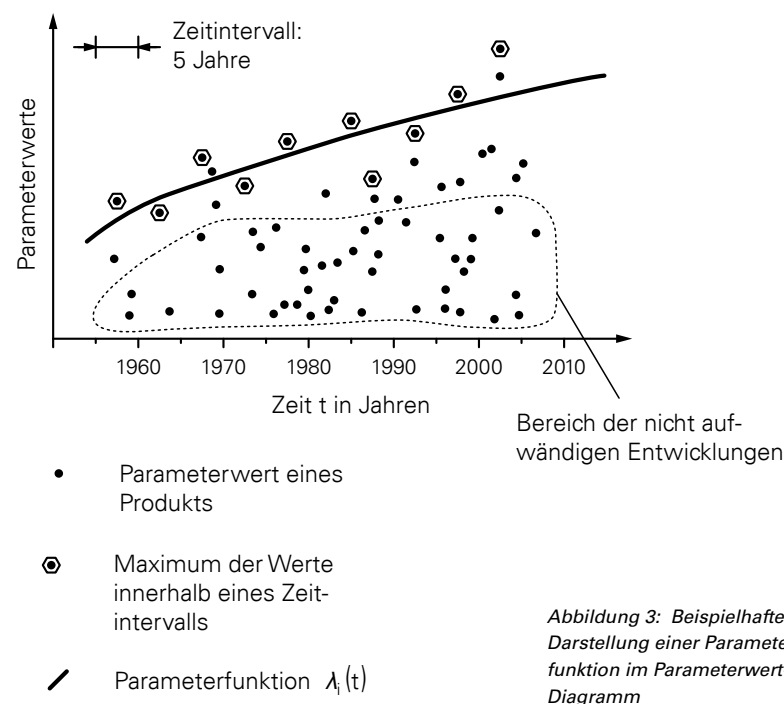


Abbildung 2: Arbeitsschritte der Methode zur Modellbildung



sind. Setzt man allerdings das Höchstlandegewicht eines Flugzeugs in Bezug zur Landebahnlänge, so verstärkt sich der charakterisierende Effekt, da es umso schwieriger ist, ein schweres Flugzeug zu entwickeln, dass eine kürzere Landebahn benutzen kann. Prinzipiell eignet sich jeder Entwurfparameter und jede Kombination zur Modellbildung. Allerdings steigen die Qualität des Modells und die Güte des Ergebnisses mit der Aussagefähigkeit der Parameter.

Die vorgestellte Methode basiert unter anderem auf der Analyse bestehender Daten, was bedeutet, dass zu Beginn der Modellbildung ein Vorrat an verwendbaren Datensätzen für ähnliche Produkte generiert oder ermittelt und anschließend aufbereitet werden muss. Das bedeutet, dass das Modell im zweiten Schritt mit konkreten Werten bereits durchgeführter Entwicklungsprojekte versorgt werden muss. Dazu müssen für jeden im ersten Schritt ermittelten Parameter Werte vorliegen und mit dem Jahr, in dem die entsprechende Entwicklung stattgefunden hat, verknüpft werden.

Der dritte Schritt umfasst nun das Aufstellen einer sogenannten Parameterfunktion. Dazu werden die Datenpunkte bestehend aus Werten und Jahreszahlen in das Parameterwert-Diagramm eingetragen. Abbildung 3 zeigt exemplarisch ein solches Diagramm. Je nach Produktart und -branche werden nun die Maxima oder Minima der Parameter für einen definierten Zeitbereich ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der optimale Zeitbereich individuell ermittelt werden muss und insbesondere von der typischen Dauer des Entwicklungsprozesses abhängt. Im abgebildeten Beispieldiagramm ist ein größerer Wert mit einem höheren Entwicklungsaufwand verbunden. Daher werden hier die Maxima der in den jeweiligen Zeitintervallen liegenden Werte bestimmt. Aus diesen wird dann eine nichtlineare Ausgleichsfunktion, die Parameterfunktion λ_i , ermittelt. Sind genügend und vor allem repräsentative Produktentwicklungen in das Diagramm eingetragen, spiegelt die Parameterfunktion die durchschnittliche technologische Grenze des jeweiligen Parameters im zugehörigen Zeitintervall wider. Das bedeutet, dass es keine Entwicklungen gegeben hat, die diese Grenze wesentlich überschreiten. Für jeden der im ersten Schritt ermittelten Parameter wird dieses Vorgehen einmal ausgeführt.

Im vierten Schritt wird das gleiche Vorgehen für die Entwicklungskosten der vorhandenen Datenmenge durchgeführt. Analog zu den technischen Parametern werden die Kosten über dem zugehörigen Jahr im Kostendiagramm aufgetragen und aus den Maxima der Kosten in den jeweiligen Zeitintervallen eine lineare Ausgleichsfunktion, die sogenannte Kostenfunktion ζ , bestimmt. Um eine Vergleichbarkeit der Werte zueinander zu erhalten, ist es notwendig, auf inflationsbereinigte Kostenwerte zurückzugreifen.

Nach der erfolgten Ermittlung von Parametern und dem Aufstellen von Parameter- und Kostenfunktionen mit Hilfe der Parameterwert- und Kostendiagramme ist die Modellbildung abgeschlossen.

3.3 Bestimmung des Produktentwicklungsaufwands

Mit einem bestehenden Modell kann nun mit der eigentlichen Prognose des Entwicklungsaufwands begonnen werden. Abbildung 4 zeigt dazu die grundsätzliche Vorgehensweise inklusive der jeweils notwendigen Eingangsgrößen und der Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte.

Zunächst werden die Entwurfparameter für die neu durchzuführende Entwicklung aufgestellt. Dabei handelt es sich um die grundlegenden Anforderungen an das Produkt, die schon vor Beginn der

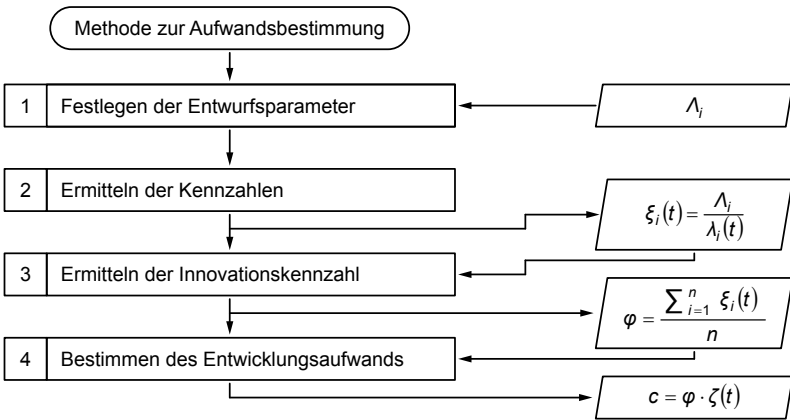


Abbildung 4: Arbeitsschritte der Methode zur Bestimmung des Produktentwicklungsaufwands

eigentlichen Entwicklungsarbeit feststehen und somit die Haupteingangsgröße für die Methode sind. Außerdem ist das Jahr, in dem die Entwicklung durchgeführt werden soll, erforderlich. Es wird benötigt, da die im Modell verwendeten mathematischen Zusammenhänge unter anderem bestehende Daten benutzen und die vorhandenen Parameter jeweils in Bezug zum Entwicklungszeitpunkt setzen.

Im nächsten Arbeitsschritt werden für jeden einzelnen Parameter Kennzahlen gebildet, die auf die prinzipielle Ähnlichkeit der vorliegenden Entwicklung mit im Datenbestand vorhandenen, bereits durchgeführten Entwicklungen schließen lassen. Dazu wird das Verhältnis ξ_i aus dem Entwurfparameter Λ_i der abzuschätzenden Entwicklung und der zugehörigen Parameterfunktion λ_i zum gewünschten Zeitpunkt gebildet. Diese Kennzahlen beschreiben dabei für jeden Parameter die Ähnlichkeit mit einer zum Zeitpunkt t durchgeführten theoretischen Entwicklung, die exakt auf der vorliegenden technologischen Grenze, welche im Modell durch die Parameterfunktion beschrieben wird, liegt.

Im dritten Arbeitsschritt wird die Innovationskennzahl φ berechnet. Sie besteht aus dem arithmetischen Mittel der einzelnen Kennzahlen ξ_i . Abhängig von der Bedeutung der jeweiligen Kennzahlen für das zu entwickelnde Produkt kann es auch hilfreich sein, die Kennzahlen zu gewichten. Das kann vor allem dann sinnvoll sein, wenn mehrere Parameter ähnliche technologische Herausforderungen beschreiben. Für diesen Fall bietet es sich an, Gruppen von Parametern zu bilden und diese durch die Gewichtungsfaktoren abzuschwächen, so dass ein ausgewogenes Bild der beschreibenden Parameter entsteht.

Als letzter Arbeitsschritt kann nun die Bestimmung des Kostenwerts c erfolgen. Das geschieht, indem die Innovationskennzahl mit der Kostenfunktion ζ des Modells multipliziert wird. Abhängig davon, ob die Entwicklungskosten im Kostendiagramm jeweils auf ein einzelnes Erzeugnis (typischerweise bei geringen Stückzahlen) oder für ein ganzes Produktprogramm (bei entsprechend großen Stückzahlen) angegeben worden sind kann nun die Angabe des Produktentwicklungsaufwands erfolgen.

3.4 Integration in den Produktentwicklungsprozess

Typischerweise bleibt es nicht bei einer ausschließlichen Prognose des Entwicklungsaufwands. Vielmehr wird ein Produkt nach erfolgreichem Abschluss der Planungsphase auch tatsächlich entwickelt. Die dabei entstandenen Kosten können während und nach Abschluss des Projekts gemessen werden und mit den vorab prognostizierten Kosten verglichen werden.

Auf der einen Seite ist diese Rückführung im Sinne einer Validierung grundsätzlich notwendig, um zu überprüfen, ob das gemäß der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Vorgehensweise aufgebaute Modell auch fähig ist, den Entwicklungsaufwand zu bestimmen. Dies ist insbesondere auch von der Wahl der richtigen Parameter abhängig. Auf der anderen Seite ist es sinnvoll, die gewonnenen Daten zusätzlich in das Modell zu integrieren. Dadurch erhöht sich die Anzahl der zu Grunde liegenden Datenpunkte in den einzelnen Parameterwertdiagrammen und dem Kostendiagramm, was zu einer präziseren Prognose führen wird. Die erforderlichen Validierungs- und Rückführungsschleifen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Soll die Methodik grundsätzlich in einen Produktentstehungsprozess als permanenter Bestandteil integriert werden, ist es sogar erforderlich, das Modell kontinuierlich nachzuführen und mit aktuellen Daten zu versehen, da es ansonsten im Laufe der Zeit den aktuellen Ansprüchen nicht mehr genügt.

4 Anwendung am Beispiel der zivilen Luftfahrzeugentwicklung

Die in Abschnitt 3 vorgestellte Methodik ist exemplarisch für die zivile Flugzeugentwicklung von Passagiermaschinen mit mehr als einhundert Sitzplätzen angewendet worden. Dazu wurde die Modellbildung durchlaufen und die zweite Komponente der Methodik in einem Software-Prototyp implementiert.

In der Flugzeugentwicklung ist es üblich, grundlegende Entwurfparameter als Top Level Aircraft Requirements (TLAR) zu bezeichnen. Diese stehen typischerweise bereits vor dem Beginn der Entwicklungs- und Konstruktionsphase fest. Außerdem lassen sie sich für

bereits erfolgte Entwicklungen aus Herstellerunterlagen ermitteln, so dass die Verfügbarkeit der notwendigen bestehenden Daten sichergestellt ist. Es bot sich also an, die für das Modell notwendigen technischen Parameter aus dem Satz der TLAR zu wählen.

Anschließend wurde die prinzipielle Eignung der Parameter für das Modell überprüft. Erwartungsgemäß übt das zulässige Startgewicht einen großen Einfluss auf den Entwicklungsaufwand aus. Allerdings reicht eine Betrachtung nur dieses Parameters alleine nicht aus, um sinnvoll auf den Aufwand zu schließen. Das Gewicht ist zwar in der Luftfahrtindustrie eine zentrale treibende Größe. Dennoch üben auch andere Trends – wie etwa der zu immer größeren Flugzeugen mit mehr Sitzplätzen – großen Einfluss auf die Komplexität der Entwicklung aus, so dass weitere Parameter nötig sind. Viele Anforderungen haben sich auch als nicht geeignet erwiesen, da sich aus ihnen keine oder nicht eindeutige Zusammenhänge zum Entwicklungsaufwand ermitteln ließen. So spielt zwar der von einem Flugzeug erzeugte Lärm eine wesentliche Rolle beim Entwurf von Flugzeuggeometrie und Triebwerken, dennoch ließ sich im

| Funktionen | Bezeichnung | TLAR |
|-------------------------------------|--|---|
| λ_1, Λ_1 bzw. ξ_1 | Höchstabfluggewicht | <i>MTOW</i> |
| λ_2, Λ_2 bzw. ξ_2 | <u>Höchstlandegewicht</u> Landebahnlänge | $\frac{MLW}{LFL}$ |
| λ_3, Λ_3 bzw. ξ_3 | Sitzanzahl · Reichweite | <i>Seats · Range</i> |
| λ_4, Λ_4 bzw. ξ_4 | <u>Sitzanzahl</u> Betriebsleergewicht | $\frac{Seats}{OWE}$ |
| λ_5, Λ_5 bzw. ξ_5 | <u>Höchstnutzlast · Reichweite</u> Statischer Schub | $\frac{Max. Payload \cdot Range}{SLST}$ |

(Parameteranzahl $n = 5$)

Abbildung 5: Parameter, die für die Beispielimplementierung benutzt wurden

Parameterdiagramm keine sinnvolle Ausgleichsfunktion ermitteln. Nach der Untersuchung einer Vielzahl an Parametern (sowohl direkt übernommene Werte als auch durch systematische Kombination vorhandener Parameter neu erzeugte Werte) konnten schließlich fünf Parameter ermittelt werden, die als besonders geeignet erschienen und anschließend im Prototyp implementiert wurden. Sie können Abbildung 5 entnommen werden. Aufgeführt sind sowohl die typischen Bezeichnungen der für die Kennzahlen verwendeten Parameter als auch die Benennung des entsprechenden Entwurfsparameters, wie er in den üblicherweise englischsprachigen TLAR verwendet wird.

Eine umfangreiche Validierung mit tatsächlich erfolgten Flugzeugentwicklungen (sowohl solche, die als Teil der Grundgesamtheit zur Modellbildung herangezogen worden sind, als auch bisher nicht betrachtete) konnte zeigen, dass die durchschnittliche Abweichung der prognostizierten von den tatsächlichen Entwicklungskosten lediglich 21,9 % betrug. Die eingangs aufgestellten Hypothesen können daher als zutreffend angesehen werden und das Modell als fähig, den Produktentwicklungsaufwand zu bestimmen.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde aufgezeigt, wie der Entwicklungsaufwand und damit auch die Entwicklungskosten eines Produkts ausgehend von technischen Parametern basierend auf bestehenden Daten schon im Vorfeld der eigentlichen Produktentwicklung bestimmt werden kann. Dabei ist die Methodik durch den zweiteiligen Aufbau grundsätzlich unabhängig von der Produktart anwendbar. Exemplarisch wurde eine Adaption für die zivile Flugzeugentwicklung präsentiert.

Die vorgestellte Methodik zur Abschätzung des Produktentwicklungsaufwands ist in einem interdisziplinären Forschungsprojekt entwickelt worden, dessen Ziel es ist, den gesamten Lebenszyklus eines zivilen Luftfahrzeugs von der ersten Konzeptionierung bis hin zur Entsorgung umfassend abzubilden.

Das Projekt wird aus Mitteln der Exzellenzinitiative der Bundesrepublik Deutschland gefördert.

Literaturverzeichnis

- Boehm, B. 1981: Software Engineering Economics. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Boehm, B.; Clark, B.; Horowitz, E.; Westland, C.; Madachy, R.; Selby, R. 1995: Cost Models for Future Software Life Cycle Processes: COCOMO 2.0. In: Annals of Software Engineering 1 (1), S. 57–94.
- Duvelie, P.; Castelain, J. M. 1999: Cost Estimation During Design Step. Parametric Method versus Case Based Reasoning Method. In: Int J Adv Manuf Technol (15), S. 895–906.
- Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U. 2007: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6. überarbeitete und korrigierte Auflage. Berlin: Springer.
- Feldhusen, J.; Koy, M. 2002: Methode zur Produktivitätsmessung für Entwicklung und Konstruktion. In: Konstruktion (9), S. 49–54.
- Feldhusen, J.; Pollmanns, J.; Heller, J. E. 2010: Prognose des Entwicklungsaufwands. Adaption des COCOMO Modells auf die Produktentwicklung. In: Brökel, K., Feldhusen, J., Grote, K.-H., Rieg, F. und Stelzer, R. (Hrsg.): 8. gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2010. Barleben: docupoint.
- Hauschild, J.; Schlaak, T. M. 2001: Zur Messung des Innovationsgrades neuartiger Produkte. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 71.
- Hichert, R. 1976: Praktische Ansätze zur Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanung in Entwicklung und Konstruktion. In: Moll, H. H. (Hrsg.): RKW-Handbuch Forschung, Entwicklung, Konstruktion. Ergänzbare Handbuch für Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Verwaltung. Berlin: Schmidt (3).
- Horváth, P.; Gleich, R.; Scholl, K. 1997: Vergleichende Betrachtung der bekanntesten Kalkulationsmethoden für das kostengünstige Konstruieren. In: Männel, W. (Hrsg.): Frühzeitiges Kostenmanagement. Kalkulationsmethoden und DV-Unterstützung. Wiesbaden: Gabler, S. 111–131.
- Raymer, D. P. 1989: Aircraft Design. A Conceptual Approach. Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Roskam, J. 1990: Airplane Design. Airplane Cost Estimation. Design, Development, Manufacturing and Operating. Ottawa: Roskam Aviation and Engineering Corporation (Airplane Design, 8).
- Wolfram, M. 1994: Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren. München: Hanser.

Kontakt

Dipl.-Ing. Jan Erik Heller
Dipl.-Ing. Judith Pollmanns
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen
RWTH Aachen University
Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstraße 54B
52074 Aachen
www.ikt.rwth-aachen.de

Emanuel Richter, Axel Spickenheuer & Gert Heinrich

Entwicklungs- und Designmethoden für hochintegrale Leichtbauteile aus Faser-Kunststoff-Verbundmaterial

Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)-Werkstoffe finden einen immer breiteren Einsatz in allen Bereichen der Industrie, wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt, im Automotive-Bereich, im Maschinenbau und bei Sportgeräten. Dabei entstehen besondere Herausforderungen für Entwickler, da Eigenschaften und Verfahren im Zusammenhang dieser Werkstoffe sich deutlich von denen der herkömmlich verwendeten Metalle oder unverstärkten Kunststoffe unterscheiden.

Technische Fasern werden in verschiedenen Verarbeitungsformen und in Kombination mit vielfältigen Matrixsystemen angewendet. Ein Großteil der Fasern wird heutzutage in Form von multiaxialen Geweben oder Gelegen verarbeitet. Bei diesen Halbzeugen sind die Fasern in mehreren Lagen unterschiedlicher Ausrichtung übereinandergelegt. Metalle können damit sehr einfach durch leichtere Faser-Kunststoffverbunde ersetzt werden. Diese Technologien versuchen weitestgehend isotrope Bauteileigenschaften aus den eigentlich anisotropen Materialeigenschaften zu erzielen. Dies reizt jedoch das Potential der Werkstoffe nicht aus.

Am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (IPF) werden Methoden entwickelt, um die Leistungsfähigkeit faserverstärkter Kunststoffe weiter zu steigern. Unter Verwendung der hier entwik-

kelten Tailored Fiber Placement (TFP)-Technologie (Gliesche et al. 1995 & Mattheij et al. 1998) können Fasern in der Ebene in beliebigen Orientierungen abgelegt werden. Dadurch können die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften, wie hohe Festigkeit- und Steifigkeit, insbesondere von Carbonfaser-Verbunden wesentlich besser ausgenutzt werden. Zudem ergeben sich so für den Bauteilentwickler zahlreiche Freiheitsgrade bei der Gestaltung von FKV-Strukturen.

In diesem Beitrag werden verschiedene Methoden vorgestellt, die zur Bauteilauslegung und -gestaltung eingesetzt werden können um ein beanspruchungsgerechtes Design für Bauteile mit extrem hohem Leichtbaupotential zu finden. Als Anwendungsbeispiel dient hierzu der Fuß des humanoiden Roboters Myon. Seine Aluminiumstruktur wird durch einen beanspruchungsgerecht eingesetzten carbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK) ersetzt. Zur Reduktion der Masse der Hauptplatte des Fußes werden Methoden der Topologie- und Materialoptimierung unter Einhaltung der Steifigkeitsanforderungen angewendet. Im Sinne des Systemleichtbaus und zur weiteren Reduktion der Strukturmasse wurden vorhandene konventionelle Maschinenelemente aus Metall beispielsweise durch eine Blattfeder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) ersetzt bzw. ein neuartiges in den FKV integriertes Elastomergelenk entworfen.

Der ursprüngliche Roboterfuß des Myon

Der Roboter Myon wurde als Plattform für Lernalgorithmen von der Arbeitsgruppe der Neurorobotik der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelt. Der 15 kg schwere Roboter besitzt eine Größe von 1,25 m und ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Füße des Roboters (in Abbildung 1 rechts) bestehen im Wesentlichen aus einer Hauptplatte, die an das Knöchelgelenk angebunden ist, und einer Zehenplatte. Das Gelenk der Zehenplatte wird durch eine Schenkelfeder passiv zurückgestellt. An der Gelenkachse ist ein Potentiometer installiert, um den Anstellwinkel der Zehenplatte während der Bewegung des Roboters zu messen. Die Füße sind des Weiteren mit Kraftsensoren ausgestattet, um an der Fußsohle die Belastungen beim Auftreten zu messen.

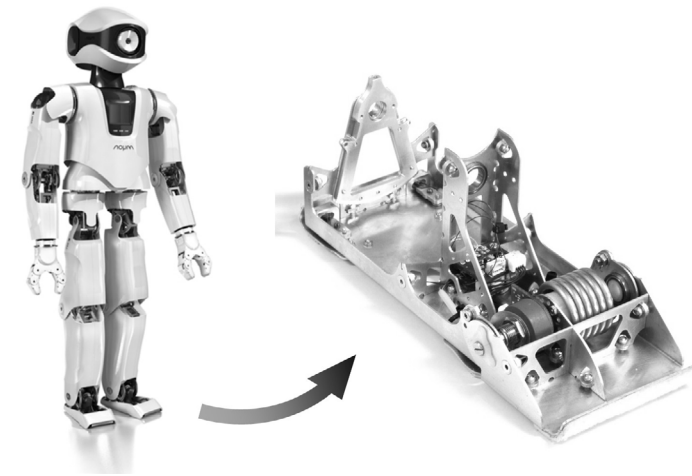


Abbildung 1: Darstellung des humanoiden Roboters Myon (links, Frackepohl Poulheim 2012) und des bestehenden Fußes in Aluminiumbauweise (rechts).

Für das Redesign des Fußes wurden die Anschlussmaße des Knöchelgelenkes und die Dimensionen der bestehenden Hauptplatte und Zehenplatte vorgegeben. Hieraus ergab sich der in Abbildung 2 dargestellte Designraum. Weitere Randbedingungen waren die Höchstbelastung auf die Fußsohle von 200 N und der maximale Anstellwinkel der Zehenplatte von ca. 70° bei dieser Kraft, der über einen Anschlag begrenzt wird.

Unter Beachtung der angestrebten Fertigungsverfahren (TFP und Vakuuminfusionsverfahren) und der notwendigen Schalengestalt ergibt sich ein erster Designentwurf, der in Abbildung 2 rechts dargestellt ist.

Optimierung der Hauptplatte

Als größtes und zentrales Einzelteil des Fußes ist die Hauptplatte für Design und Struktur das entscheidende Element. Die Anwendung einer Strukturoptimierung mit dem Ziel der Massereduktion

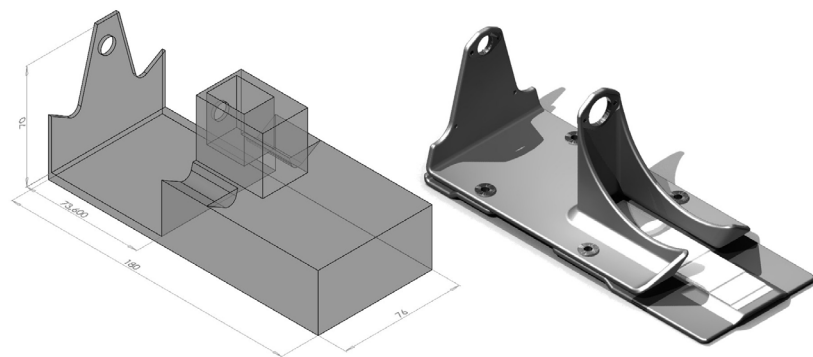


Abbildung 2: Für das Bauteil zur Verfügung stehende Designraum (links) und der erste Designentwurf (rechts)

ist durch das anteilig hohe Bauteilvolumen hier besonders sinnvoll. Durch die Kombination von Topologie- und Materialoptimierung konnte bereits das hohe Potential einer optimalen Materialausnutzung von FKV nachgewiesen werden (Spickenheuer et al. 2009a). Daher wurde ein entsprechendes Vorgehen auch im Falle der Hauptplatine durchgeführt.

Bei der Topologieoptimierung werden iterativ wenig beanspruchte Bereiche des Bauteilvolumens entfernt. Dabei kommen Analysemodelle auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) in Verbindung mit optimalitäts- bzw. gradientenbasierten Optimierungsverfahren zur Anwendung. Als Ausgangsmodell dient ein fein vernetzter Designraum mit den entsprechenden Randbedingungen für Bauteilbelastung und Einspannung.

In Abbildung 3 sind das Ausgangsmodell (links) und der Designvorschlag (rechts) als direktes Ergebnis der Topologieoptimierung dargestellt. Aus diesem Designvorschlag wurde die spätere optimierte Struktur abgeleitet. Für einen Designvorschlag von hoher Qualität ist es wichtig, möglichst viel Designraum zur Optimierung zur Verfügung zu stellen. Das Design des Bauteils ist bei diesem Verfahren bestimmt durch die Gestaltung des Designvorschlages und durch die Optimierungsparameter. Der finale Optimierungsvorschlag,

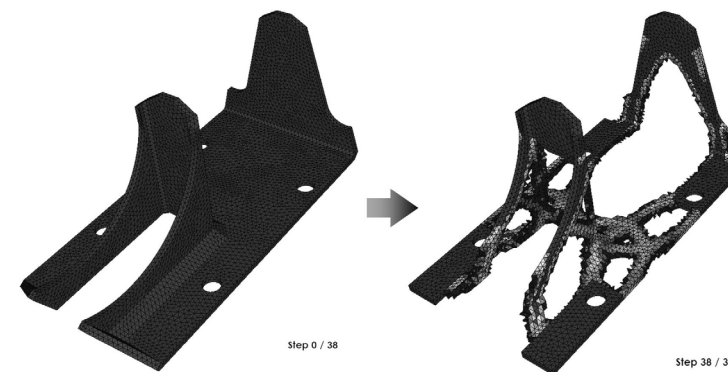


Abbildung 3: Topologieoptimierung der Hauptplatte; Designraum (links) und Designvorschlag der Optimierungssoftware (rechts)

welcher sowohl ästhetischen als auch mechanischen Ansprüche genügt, wird schließlich unter Beachtung der Prozessmöglichkeiten auf das ursprüngliche Modell übertragen.

Im Anschluss wird eine Materialoptimierung ausgeführt, bei der die Faserorientierungen den Lastverläufen im Bauteil angepasst werden. Mit dem am IPF entwickelten Softwaretool »AOPS« (Spickenheuer et al. 2008 & Spickenheuer et al. 2009b) werden dazu bei einem gegebenen Lastfall die anisotropen Materialeigenschaften entsprechend den berechneten Hauptspannungsvektoren ausgerichtet. Auf Basis des Hauptspannungsvektorfelds wird eine Linienintegration durchgeführt, welche Grundlage für die späteren Faserverläufe ist.

Diese Faserverläufe, die zu einer optimalen Bauteilsteifigkeit führen, sind oft nicht geradlinig und können daher am besten mit variablen Preformverfahren abgebildet werden, wie die am IPF entwickelte TFP-Technologie (Gliesche et al. 1995 & Mattheij et al. 1998). Dargestellt ist das Verfahren in Abbildung 4. Das Stickmuster für die optimierte Hauptplatte zeigt Abbildung 5. Mit der ebenfalls am IPF entwickelten Punchsoftware »EDOPunch« (Bittrich et al. 2012) können solche komplexen Linienmuster sehr schnell und effektiv für die Umsetzung mit der Stickmaschine aufbereitet werden.

Feder und Gelenk

Die Edelstahl-Schenkelfeder des Zehengelenkes wird durch eine Blattfeder ersetzt. Durch den Einsatz von GFK wird eine erhebliche Massereduzierung erreicht – 5 g gegenüber 46 g der Edelstahl-Feder. Die Geometrie der neuen Blattfeder kann sehr frei gestaltet werden, da ausreichend Platz zur Verfügung steht. Eine möglichst lange und breite Feder bewirkt dabei die geringsten Materialbeanspruchungen. Mit Hilfe der FEM können die Federeigenschaften denen der bestehenden Edelstahl-Schenkelfeder angepasst werden.

Die Abwinklung der Zehenplatte ist im bestehenden Fuß über zwei Achsen mit Kugellagern umgesetzt. Bei der Umsetzung von Sohlen- und Zehenplatten aus gewebeverstärktem CFK kann die Anwinkelung durch ein Elastomergelenk umgesetzt werden. Hierzu wurde ein speziell modifiziertes Elastomer der Firma Kraiburg (Kraiburg 2012) verwendet. Die Funktionsfähigkeit dieser Technologie wird an dem in Abbildung 6 dargestellten Testbauteil demonstriert. Die Abbildung zeigt weiterhin den Fuß mit angewinkelter Zehenplatte, also gebogenem Gelenk und gedehnter Feder.

Durch die Umsetzung des Gelenkes mit einem Gummistreifen wird auf Achsen und Kugellager verzichtet und eine weitere Massereduzierung gegenüber dem Originalfuß erreicht.

Ergebnisse

Bei dem Redesign des Fußes wurde im Wesentlichen die Geometrie des Originalfußes beibehalten. Diese reizt das Potential der verwendeten Technologien und Materialien nicht voll aus. Für ein problemlos umsetzbares noch weiter reichendes und materialgerechtes Design müsste aber nicht nur der Fuß, sondern die gesamte mechanische Struktur des Roboters neu entwickelt werden.

In Summe führen die verschiedenen angewendeten Methoden zu einer Bauteilmasse des neuentwickelten Fußes von 108 g. Dies entspricht etwa der Hälfte der Masse des ursprünglichen Aluminiumfußes (210 g) bei gleichbleibenden bzw. leicht verbesserten Steifigkeitseigenschaften.

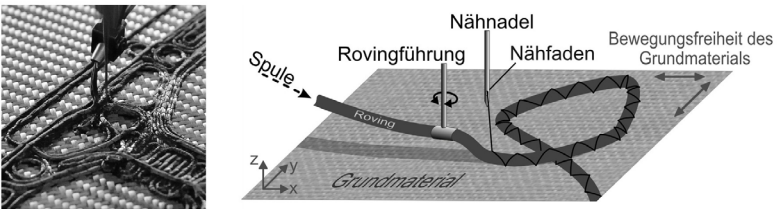


Abbildung 4: Fertigung der Preform mit der TFP-Technologie (links) und das allgemeine Funktionsschema (rechts)

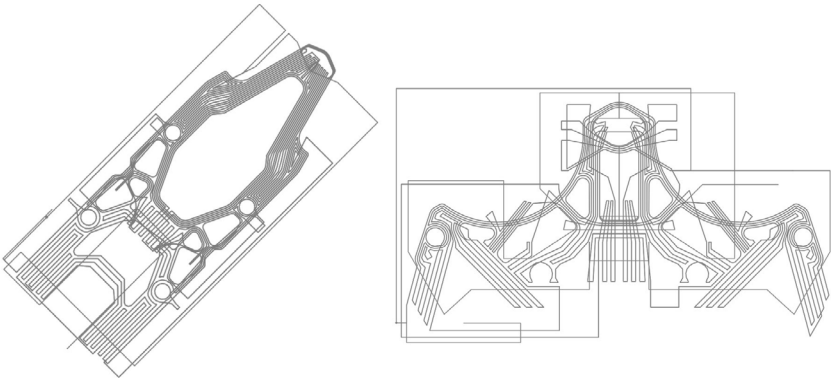


Abbildung 5: Aus den Hauptspannungsvektoren abgeleitetes, zweiteiliges Stickmuster

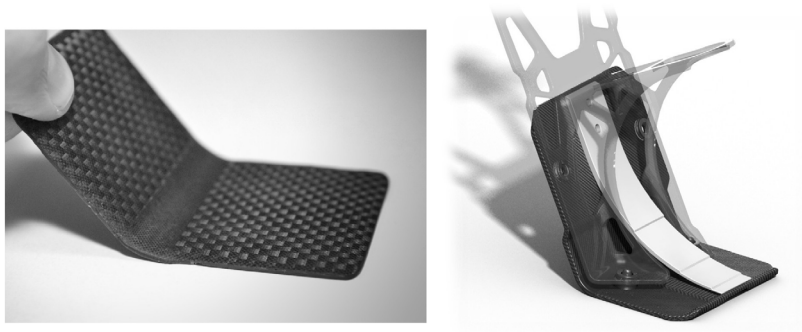


Abbildung 6: Testbauteil für das Zehgelenk (links) und CAD-Darstellung des angewinkelten Fußes (rechts)



Abbildung 7: Fertiger Fuß

Im Gegensatz zum Originalfuß ist der neue Fuß nicht in Differenzial-, sondern in Integralbauweise umgesetzt. Die Anzahl der Struktur-Einzelteile reduziert sich dadurch von über 20 auf vier. Dargestellt ist der gefertigte Fuß in Abbildung 7.

Ein weiterer positiver Effekt der offenen Struktur, die sich aus der Topologieoptimierung der Hauptplatte ergeben hat, ist ein verbessertes Handling des Fußes und eine Erleichterung der Anbringung von Elektronikkomponenten und Kabelführungen.

Weitere Elemente vom Materialmix des Fußes sind Edelstahlinserts in den CFK Bauteilen. Diese werden schon vor der Infiltration in die Preformen eingelegt und erhalten hierdurch einen Formschluss zum CFK-Material.

Die vorgestellten Methoden haben sich neben dem Roboterfuß auch bei anderen Demonstrationsbauteilen (Spickenheuer et al. 2009b & Spickenheuer et al. 2011) als günstig erwiesen und konnten mit messbarem Erfolg umgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- Gliesche, K., Feltin, D. 1995: Beanspruchungsgerechte Textilkonstruktionen für Composite-Bauteile. In: Technische Textilien, 38, 209
- Mattheij, P., Gliesche, K., Feltin, D. 1998: Tailored Fibre Placement – Mechanical Properties and Applications. In: Reinforced Plastics and Composites, 17, 774–786
- Frackenhohl Poulheim 2012: Myon Roboter.
www.frackenhohl-poulheim.de/projekte/myon-roboter/, 18.04.2012
- Spickenheuer, A. ; Uhlig, K. ; Gliesche, K. ; Heinrich, G. ; Albers, A. ; Majic, N. 2009a: Steifigkeitsoptimierung von Faserverbundbauteilen für den extremen Leichtbau. In: 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, 210–219
- Spickenheuer, A., Schulz, M., Gliesche, K., Heinrich, G. 2008: Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures. In: Plastics Rubber And Composites 37, 227–232
- Spickenheuer, A. ; Uhlig, K. ; Gliesche, K. ; Heinrich, G. 2009b: Experimental research on open-hole tensile specimens made of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) with an optimised curvilinear fibre pattern. In: Güemes, A. (Hrsg): Proceedings of V International Conference on Science and Technology of Composite Materials (COMATCOMP 09), 1001–1004
- Bittrich, L., Spickenheuer, A., Uhlig, K., Heinrich, G. 2012: EDOPunch – ein neues Tool zur Effizienzsteigerung und Optimierung von Stickmustern und Faserverbundteilen. In: Tagungsband zur 13. Chemnitzer Textiltechnik Tagung, 181–185
- Gummiwerk KRAIBURG 2012: Rubberize your composites.
www.kraiburg-composites.com, 18.04.2012
- Spickenheuer, A., Uhlig, K., Heinrich, G., Majic, N., Albers, A. 2011: Ansätze zur Strukturoptimierung für Faserverbundbauteile mit variabelaxialer Faserorientierung für den extremen Leichtbau . In: Wielage B. (Hrsg): Tagungsband zum 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 579–584

Kontakt

Dipl.-Ing. Emanuel Richter
 Dipl.-Ing. Axel Spickenheuer
 Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.
 Hohe Straße 6
 01069 Dresden
www.ipfdd.de

Prof. Dr. rer. nat. habil. Gert Heinrich
 Technische Universität Dresden
 Institut für Werkstoffwissenschaft
 Helmholtzstraße 7
 01069 Dresden
www.tu-dresden.de/ifwww

Alexander Martha, Uwe Klemme & Peter Köhler

Interdisziplinäre Prototypenentwicklung am Beispiel eines Seilroboters

1 Einleitung

An zukünftige intralogistische Systeme werden hohe Anforderungen in Bezug auf Dynamik und Flexibilität gestellt. In Verbindung mit dem übergeordneten Ziel ressourceneffiziente und klimaschonende Prozesse zu entwickeln sind innovative Lösungsansätze gefordert. Die Entwicklung eines schnellen Regalbediengerätes auf Basis der Steward-Gough-Plattform soll u. a. durch die Minimierung der zu bewegenden Massen diesen Anforderungen gerecht werden. Hier-von profitieren vor allem Flexibilität und Prozesszeiten. Das Vorhaben ist eingegliedert in ein Förderprogramm unter der Leitung des EffizienzCluster Logistik Ruhr (ECLR), welches sich u. a. mit der Bedeutung und den Potentialen der Logistik im urbanen Umfeld beschäftigt.

Der gewählte Ansatz sieht ein System vor, welches die Lasten über computergesteuerte Seilwinden mit hoher Verfahrensgeschwindigkeit bewegt. Basierend auf modernsten Regelungsverfahren sollen so die Anforderungen an sichere, schnelle und flexible Prozesse abgesichert werden. Gleichzeitig ist jederzeit die Kompatibilität mit bestehenden intralogistischen Systemen sicherzustellen sowie konstruktionsseitig ein modularer Aufbau anzustreben, um dynamisch auf Änderungen reagieren zu können.

Der entwickelte Prototyp unterscheidet sich von »konventionellen« Regalbediengeräten insbesondere durch die an acht Hochleistungs-

Kunststoffseilen aufgehängte Plattform zur Ein- und Auslagerung, welche über ein System aus Seilwinden und Seilrollen zwischen den Lagerplätzen bewegt wird. Die Herausforderung liegt neben regelungstechnischen Aspekten zur Motorensteuerung insbesondere in der Größenordnung des Prototypen: Um der späteren industriellen Anforderungen möglichst nahe zu kommen, wurde ein System entwickelt, welches mit Maßen von $10 \times 5 \times 2$ m deutlich größer ausfällt, als derzeit bekannte Seilroboter für Forschung und Entwicklung. Eine umfassende Betrachtung aktueller Anwendungen in Verbindung mit den mechatronischen Hintergründen ist u. a. in der Dissertation von T. Bruckmann enthalten (Bruckmann 2009). Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch wie konventionelle Lösungen durch Seilkinematiken substituiert werden können. Die Positionierung einer Antenne steht hier beispielhaft für eine bereits realisierte Anwendung (Abb. 1).

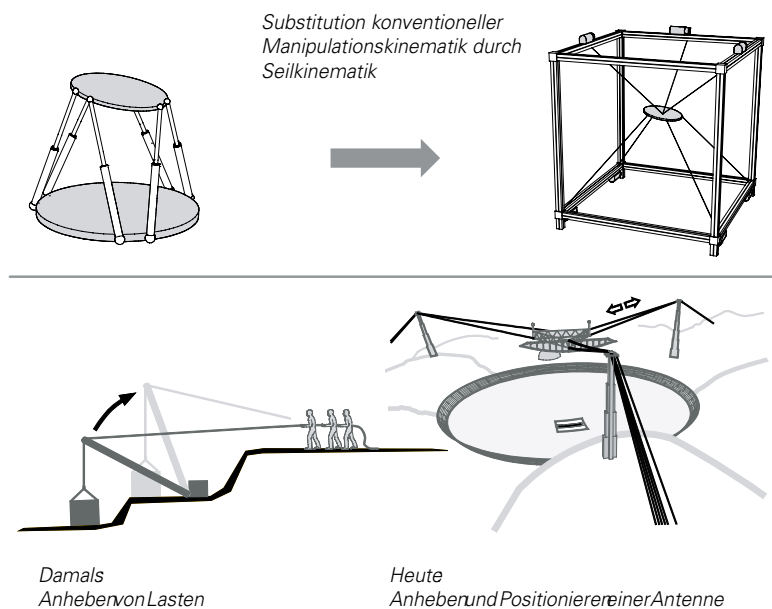


Abbildung 1: Substitution durch Seilroboter und deren Anwendung (Bruckmann et al. 2008)

Eng mit den oben genannten Vorgaben verknüpft ist die Forderung nach einer Konstruktion, die typische Merkmale eines Funktionsprototypen (Demonstrators) aufweist. Namentlich sind dies die Abbildung der angestrebten Funktion, eine hohe Flexibilität/Anpassbarkeit bei beherrschbarer Komplexität, die Einhaltung von Sicherheitsstandards, die Möglichkeit zu Online-Messungen und die Verwendung verfügbarer Standardkomponenten.

Nur durch ein interdisziplinäres Expertenteam kann mittels Zusammenführen verschiedener Kernkompetenzen die Generierung einer funktionsfähigen Lösung sichergestellt werden. Damit verbunden ist die Forderung nach fachübergreifendem Informations- und Wissensaustausch. Die praktische Umsetzung dieser Forderung innerhalb des Projekts wird im Folgenden erläutert.

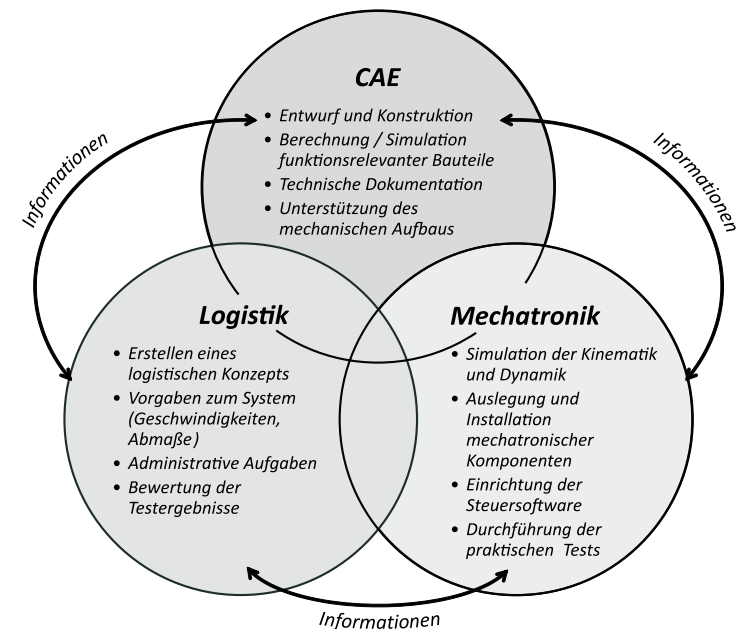


Abbildung 2: Interdisziplinäre Kompetenzen im Entwicklungsprozess

In einem ersten Schritt wurde vom Lehrstuhl Transportsysteme und -logistik ein logistisches Konzept erstellt, welches u. a. die Dimension des Systems vorgab. Diese Vorgaben wurden seitens des Lehrstuhls für Mechatronik in ein Berechnungsmodell übersetzt, um Prozessdaten und Informationen über das Systemverhalten zu ermitteln. Dazu zählen z. B. Zeiten und Wege sowie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Kräfte. Diese für die Auslegung und Dimensionierung erforderlichen Parameter bildeten u. a. die Grundlage für die Phase der Ideenfindung zur konstruktiven Umsetzung, welche am Lehrstuhl für Rechnerinsatz in der Konstruktion (CAE) umgesetzt wurde. Der Informationsfluss verläuft hier bidirektional, da durch iterative Simulation der Kinematik mit detaillierten CAD-Modellen eine Steigerung der Ergebnisgenauigkeit erreicht wird, was sich positiv auf die eingesetzte Regelungsmethodik auswirkt (Abb. 2).

Mit dieser kurzen Einführung in das Thema und die geleisteten Vorarbeiten wird im Weiteren auf das konzeptionelle Arbeiten hinsichtlich der Inhalte der Konstruktion eingegangen.

2 Mit allgemeiner Methodik zum projektgebundenen Konzept

Das Vorgehen, welches häufig unterbewusst bei der Abwicklung eines Projektes angewendet wird, wurde bereits vereinheitlicht in Normen, Richtlinien und Lehrbüchern zusammengefasst (VDI 2221–2235, Pahl et al. 2007). Diese bieten eine umfangreiche Übersicht über das systematische Vorgehen von der Definition der Aufgabenstellung, über die einzelnen Meilensteine der Bearbeitung bis hin zur Dokumentation, so dass auch die datentechnische Beschreibung eines Projektes sehr gut mit entsprechender IT-Infrastruktur unterstützt werden kann.

Dieses Vorgehen entspricht prinzipiell dem Vorgehen, wie es in einschlägiger Literatur zum methodischen Konstruieren und organisierter Produktentwicklung angeregt wird. Beispielhaft sei hier auf die Ausführungen von Roth hingewiesen (Roth 2000). Dort wird der Produktentwicklungsprozess ebenfalls in verschiedene Phasen gegliedert, die die Aufgabenformulierung, die funktionelle und die gestaltende Phase umfassen, welche jede für sich weiter unterteilt

werden kann. Für detaillierte Informationen sei hier neben dem oben erwähnten Werk beispielhaft auf weiterführende Literatur zum methodischen Konstruieren verwiesen (Ehrlenspiel, 2003; Eversheim & Schuh 2000; Boutellier et al. 2008, Pahl et al. 2007).

2.1 Die Phase der Aufgabenformulierung

Die Aufgabenstellung umfasst im vorgestellten Projekt die vollständige Neukonstruktion eines Parallelroboters für logistische Anwendungen, speziell für Regalbediengeräte. Wie zuvor erwähnt dienen Simulationen zur Bestimmung von Kräften, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als Grundlage für diese Teilaufgabe (siehe Abb. 3).

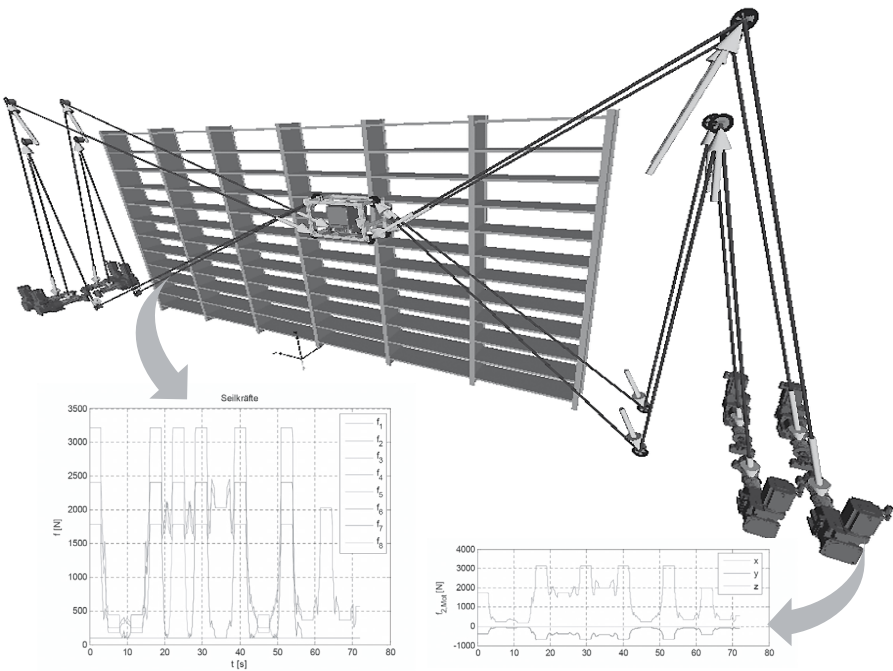


Abbildung 3: Auszug der Ergebnisse der dynamischen Simulation zur Dimensionierung (Lehrstuhl für Mechatronik)

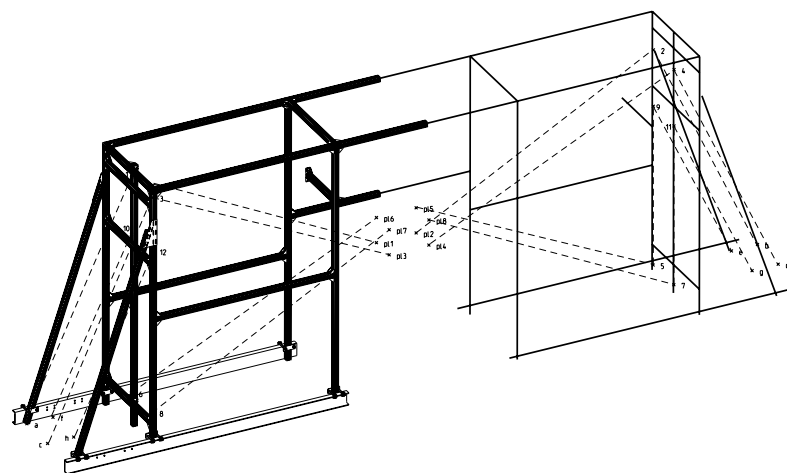


Abbildung 4: Virtuelle Umsetzung des Skelettmodells zur Positionierung

Demzufolge sind die groben Abmessungen des Bauraums und die erwarteten Belastungen für die Dimensionierung bekannt. Zusätzlich sind durch das Projektkonsortium neben dem Seildurchmesser die Antriebe im Vorfeld festgelegt worden, so dass diese den Ausgangspunkt für eine der Unterbaugruppen bilden.

Im Gegensatz zu der in der Richtlinie empfohlenen Verwendung eines klar definierten Lasten- und Pflichtenheftes sowie einer Anforderungsliste, musste auf Grund der nur unscharf formulierten Ziele ein davon abweichendes flexibles Vorgehen umgesetzt werden. Dieser Umstand der nicht klar definierten Randbedingungen ist verbunden mit der dynamischen Änderung der Anforderungen über die Bearbeitungszeit und führt demnach im ersten Ansatz zu der Überlegung, einen möglichst modularen Aufbau des Gesamtsystems zu realisieren. Diese Vorgehensweise bietet zum einen den Vorteil, dass auch zunächst ungeplante Komponenten nachträglich als weiteres Modul integriert werden können. Zum anderen bestehen so nur wenige funktionelle Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen. Damit ist die Voraussetzung für ein Vorgehen entsprechend des Simultaneous Engineering erfüllt: Es können zeitgleich verschiedene Arbeitspakete projiziert werden, wobei

stets zuvor CAD-seitig definierte geometrische Schnittstellen und Referenzen berücksichtigt werden müssen. Da die Bearbeitungszeit hier knapp bemessen ist, bietet die modulare Vorgehensweise den besonderen Vorteil, einzelne fertigkonstruierte Komponenten unmittelbar nach der Freigabe fertigen zu lassen. Ebenso lassen sich die Einzelmodule soweit aufteilen, dass unterschiedliche Werkstätten/Zulieferer entsprechend ihrer Kapazitäten effektiv beteiligt werden können.

Zur Abbildung der soeben erwähnten Schnittstellen liegen in leistungsfähigen CAD-Systemen verschiedene Möglichkeiten vor. In diesem Fall wird die Verwendung von Skelettmodellen als zielführend angesehen, da bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt die Struktur des Gesamtsystems erkennbar ist (Abb. 4). Für die Unterbaugruppen wird sowohl der »Top-Down-« als auch der »Bottom-Up-Ansatz« zur weiteren Gestaltung genutzt, was durch z. T. enge geometrische Abhängigkeiten zu begründen ist, die sich letztendlich aus der Einbausituation ergeben.

Die VDI-Richtlinie 2221 empfiehlt für strukturiertes Arbeiten, ein Gesamtproblem in weitere Unterprobleme aufzugliedern, so dass eine Ebenenstruktur entsteht. Eine derartige Strukturierung hilft sowohl bei der Kommunikation mit beteiligten Personen und Einrichtungen, als auch bei der Dokumentation und somit der effektiven Umsetzung eines Projektes. Die softwareseitige Abbildung mit Blick auf einen PLM-Workflow ist hier ebenfalls denkbar.

Diese Vorüberlegungen hinsichtlich Schnittstellen/Referenzen und Modulimplementierung führen somit zunächst zu einer Baugruppenstruktur, welche sich gleichzeitig auch im verwendeten Parallelnummernsystem wiederfindet (vgl. Abb. 5). Vielfältige Ausführungen zu diesem Thema finden sich in entsprechender Literatur bzw. bei thematisch involvierten Institutionen (Eversheim & Schuh 2000, DIN 6763, REFA).

Nach der Klärung der Zuständigkeiten und der Aufgabenstellung unter Erweiterung um CAD- und datentechnische Details kann die funktionelle Phase durchlaufen werden.

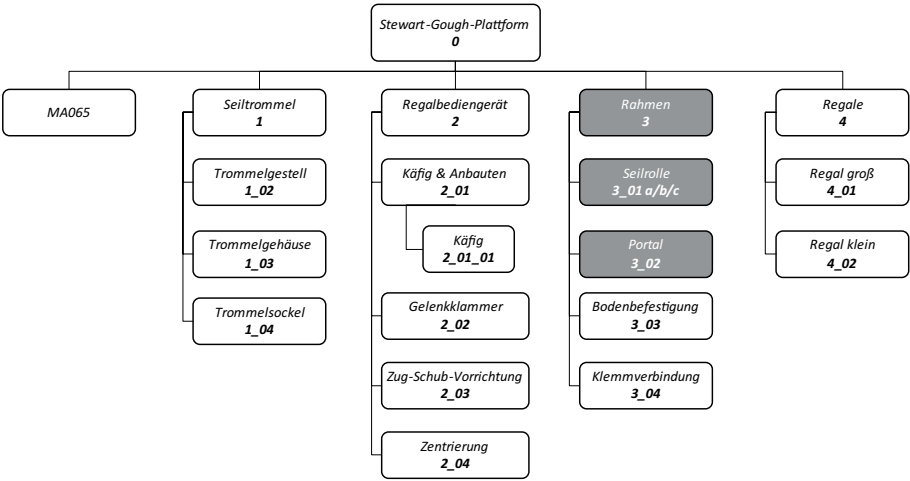


Abbildung 5: Baugruppenstruktur des Gesamtsystems

| Kriterium | Gewichtung | Stahlbau | Aluminiumprofile |
|-----------------------------------|------------|----------|------------------|
| Modularität | 40% | 0,6 | 0,8 |
| Erweiterbarkeit | 20% | 0,4 | 0,9 |
| Auf-, Umbau in Eigenverantwortung | 12,5% | 0,6 | 0,9 |
| Zeitfaktor | 10% | 0,7 | 0,5 |
| Kosten | 7,5% | 0,4 | 0,4 |
| Mechanische Eigenschaften | 5% | 0,9 | 0,6 |
| Masse | 5% | 1 | 0,3 |
| Summe | 100% | 0,59 | 0,75 |

Tabelle 1: Entscheidungsmatrix zur Rahmenkonstruktion

2.2 Die Funktionelle Phase

Vorrangiges Ziel dieser Phase ist es, geeignete Lösungs- bzw. Wirkprinzipien zu finden, die letztendlich im Einklang mit Faktoren wie Belastung, Fertigungsmöglichkeiten und -verfügbarkeiten stehen müssen. Da innerhalb dieses Beitrags nicht die gesamte Konstruktion beschrieben werden kann, werden sich die folgenden Ausführungen exemplarisch auf die übergeordnete Baugruppe »Rahmen« mit den darin enthaltenen Unterbaugruppen »Portal« und »Seilrolle« beschränken (Abb. 5).

Die Schnittstellen, welche zwischen den einzelnen Unterbaugruppen existieren, sind in der obigen Darstellung der Systemgliederung nicht enthalten. Diese diente lediglich der Dokumentation, während die eigentlichen Abhängigkeiten (Eltern-Kind-Beziehungen) ausschließlich CAD-seitig umgesetzt wurden.

Ein elementarer Schritt bei der Findung möglicher Lösungen ist das Abstrahieren der Problemstellung und das Übertragen auf technische Wirkprinzipien. Unterstützung, sowohl methodisch als auch inhaltlich, bieten u. a. oben erwähnte Quellen. Am Beispiel des Portals bedeutet dies, dass zunächst verschiedene Konzepte diskutiert wurden, welche sich zu Beginn primär mit den Aspekten der Modularität und Anpassbarkeit beschäftigten. Die Belastungen spielten bei den ersten Schritten eine untergeordnete Rolle, da in jedem Fall durch entsprechende Dimensionierung und Designvarianten die strukturelle Festigkeit sichergestellt werden kann. Neben den gängigen intuitiven Methoden zur Ideenfindung wie Brainstorming, Synektik, Morphologischer Kasten etc., helfen Verfahren zum technisch-wirtschaftlichen Bewerten von Konzepten bei der objektiven Entscheidungsfindung. Dazu zählt u. a. die Richtlinie VDI 2225 Blatt 3. Da die Art und Weise des Demonstrators bereits durch die Anwendung als Regelbediengerät festgelegt ist, bleibt lediglich die Frage nach der Bauform der dominierenden Rahmenkonstruktion. Zur Wahl stehen eine klassische, geschweißte Stahlbaukonstruktion und eine Lösung aus Aluminiumprofilen, welche anhand eines Baukastensystems konfektioniert werden kann. Tabelle 1 gibt wieder, in welcher Form die Entscheidungsfindung durchgeführt wurde. Die Gewichtungsfaktoren sind das Resultat

von Gesprächen der beteiligten Partner und sind vor allem geprägt durch die angestrebte Ausführung als flexibler Demonstrator und sind nicht auf anderweitige Quellen bezogen.

Durch die Gewichtungsfaktoren erhält die Variante der Aluminiumprofile eine bessere Bewertung. Gleichzeitig erweist sich jedoch eine Stahlbaukonstruktion für gewisse Bereiche ebenfalls als sinnvoll. Aus diesem Grund wird eine Kombination der jeweiligen Vorteile beider Varianten umgesetzt. Im Detail bedeutet dies, dass unveränderliche Komponenten des Rahmens aus Stahl gefertigt werden, da durch die deutlich höhere Masse ein höheres Gegengewicht erreicht wird, während diejenigen Komponenten, welche unmittelbar mit den Prozessparametern zusammenhängen, mit Aluminiumprofilen geplant werden. Somit können Umlenkpunkte und Abstände versuchsbedingt variiert werden, um den Prozess weiter zu optimieren (vgl. Abbildung 4).

In direkter Wechselwirkung mit dem Rahmen stehen die benötigten Seilrollen zur Umlenkung der Trag- und Steuerseile. Die Kräfte sind aus oben erwähnter Simulation bekannt. Als Grundlage für die Seilrollenauslegung dienen auf Grund der fehlenden Richtlinien für

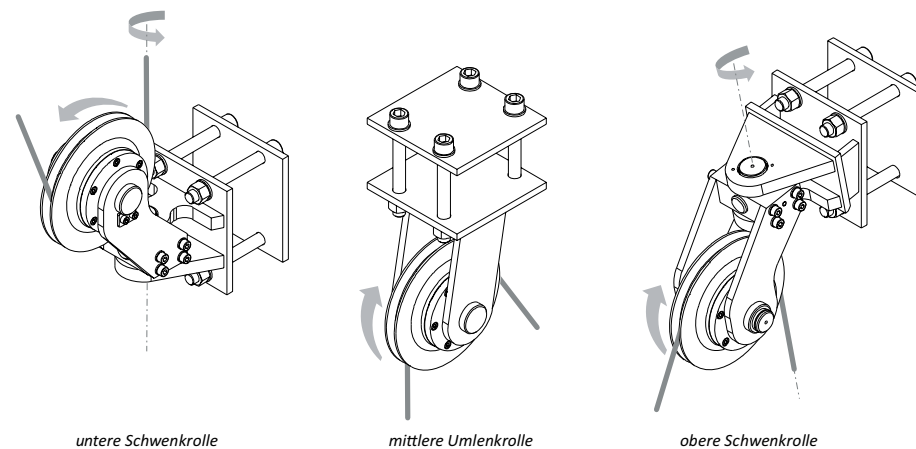


Abbildung 6: Schwenk- und Umlenkrollen

Kunststoffseiltriebe zunächst die DIN 15020 bzw. DIN 15061. Hieraus lassen sich insbesondere die vom Seildurchmesser abhängige Geometrie des Rillenprofils der Seilrollen und der entsprechende Durchmesser ermitteln. Ebenso werden die hier enthaltenen Grenzwerte für Umlenkwinkel etc. übernommen. Insgesamt werden drei verschiedene Varianten von Schwenk- und Umlenkrollen benötigt. Dies ist erforderlich, da für die kinematische Abbildung des Systems zur Schwenkachse coaxial ablaufende Seile gefordert sind (Abb. 6). Die Schwenk- und Umlenkrollen werden so in Unterbaugruppen substituiert, dass die einzelnen Varianten möglichst viele Gleichteile enthalten, um den Konstruktions- und Fertigungsaufwand zu minimieren. Als Resultat ist in jedem Fall dieselbe Unterbaugruppe »Seilrolle« vorgesehen. Diese besteht aus dem Seilrollenkörper und einer Lagerung, welche die Rotation um die Mittelachse des Seilrollenkörpers ermöglicht. Die Baugruppe »Umlenkrolle« benötigt keine weitere Schwenkachse und kommt somit mit einer einfachen Konsolenlösung für die Aufnahme der Baugruppe »Seilrolle« aus. Die beiden anderen Varianten benötigen eine weitere Schwenkachse, welche in die Aufnahme zu integrieren ist. Diese Schwenkachse ist auf Grund der Seilführung bei einer Variante rechtwinklig zu der Befestigungskonsole ausgerichtet, im anderen Fall ist die Schwenkachse um 11° angestellt, was bei der Gestaltung der Aufnahme zu berücksichtigen ist.

2.3 Die gestaltende Phase

Bei der Ausgestaltung der einzelnen Baugruppen stellen hier insbesondere die zumeist sequenziell erweiterten Randbedingungen eine Herausforderung dar. Da der vorgestellte Prototyp in kürzester Zeit realisiert werden muss, sind häufig nicht alle notwendigen Daten zum gewünschten Zeitpunkt verfügbar. Hier kann eine angepasste Verschachtelung der einzelnen Konstruktionsschritte den Entwicklungsprozess beschleunigen. Abbildung 7 stellt die hier gewählte Vorgehensweise dar, welche eine Fertigstellung des Gesamtsystems im geplanten Zeitraum ermöglicht. Die Gestaltung der einzelnen Baugruppen ist hier jeweils durch den Bearbeiter »CAE« gekennzeichnet. Aus der Grobauslegung und den vorhandenen Teilergebnissen kann schon zu einem frühen Zeitpunkt die Gestaltung des »Portals« erfolgen.

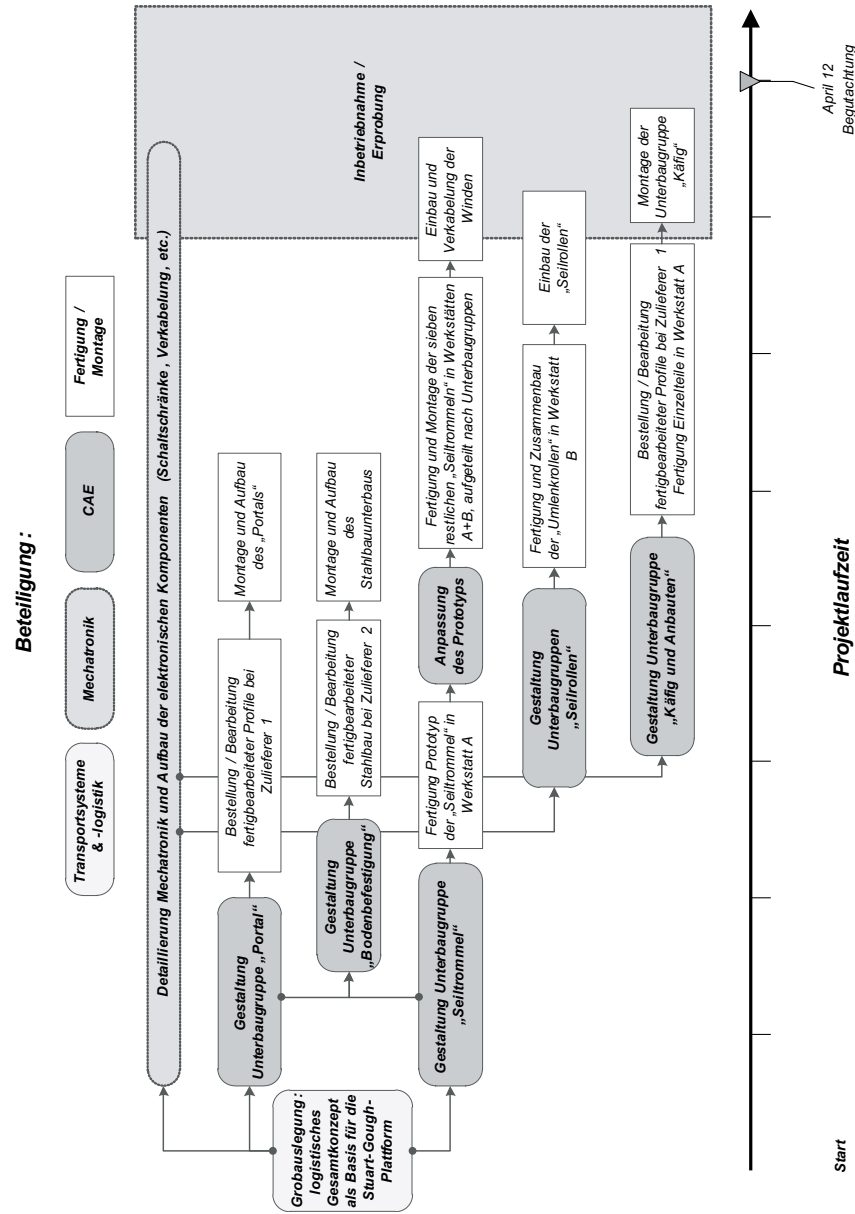


Abbildung 7: Arbeitsfluss über die Projektlaufzeit

Durch die zuvor CAD-seitig festgelegten Schnittstellen muss während der Gestaltung des Portals nur bedingt eine Abstimmung bezüglich der Bearbeitung der Seilrollen durchgeführt werden. Erste Ideen zum Portal werden in Form eines Skelettmodells umgesetzt, welches die zuvor ermittelten Randbedingungen (Abstände, Anschlusspunkte, etc.) enthält. Dieses Gerüst bildet die Grundlage für den Einbau verschiedener Profile mittels der eingebunden Applikation »Expert Framework Extension«. In ihr sind Bibliotheken mit Stahl- und Aluminiumprofilen hinterlegt, welche als Komponenten für das Portal dienen. Mit Hilfe dieses Tools können schnell Profile getauscht werden, um Varianten hinsichtlich Gestalt und Festigkeit zu validieren. Die derart realisierte Umsetzung der topologischen Struktur bietet somit neben einem flexiblen Baugruppenaufbau gleichzeitig einfach umsetzbare Möglichkeiten zur konstruktionsbegleitenden Simulation. Dazu wird das integrierte Modul Creo Mechanica genutzt, so dass schnell und effektiv Vor- und Nachteile einer konstruktiven Lösung beurteilt werden können. Dies wird vor allem durch die Verwendung von Balkenelementen begünstigt, da dieser Elementtyp sehr schnell genaue Resultate liefert. Auf diese Weise werden sowohl Anordnungen und Längen, als auch die Querschnitte der zu verwendenden Balkenelemente miteinander kombiniert und bewertet. Die Querschnittsgeometrien der Balken werden dabei von den verbauten 3D-Profilen abgeleitet und liefern die notwendigen Parameter für die notwendigen Widerstandsmomente. Die Ergebnisse müssen sowohl Festigkeits-, als auch Steifigkeits- und schwingungstechnischen Kriterien genügen, wobei die Dimensionierung der Balken aus Kostengründen mit Bedacht durchzuführen ist (dies gilt jedoch primär für den hier beschriebenen Demonstrator). Letztendlich liegt somit ein definiertes Tragwerk aus Profilen vor, die dank implementierter Metadaten in eine Stückliste eingepflegt und fertig abgelängt bestellt werden können, was einen zügigen Aufbau ermöglicht.

Parallel zur Konstruktion des Portals wird die Entwicklung der Seilrollen voran getrieben. Wie bereits zuvor erwähnt, dienen insbesondere die Simulationsergebnisse der kinematischen Simulation als Basis für die Auslegung der Schwenk- und Umlenkrollen. Diese werden so gestaltet, dass zum einen die geforderten Bewegungen

umgesetzt werden können und zum anderen die auftretenden Kräfte beherrscht werden. Die Berechnung der einzelnen Komponenten erfolgt hier für den Großteil auf konventionelle Weise. Als Grundlage dient insbesondere Literatur, in der die Auslegung und Gestaltung von Hebezeugen beschrieben wird (Ernst 1973, Hoffmann et al. 1983). Obwohl hier zumeist keine Kunststoffseiltriebe, sondern gängigere Bauformen wie Stahlseiltriebe beschrieben werden, sind die hier vorgeschlagenen Berechnungswege und Auslegungsschritte gut auf die vorliegende Problematik übertragbar. Um den Auslegungsprozess zu beschleunigen, wurden alle Varianten, basierend auf den aus der Simulation bekannten Maximalwerten, in Verbindung mit einem Sicherheitsfaktor ausgelegt. Dies hat den Vorteil, dass bereits zu einem frühen Zeitpunkt, zu dem noch keine detaillierten kinematischen Ergebnisse vorliegen, mit der Auslegung begonnen werden kann. Eine weitere Detaillierung und belastungsgerechtere Auslegung der einzelnen Varianten in Bezug auf die individuell auftretenden Lasten soll bei der geplanten Übertragung der Ergebnisse in eine industrielle Anwendung erfolgen.

| | Seilrollen-körper | Konsole | | Ausleger |
|----------------------|--|---|--|--|
| | | Gleichteile | variantenabhängige Teile | |
| Obere Schwenk-rolle | 8 verschiedene Einzelteile, (je insgesamt 22 Stück). Berechnung der Rillenkugellagerung mit <i>medias</i> und <i>MDESIGN</i> . | 4 verschiedene Einzelteile (je insgesamt 18 Stück). Berechnung der Schraubenverbindung mit <i>MDESIGN</i> . | 3 verschiedene Einzelteile, je 4 Stück. Berechnung der Gleitlagerung mit <i>medias</i> und <i>MDESIGN</i> . Auslegung der Bleche mit <i>Mechanica</i> (FEM). | 3 Anschlussbleche zum Erreichen des Anstellwinkels. Auslegung der Bleche mit <i>Mechanica</i> (FEM). |
| Untere Schwenk-rolle | | | | |
| Umlenk-rolle | | | | 2 Anschlussbleche zur Aufnahme des Seilrollenbolzens. Auslegung der Bleche mit <i>Mechanica</i> (FEM). |

Tabelle 2: Konstruktionsübersicht Seilrollen

Die Berechnung der einzelnen Bauteile erfolgt hier nach einschlägiger Vorgehensweise. Zunächst werden die auftretenden Belastungen so beschrieben und transformiert, dass diese der jeweiligen Einbau- und Lagersituation gerecht werden. Darauf basierend wird die Sicherheit der jeweiligen Maschinenelemente konventionell nachgewiesen. Dies erfolgt durch die Unterstützung von Berechnungsprogrammen wie Mathcad und MDESIGN. Ersteres eignet sich beispielsweise gut zur Bestimmung der auftretenden Kräfte und Momente an den Lagerstellen. MDESIGN hingegen bietet mit den verfügbaren Tools die schnelle Berechnung der verwendeten Achsen und Bolzen insbesondere in Verbindung mit der Werkstoffauswahl. Aber auch Details wie die Definition der jeweiligen Passungen lassen sich hiermit berechnen. Ebenso erfolgen hiermit die Berechnung und die Dokumentation der Lagerungen. Dies geschieht basierend auf der von den Lagerherstellern online zur Verfügung gestellten Werkzeugen zur Vorauswahl bzw. Lebensdauerabschätzung der geplanten Lagerkomponenten.

Die Gestaltung der Geometrie erfolgt dann, basierend auf diesen Auslegungsergebnissen, nach der »Bottom-Up«-Vorgehensweise in der parametrischen 3D-CAD-Umgebung CREO Parametric. Der gewählte Ansatz macht insbesondere hier eine einfach umzusetzende mehrfache Verwendung der einzelnen Komponenten und Unterbaugruppen in den drei verschiedenen Varianten möglich. Somit lässt sich die Anzahl der verschiedenen Einzelteile reduzieren. Dies beschleunigt insbesondere den Dokumentations- und Fertigungsprozess. Die folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die benötigten Funktionen, die Teilevarianz und die genutzten Werkzeuge zur Auslegung.

Die Zusammenführung der Unterbaugruppen wird anhand der definierten Schnittstellen vorgenommen. Das verwendete Skelettmodell erlaubt dabei ein unproblematisches Austauschen und Verschieben der jeweiligen Komponenten.

3 Zusammenfassung

Die obigen Ausführungen zeigen exemplarisch das Vorgehen für die Gesamtabwicklung des Projekts: Ausgehend von extern erzeugten Vorgaben wurde unter Anwendung von Methoden zum methodischen Konstruieren erfolgreich ein Prototyp eines neuartigen Regalbediensystems entwickelt und aufgebaut. Die Erprobung wird unter der Leitung der Mitglieder des Lehrstuhls für Mechatronik durchgeführt.

Der Aufwand zur Umsetzung eines solchen Projektes wird durch unterschiedliche Potentiale gerechtfertigt. Durch die geringeren bewegten Massen ergibt sich im Schnitt ein niedrigerer Energieaufwand bei höherer Verfügbarkeit und verringerten Prozesszeiten. Gleichzeitig kann auf Basis vorhandener Erfahrungen damit



Abbildung 8: Praktische Umsetzung des Demonstrators an der Universität Duisburg-Essen

gerechnet werden, dass sowohl die Investitionskosten, als auch die Betriebskosten eines derartigen Systems ebenfalls geringer ausfallen. Die gute Skalierbarkeit macht dieses System darüber hinaus für eine breite Basis von Unternehmen interessant, die auf individuelle und platzsparende Lösungen angewiesen sind. Zusammenfassend können insbesondere die folgenden Vorteile identifiziert werden:

- skalierbar für verschiedene Traglastbereiche,
- Reduzierung der zu bewegenden Massen,
- genauere Positionierung und höhere Lagerausnutzung bei beliebigen Lagerkonfigurationen sind möglich.
- Bei der Montage erfasste Problemstellen wurden bereits wieder in den parallel laufenden Konstruktionsprozess weiterer Unterbaugruppen übernommen.

Durch die Anwendung einer Concurrent Engineering-Strategie in Verbindung mit einer hohen Diversität der Teilezulieferer und Werkstätten, konnten die geplanten Meilensteine eingehalten werden.

Die Testergebnisse werden zeigen, welche Prozessdaten mit dem neu konstruierten Prototyp realisierbar sind und welche weiteren Maßnahmen/Anpassungen getroffen werden müssen, um ein industriereifes Konzeptsystem zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

- Bruckmann, T. 2009: Auslegung und Betrieb redundanter paralleler Seilroboter. Dissertation
- Bruckmann, T. Mikelsons, L., Brandt, T., Hiller, M., Schramm, D. 2008: Wire Robots Part 1, Kinematics, Analysis & Design. In: Lazinica, A (Hrsg.): Parallel Manipulators – New Developments, 109–132, Wien: I-Tech Education and Publishing
- Boutellier R. & Gassmann, O. & Zedtwitz, von M. 2008: Managing global innovation, Uncovering the secrets of future competitiveness. Berlin: Springer
- Roth, K. 2000: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Bände 1 & 2. Berlin: Springer.
- Ernst, H. 1973: Die Hebezeuge, Bemessungsgrundlagen Bauteile Antriebe. Braunschweig: Vieweg.

- Ehrlenspiel, K. 2003: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München: Hanser.
- Eversheim, W., Schuh, G. (Hrsg.) 2000: Betriebshütte – Produktion und Management. Berlin: Springer
- Hoffmann, K, Kenn, E. & Stanker, G. 1983: Fördertechnik 1&2. Wien: R. Oldenbourg.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. Berlin: Springer.

Kontakt

Dipl.-Ing. Alexander Martha
Dipl.-Ing. Uwe Klemme
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler

Universität Duisburg-Essen
Lotharstraße 1
Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion
47057 Duisburg
www.uni-due.de/cae

Vilhelm Hadzhiyski & Zviatko Atanasov

Investigation of stressed state of elastic element of elastic clutch from three ply reinforced polymer material

1 Introduction

The use of composite materials in engineering practice and in particular nonmetallic composite materials in the preparation of elastic couplings (clutches) requires modeling of their mechanical behavior. The production of elastic couplings with a elastic element having reinforced polymer materials require studying the behavior of those materials for loads which are typical for their operation. In many modern structures of elastic clutches are used multi-layer reinforced composites. This kind of materials are composed of separate layers with different orientation of reinforcing fibers.

Several authors have studied the behavior of this type of laminated materials (Yongming L. 2005, Zhang Y.X., 2009). Factors, which determine the stress and deformation state of this type of elastic elements are:

- structure and mechanical characteristics
- matrix and reinforced material
- connection between matrix and reinforced material
- orientation of reinforcement.

The aim of this paper is to investigate stress and strain state of elastic element of coupling, creating a model for determination of the state of three layers nonmetallic material for manufacturing of nonmetallic elastic elements.

2 Statement

The relationship between the middle stresses and middle strains in the layer of the reinforced material (with respect to axis x (fig. 1)) (Choo 1990, Jones 1999, Tong et al. 2002):

$$\{\sigma_{xy}\} = [G]\{\epsilon_{xy}\}, \quad (1)$$

where the components of the stiffness matrix in one layer are:

$$[G] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{16} \\ g_{12} & g_{11} & g_{21} \\ g_{16} & g_{21} & g_{66} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$g_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ij}^{(k)} \bar{h}^{(k)}$ — components of stiffness matrix, which depends from linear modulus of elasticity in the local coordinate system

(E_1, E_2) — modulus in directions 1 and 2 (fig. 2)); shear modulus (G_{12}) in the local coordinate system;

ν_{12} — Poisson's ratio in the local coordinate system;

n — number of layers in the package,

$h^{(k)}$ — relative thickness of k -layer,

H — thickness of k -layer,

$\bar{h}^{(k)} = h^{(k)} / H$ — total thickness of the package.

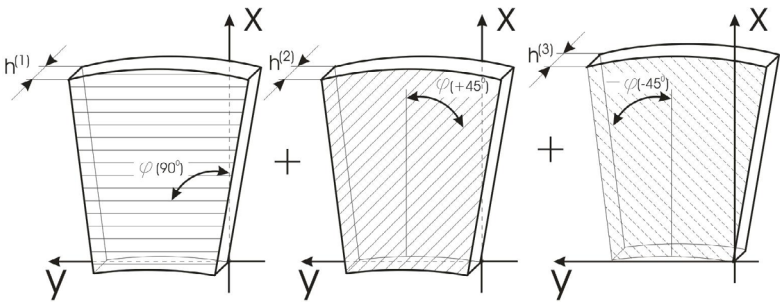


Figure 1: Structure of the elastic element of a coupling from three layers composite material (reinforcement 90°, +45°, -45°)

The relationship between the components of the stiffness matrix in one layer with one directional reinforcement is:

$$g_{11} = g_{11}^{(0)} \cos^4 \varphi + g_{22}^{(0)} \sin^4 \varphi + 2(g_{12}^{(0)} + 2g_{66}^{(0)}) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi, \quad (3)$$

where:

φ — angle of reinforcement in the layer,
 $g_{ij}^{(0)}$ — stiffness matrix coefficients in condition of one directional stress state.

For three layers material:

$$g_{11} = \frac{1}{h} \sum_{k=1}^n \left(V_1 + V_2 \cos \frac{2\pi k}{n} + V_3 \cos \frac{2\pi k}{n} \right), \quad (4)$$

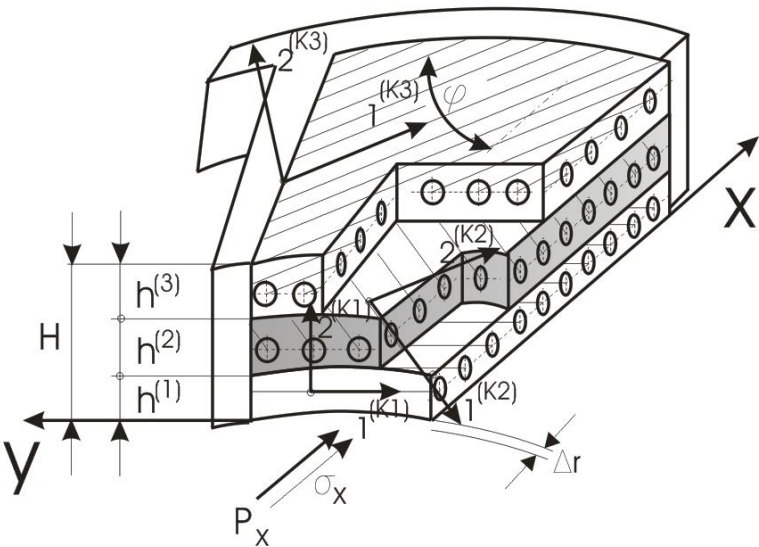


Figure 2: Acting force, stress and displacement of elastic element in case of radial displacement (Δr) between the connecting shaft (reinforcement 90°, +45°, -45°)

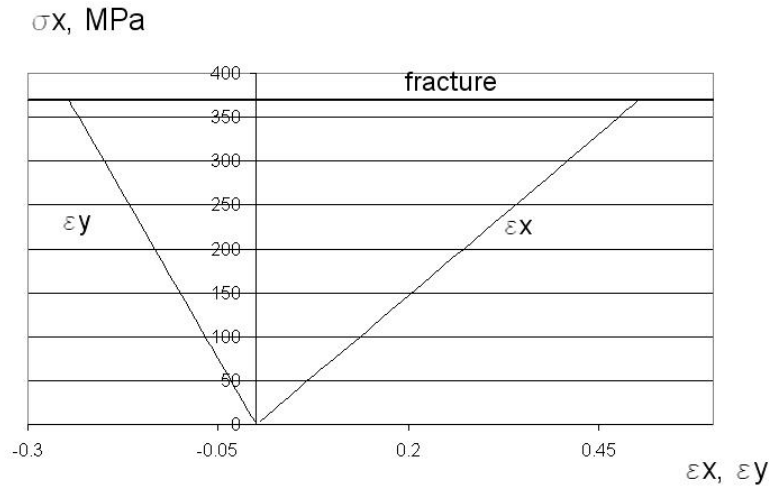


Figure 3: Stress state of reinforced material 0°, +45°, -45° in case of radial displacement (l) between the shafts (direction of x axis)

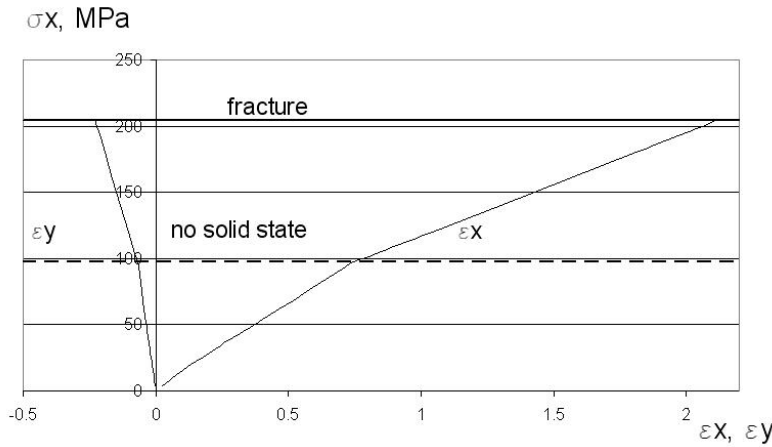


Figure 4: Stress state of reinforced material 90°, +45°, -45° in case of radial displacement between the shafts (direction of x axis)

coefficients V_1, V_2, V_3 are presented by the stiffness matrix coefficients for main axes (1 and 2) of the layer, where:

$$\begin{aligned} V_1 &= (3g_{11}^{(0)} + 2g_{12}^{(0)} + 3g_{22}^{(0)} + 4g_{66}^{(0)})/8 \\ V_2 &= (g_{11}^{(0)} - g_{22}^{(0)})/2 \\ V_3 &= (g_{11}^{(0)} - 2g_{12}^{(0)} + g_{22}^{(0)} - 4g_{66}^{(0)})/8 \end{aligned} \tag{5}$$

where:

$g_{ij}^{(0)}$ ($i, j = 1 \div 6$) — the stiffness matrix coefficients for plane stress statement:

$$\begin{aligned} g_{11}^{(0)} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ g_{12}^{(0)} &= \frac{E_1\nu_{21}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{E_2\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ g_{22}^{(0)} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad g_{66}^{(0)} = G_{12} \end{aligned} \tag{6}$$

In case of one directional stress state of three layers composite material in the x axis direction from formula (1) we have:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= g_{11}\epsilon_x + g_{12}\epsilon_y + g_{16}\gamma_{xy} \\ 0 &= g_{12}\epsilon_x + g_{22}\epsilon_y + g_{26}\gamma_{xy} \\ 0 &= g_{16}\epsilon_x + g_{26}\epsilon_y + g_{66}\gamma_{xy} \end{aligned} \tag{7}$$

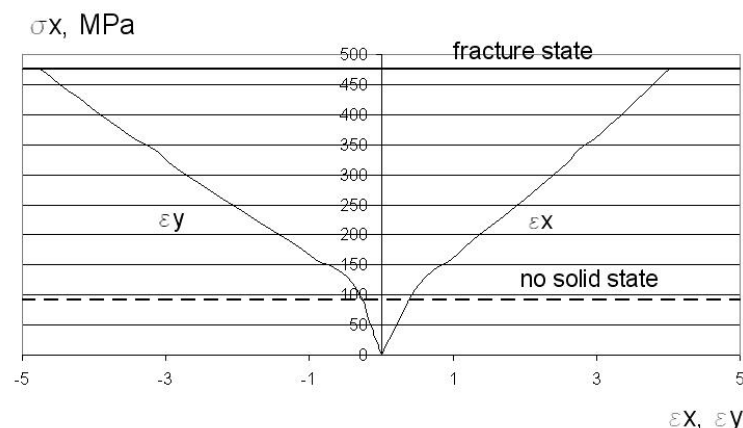


Fig. 5. Stress state of reinforced material 45°, +30°, -30° in case of radial displacement between the shafts (direction of x axis)

3 Results

On fig. 3, 4 and 5 are presented received numerical results in case of radial displacement (Δr) of elastic coupling (deformation in direction of x axis) of three layers nonmetallic materials with angles of orientation of the reinforcement 0°, +45°, -45°; 90°, +45°, -45°; 45°, +30°, -30°, respectively.

The thickness of the first layer ($h^{(1)}$) is 1 mm, and of second and third layer ($h^{(2)}$; $h^{(3)}$) is 0,75 mm.

For investigation the stress and strain state of elastic element is realized an algorithm for step change of the loading.

The step of the loading is $\Delta\sigma_x = 0,05$ MPa.

The step loading of the n -step of the load is:

$$\Delta\{\sigma_{xy}\}_n = \{\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\tau_{xy}\}_n \quad (8)$$

which caused the next change of the strain:

$$\{\varepsilon_{xy}\}_n = [G]_{n-1}^{-1} \{\sigma_{xy}\}_n \quad (9)$$

where:

$[G]_{n-1}$ — stiffness matrix which is determined from the previous step of the loading.

4 Analysis of the results

Upon reaching a stress $\sigma_x = 369$ MPa occurs a fracture of the elastic element from threelayers nonmetallic composite material 0°, +45°, -45° (fig. 3).

For reinforcement 90°, +30°, -30°, the elastic element first loses its solid state when the stress reach $\sigma_x = 97,2$ MPa (fig. 4), the further increasing of the stress, directed along the x axis, occurs fracture ($\sigma_x = 204$ MPa).

For a stress $\sigma_x = 91$ MPa, elastic element with reinforcement 45°, +30°, -30°, loses its solid state (fig. 5). The elastic element with these reinforcement is damaged at $\sigma_x = 476$ MPa.

5 Conclusion

1. It is proposed a model for determination of the stress and strain state of three layers nonmetallic reinforced material for manufacturing elastic elements of the couplings. The model presents behavior of elastic element in the condition of loading, typical for exploitation of the elastic couplings.
2. The stress and strain state of elastic element of a coupling for the next reinforcement angles of threelayers materials: 0°, +45°, -45°; 90°, +30°, -30°; 45°, +30°, -30°, are investigated.

3. The loss of ability to work of the elastic element, is determined from the compressive fracture in direction perpendicular of the direction of the fibers ($\sigma_2 = \sigma_{\lim \text{ it-}2}$), σ_2 – acting stress in separated layer, $\sigma_{\lim \text{ it-}2}$ – limit compressive strength in direction 2.
4. Defining a loss of the solid state is the high shear stresses ($\tau_{12} = \tau_{\lim \text{ it-}12}$), which cause the occurrence of cracks in polymeric material (the connecting material), τ_{12} – acting shear stress, $\tau_{\lim \text{ it-}12}$ – limit shear strength in direction 1, 2.
5. In case of radial displacement (Δr) of the elastic element of the coupling, most favorable for the strength is reinforcement 45° , $+30^\circ$, -30° (fracture at $\sigma_x = 476$ MPa), as the material passes through the phase of loss of integrity (cracking).
6. For highmodulus elastic elements of the couplings most favorable is reinforcement 0° , $+45^\circ$, -45° . In these case when the fracture is occurred ($\sigma_x = 369$ MPa), the strain in the material $\varepsilon_x = 0,513$ is (for reinforcement 90° , $+45^\circ$, -45° these value is $\varepsilon_x = 2,11$ and for reinforcement 45° , $+30^\circ$, -30° the strain is $\varepsilon_x = 4,01$).

References

- Choo V.K.S., 1990, Fundamentals of composite materials. Known Academic Press, Inc., Cover, Delawae, U.S.A.
- Jones R.M. , 1999, Mechanics of composite materials. 2nd Edition. Taylor & Francis. Philadelphia, USA.
- Tong L., Mouritz A.P. Banuister M.K., 2002, 3D-Fiber Reinforced Polymer Composites. Elsevier Science, Oxford, UK.
- Yongming Liu, Sankaran Mahadevan 2005. Probabilistic fatigue life prediction of multidirectional composite laminates. Composite structures, 69, 11–19.
- Zhang Y.X., Yang C.H. 2009 Recent developments in finite element analysis for laminated composite plates. Composite structures, 88, 147–157.

Kontakt

Assoc. Professor Dr. Dipl.-Ing. Vilhelm Hadzhiyski
University of Food Technologies
»Maritza« 26
4002 Plovdiv, Bulgaria
hawi@abv.bg

Assoc. Professor Dr. Dipl.-Ing. Zviatko Atanasov
Technical University
»Styudentska« 1
9010 Varna, Bulgaria

Ralph Stelzer, Erik Steindecker & Bernhard Saske

Kombinierter Einsatz von Augmented Reality in virtuellen Umgebungen

Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) sind innovative Technologien, die in der modernen Entwicklung, Herstellung und Nutzung von Produkten zum Einsatz kommen. Bisher werden beide Technologien nicht gemeinsam genutzt, obwohl eine Kombination in bestimmten Fällen erhebliches Potenzial zur Kosteneinsparung besitzt. Die VR-Technologie wird vorrangig in der Produktentwicklung eingesetzt um Kosten für physische Prototypen einzusparen. Bei der Montage oder der Wartung komplexer Produkte hingegen kommt die AR-Technologie zum Einsatz. Dabei wird der Servicetechniker durch Arbeitsunterlagen, die über ein Display in sein Sichtfeld projiziert werden, bei seiner Tätigkeit unterstützt.

Um die Qualität der Arbeitsunterlagen für AR-Systeme schon während der Produktentwicklung zu sichern und einen Schulungsvorlauf beim Servicepersonal zu erreichen, ist die Evaluierung dieser Arbeitsunterlagen bereits am virtuellen Prototyp eines künftigen Produktes sinnvoll. Mit der Kombination von AR und VR Technologie in einem integrierten System sollen für diesen Ansatz die Voraussetzung geschaffen werden. Der Beitrag beschreibt die notwendigen Grundlagen und stellt die Entwicklung eines Systems vor, welches die Wahrnehmung von AR-Informationen am virtuellen Prototyp ermöglicht. Anhand eines gewählten Wartungsszenarios wird das notwendige Vorgehen zum Erstellen von virtuellen Prototyp und AR-Arbeitsunterlagen erläutert und Gestaltungsparameter beschrieben. Basierend auf diesem Szenario wird das entwickelte System in einer Benutzerstudie getestet und Vorschläge für die weitere Entwicklung abgeleitet.

Einleitung

In der modernen Produktentwicklung werden virtuelle Prototypen eingesetzt um Kosten für physische Prototypen einzusparen. In einer großformatig, immersiven Umgebung können vor allem Aspekte der Interaktion zwischen künftigen Produkt und Nutzern untersucht werden. Beispielsweise werden an virtuellen Prototypen Tests der Zugänglichkeit von Bauteilen oder Sichtfelduntersuchungen durchgeführt (Wöhler et. al. 2010). Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ergeben sich hervorragende Möglichkeiten zur Planung von Montage- und Wartungsabläufen (Bertsch et. al. 2007).

Die AR Technologie wird unter anderem bei Montage oder Wartung komplexer Produkte eingesetzt (vgl. Regenbrecht 2007, Krevelen et. al. 2010). Der Servicetechniker bekommt Anweisungen über eine Datenbrille in sein Sichtfeld projiziert und wird bei seiner Tätigkeit unterstützt. Eine aufwändige Suche der benötigten Informationen entfällt und der Aufmerksamkeitsfokus bleibt auf dem Arbeitsobjekt (Lukasser et. al. 2004, Wohlgemuth 2007). Um die Qualität der AR-Arbeitsunterlagen schon frühzeitig zu sichern und einen Schulungsvorlauf beim Servicepersonal (vgl. Jundt et. al. 2011) zu erreichen ist es notwendig, die Evaluierung von AR-Arbeitsunterlagen bereits am virtuellen Prototyp eines künftigen Produktes in einer immersiven Umgebung zu realisieren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts »Augmented Reality in virtuellen Umgebungen« STE 1451/6-1, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), wurden verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von VR und AR Technologien untersucht. Der Beitrag stellt das Konzept und den entwickelten Prototyp vor. Durchgeführte Untersuchungen zur gemeinsamen Wahrnehmung von AR und VR werden erläutert und deren Ergebnisse zusammengefasst.

Konzept

Für die Evaluierung von Wartungsabläufen mit AR in einer immersiven Umgebung wird ein angepasstes System entwickelt, das die AR und VR kombiniert und ein interaktives Wartungsmodell zusammen mit den AR-Arbeitsunterlagen abbildet. Diese Kombination wird im

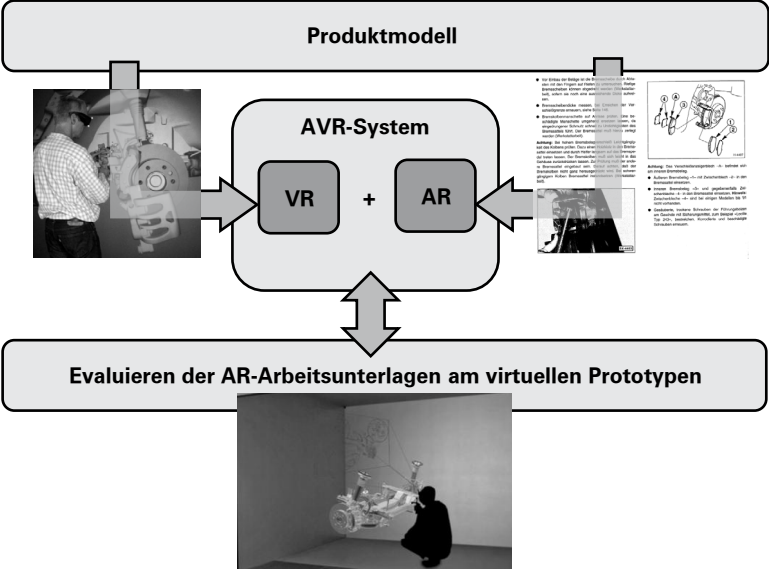


Abbildung 1: Grundlegendes Konzept des AVR-Systems

Folgenden als Augmented Virtual Reality (AVR)-System bezeichnet. Die prinzipielle Arbeitsweise ist in Abbildung 1 dargestellt.

Grundlage für den virtuellen Prototyp und die AR-Arbeitsunterlagen ist das Produktmodell das aktuell im Produktdatenmanagement (PDM)-System gespeichert ist (Stelzer 2009). Entsprechend der geplanten Instandhaltungsaufgabe werden die Modelldaten aufbereitet und ein virtueller Prototyp erzeugt. Die zu untersuchenden Arbeitsunterlagen werden ebenfalls vom Produktmodell abgeleitet und dem AR-System bereitgestellt. Für die Evaluierung der Arbeitsunterlagen werden die Daten in das angepasste AR-System und der virtuelle Prototyp in die immersive Umgebung geladen. Innerhalb des Systems interagiert der Nutzer mit dem AVR-System. Die sich ergebenden Beziehungen zwischen den einzelnen Systemen stellt Abbildung 2 dar.

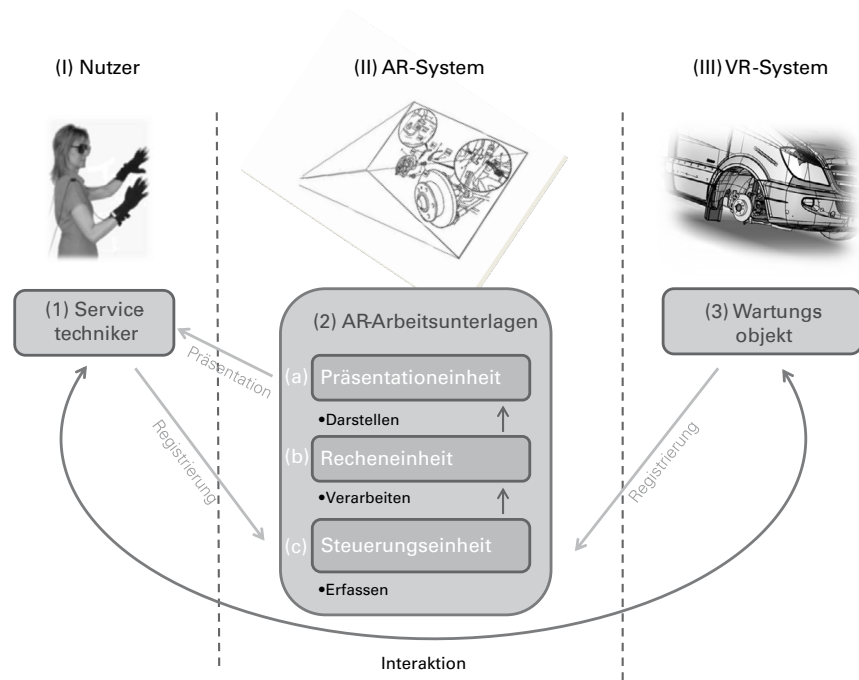


Abbildung 2: Kombinieren von AR- und VR-System

Im VR-System (III) wird das Wartungsobjekt (3) als virtueller Prototyp abgebildet. Der Servicetechniker (1) kann direkt mit diesem interagieren um beispielsweise Ausbauuntersuchung durchzuführen. Im AR-System (II) erfolgt die Abbildung der AR-Arbeitsunterlagen (2). Wie Azuma (1997) beschreibt, lässt sich ein AR-System nach drei wesentlichen Funktionen in Steuerungseinheit (2-a), Recheneinheit (2-b) und Präsentationseinheit (2-c) unterteilen. Mit der Steuerungseinheit werden Eingaben des Nutzers (I) erfasst. Beispielsweise quittiert er durchgeführte Arbeitsschritte über eine Dialogsteuerung. Daneben dient die Steuerungseinheit zur Registrierung des Nutzers bzw. des Wartungsobjektes relativ zum AR-System. Die Recheneinheit bereitet die darzustellenden AR-Arbeitsunterlagen abhängig von den Nutzereingaben und der Registrierung auf. Über die Präsentationseinheit (z.B. AR-Display) werden die Unterlagen in das Sichtfeld eingeblendet und überlagern das Wartungsobjekt teilweise. Eine Evaluierung der AR-Arbeitsunterlagen am virtuellen Wartungsobjekt wird möglich.

Umsetzung

Die technische Umsetzung integriert ein AR-Display in eine immersive Umgebung. Hierbei erfolgt die Informationsverarbeitung und Visualisierung der Arbeitsunterlagen im physischen AR-System mit der nativen Auflösung des Displays. Um die Trennung der stereoskopischen Projektion (z.B. CAVE, Powerwall) zu realisieren wird das AR-System mit entsprechenden Filterkomponenten erweitert (Stelzer 2011). Alternativ ist das Virtualisieren des AR-Displays in der immersiven Umgebung möglich um beliebige AR-Displaytypen ohne Hardwareanpassung für Tests zu integrieren. Theoretische Betrachtungen wurden dazu bereits angestellt, eine Umsetzung virtueller Displays war nicht Bestandteil des bearbeiteten Projekts und soll in einem bei der DFG beantragten Folgeprojekt realisiert werden.

AVR-System

Das konkrete AVR-System nutzt die CAVE als immersive Umgebung. Durch die nutzerabhängige, lagerichtige Darstellung des virtuellen Prototyps bietet diese dem Nutzer einen sehr hohen Immersionsgrad. Ebenso ist der Nutzer in der Lage über getrackte Eingabegeräte (z.B. Flight Stick, Datenhandschuh) mit dem virtuellen Prototyp zu interagieren (Steger 2011). Abbildung 3 zeigt die Präsentationseinheit des AVR-Systems mit für die CAVE passenden Infitec-Filtern zur Bildtrennung.

Während der Evaluation trägt der Nutzer einen Basecap mit montierter Präsentationseinheit. Das modifizierte Gestell der Infitec-Filterbrille (1) ist vor dem eigentlichen AR-Display (2) montiert. Für die durchgeführten Tests wurde das NOMAD 2000 eingesetzt, ein monokulares, monochromes AR-Display mit einer Auflösung von 800 x 600 Pixeln. Um die Position des Nutzers in der CAVE zu erfassen, ist die Präsentationseinheit zusätzlich mit Trackingzielen (3) ausgerüstet. Die gesamte Präsentationseinheit bestehend aus AR-Display, Filterkomponenten und Trackingzielen wird im Folgenden als AVR-Presenter bezeichnet. Für die Bereitstellung der Informationen, zur Ansteuerung des Displays sowie zur Bestätigung erledigter Arbeitsaufgaben dient ein mobiles Endgerät.

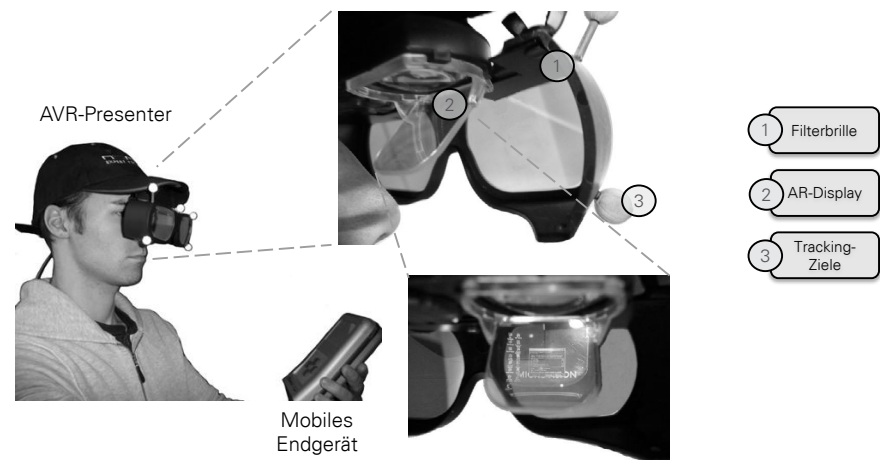


Abbildung 3: AVR-Präsenters für den CAVE-Einsatz

Wartungsobjekt

Das entwickelte System wird am Beispiel des Kleintransporters Sprinters II (Daimler) getestet. Konkret diente die Wartung der Vorderbremse aus dem Serviceplan des Kleintransportes als Testszenario. Dafür muss der Servicetechniker verschiedene Komponenten der Bremseinheit in einer bestimmten Reihenfolge demontieren. Die einzelnen Arbeitsschritte werden über das AVR-System eingeblendet und sind am virtuellen Prototyp auszuführen. Das Verhalten von flexiblen Teilen (z.B. Bremsleitungen, Dichtungen) und Flüssigkeiten (z.B. Bremsflüssigkeit) werden zunächst nicht betrachtet. Zur Erstellung des virtuellen Prototyp und der AR-Arbeitsunterlagen wurden Produktdaten einschließlich des CAD-Modells des Sprinters II herangezogen. Zusätzlich wurde von der Daimler AG ein baugleiches Fahrzeug für vergleichende Tests bereitgestellt (Abbildung 4).

Damit das CAD-Modell als Basis für den virtuellen Prototyp verwendet werden kann, werden die Modelldaten mit der Software Deep Exploration von Right Hemisphere aufbereitet. Diese unterstützt eine Vielzahl an Formaten und beinhaltet Werkzeuge zur Modellaufbereitung. Beim Laden des CAD-Modells in die Softwa-



Abbildung 4: Testfahrzeug – Sprinter II

re wird eine Tessellierung vorgenommen, wobei die Produktstruktur erhalten bleibt, die Konstruktionshistorie hingegen geht verloren. Um die notwendige Echtzeitfähigkeit sicherzustellen, werden Komponenten vereinfacht, zusammenfasst und nicht relevante entfernt. Nach der Bearbeitung wird das Modells in ein geeignetes Format (z.B. JT, VRML) konvertiert und in die VR-Software Visual Decision Plattform (VDP) von IC:IDO geladen. Diese VR-Software verfügt über ein spezielles Modul zur Echtzeitkollisionsprüfung zwischen ausgewählten Komponenten einer Szene. Für den Aufbau der Wartungssituation werden Komponenten definiert als:

- Bewegliche Teile, die direkt manipuliert werden,
- Kollisionsteile, die mit den bewegten Teilen interagieren und
- Teile, die den Arbeitsraum begrenzen.

Mittels eines Eingabegerätes (z.B. 3D-Maus, Flight Stick) kann der Nutzer die beweglichen Teile selektieren und ausbauen. Die Kollisionsprüfung verhindert dabei die Durchdringung von bewegten und Kollisionsteilen. Als Kollisionsantwort werden entstehende Kräfte und Momente durch Pfeilen visualisiert.

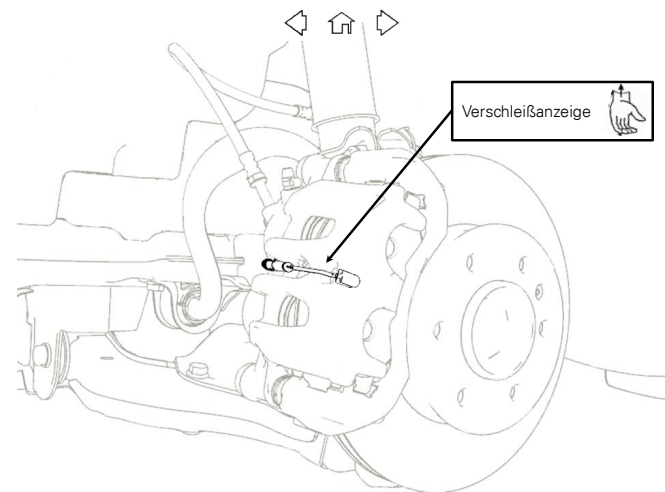


Abbildung 5: AR-Arbeitsanweisung mit hervorgehobenem Bildelement

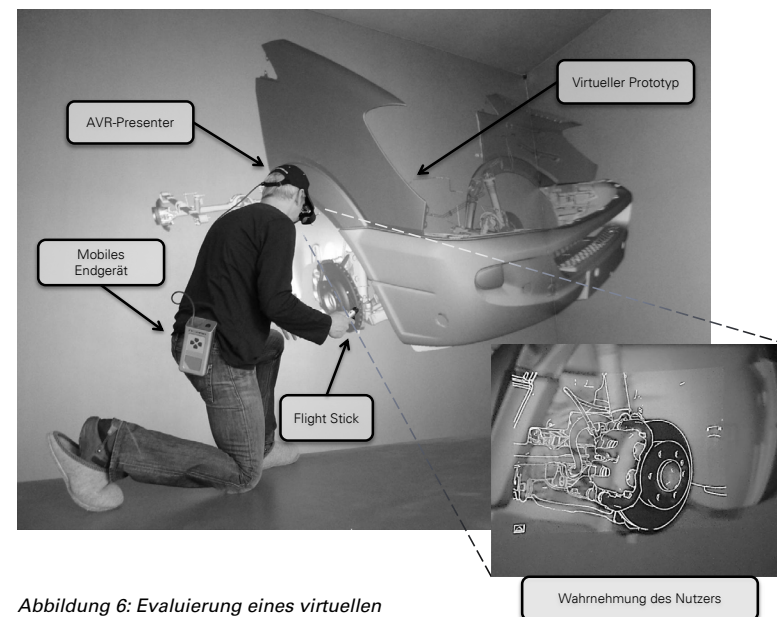


Abbildung 6: Evaluierung eines virtuellen Prototyps mit AVR-System

Arbeitsunterlagen

Wesentlicher Bestandteil der in Abbildung 5 dargestellten Arbeitsunterlage ist die Objektgrafik mit einer für die Wartungstätigkeit günstigen Modelllage und -ausschnitt.

Basis für die Objektgrafik ist das CAD-Modell. Die Darstellung erfolgt in der Regel als kantenbasierte Grafik, wobei verschiedene Parameter, wie die Linienstärke, Linienarten, Farbabstufung und Detaillierungslevel angepasst werden. Um beispielsweise einzelne Bildelemente hervorzuheben, wird die Farbintensität benachbarter Elemente gesenkt. Zur Erstellung der vollständigen Tätigkeitsbeschreibung wird die Objektgrafik mit zusätzlichen Informationen wie Texten oder Symbolen (vgl. DIN 11042) ergänzt. Beispiel dafür sind das umrandete Textfeld mit Bauteilbenennung, sowie das Symbol für die Demontage in Abbildung 5.

Der Nutzer kann nun, wie in Abbildung 6 dargestellt, das Teilmodell des Kleintransporters in der CAVE erleben und bekommt AR-Informationen über den AVR-Presenter eingeblendet. Der kleinere Bildausschnitt in der rechten unteren Ecke zeigt die überlagerte Wahrnehmung des Nutzers aus virtuellen Prototypen und AR-Arbeitsunterlagen.

Die statischen AR-Informationen können durch Kopfbewegungen mit dem Modell überlagert werden. Eine Situation die auch in der Wartungspraxis so anzutreffen ist, da ein performantes Tracking-System, das den Ansprüchen der unterschiedlichen Wartungsumgebungen gerecht wird, zurzeit nicht existiert (Zhou et. al. 2008).

Benutzerstudie

Um den Nutzen des erarbeiteten Konzepts zu untersuchen, wird eine Benutzerstudie durchgeführt. Ziel der Studie ist es die gemeinsame Wahrnehmung von virtuellen Prototypen und AR-Arbeitsanweisungen nachzuweisen und zu überprüfen, ob die eingeblendeten Anweisungen umgesetzt werden können. Die Studie unterteilt sich dabei in Vor- und Hauptuntersuchung.

Voruntersuchung

In dem etwa 30 Minuten dauernden Experiment wird nur die Wahrnehmungsgüte der dargestellten Informationen untersucht, weshalb eine Manipulation des virtuellen Prototyps nicht notwendig ist. Die Voruntersuchung wird mit 11 Probanden durchgeführt und in die Arbeitspakete, deren subjektiver Eindruck durch Befragung festgehalten wird. Die Untersuchung gliedert sich in die Arbeitspakete:

- Exp1-1: Erleben des virtuellen Prototyps mit Standard-Filterbrille und AVR-Presenter
- Exp1-2: Erleben der AR-Arbeitsunterlagen mit AVR-Presenter

Alle Probanden haben bereits Erfahrungen mit der CAVE, einige von ihnen auch mit einem AR-System. Im ersten Abschnitt (Exp1-1) erlebt der Proband den virtuellen Prototyp in der CAVE und beurteilt diesen. Eine gängige Tätigkeit in der CAVE, wobei der Umgang und die Akzeptanz des Probanden mit der CAVE evaluiert werden. Es lässt sich abschätzen, wie die Qualität (Wahrnehmung des virtuellen Prototyps und seiner Details), die Tiefenwahrnehmung (Räumlicher Eindruck des virtuellen Prototyps) und das Größenverhältnis (Realistischer Größeneindruck) mit einer herkömmlichen Filterbrille und dem AVR-Presenter bewertet werden. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisverteilung mit Filterbrille (hell grau) und AVR-Presenter (dunkel grau). Bei dem AVR-Presenter wird zusätzlich zwischen der Wahrnehmung ohne und mit eingeblendeten AR-Arbeitsunterlagen unterschieden.

Die verwendete Bewertungsskala wird Schulnoten entsprechend von 1 (sehr gut) bis 6 (ungenügend) festgelegt. Wie zu erwarten schätzt der überwiegenden Teil der Probanden die Wahrnehmungsgüte des virtuellen Prototypen, basierend auf ihren Erfahrungen mit VR, als sehr gut ein.

Bei der Verwendung des AVR-Presenters verschlechtert sich die Wahrnehmungsgüte um bis zu 2 Schulnoten. Die Probanden bemängelten vor allem störende Reflektionen auf den Brillengläsern und eine fehlerhafte Stereowahrnehmung durch eine unzureichende Bildtrennung. Diese Probleme treten durch den erhöhten

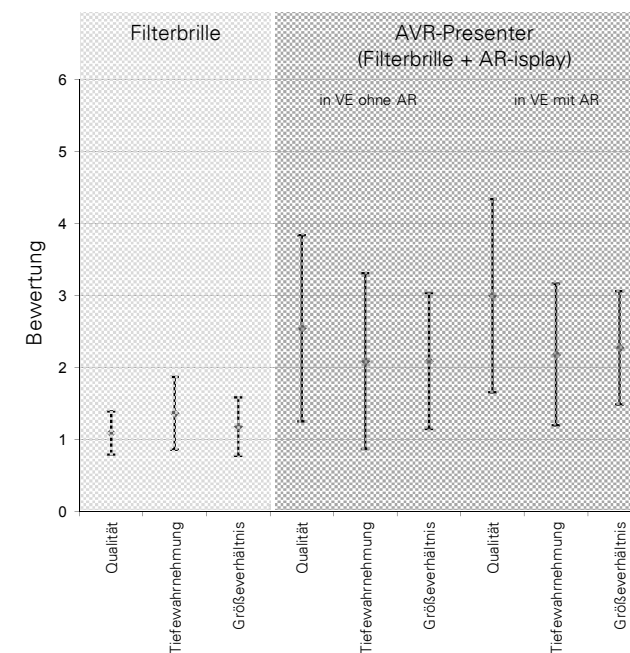


Abbildung 7: Ergebnisse für die Wahrnehmung von VR

Brillenabstand zum Auge auf, der sich durch das angebrachte AR-Display ergibt. Diese Einschätzung ändert sich nicht wesentlich beim Einblenden von Anweisungen mittels AVR-Presenter. Um die Wahrnehmung des virtuellen Prototyps zu optimieren sind Verbesserungen am AVR-Presenter erforderlich.

Der zweite Versuchsabschnitt (Exp1-2) konzentriert sich auf die Wahrnehmung der AR-Arbeitsanweisungen über den AVR-Presenter. Dafür werden zwei Anweisungen eingeblendet, die vom Probanden zu bewerten sind. Bewertungskriterien sind dabei die Helligkeit des Bildes, Schärfe der Darstellung, Lesbarkeit von Text, Erkennen von Symbolen sowie das Erkennen der Objektgrafik. Um den Einfluss des virtuellen Prototyps auf die Wahrnehmung der AR-Arbeitsunterlagen abschätzen zu können, wird diese Untersuchung zuerst vor einer weißen Wand und dann in der CAVE durchgeführt. Die Ergebnisverteilung für beide Anordnungen ist in Abbildung 8 dargestellt.

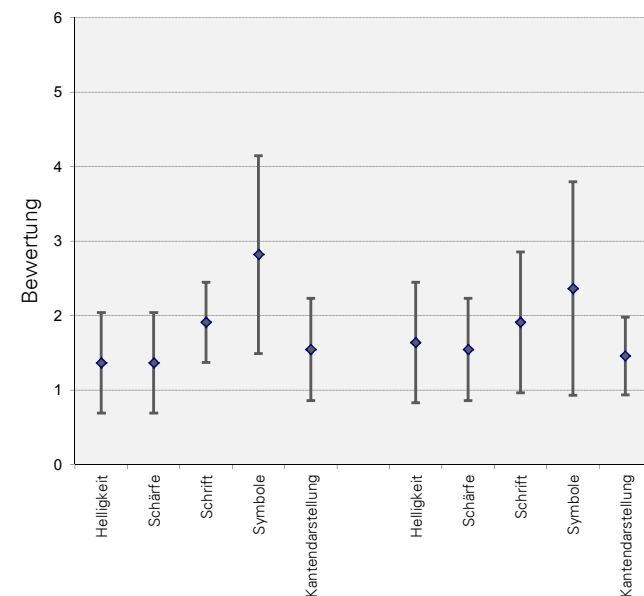


Abbildung 8: Ergebnisse für die Wahrnehmung von AR

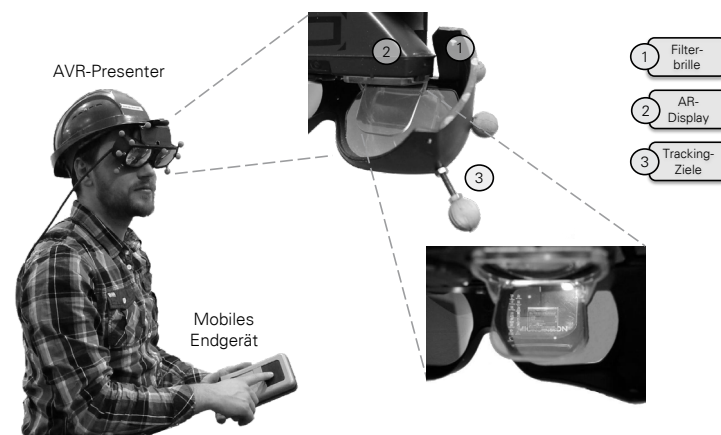


Abbildung 9: Optimierter AVR-Presenter

Wie in der Abbildung 8 dargestellt können die Probanden die AR-Arbeitsanweisungen grundsätzlich erfassen und interpretieren. Allerdings ist die Darstellung nicht optimal. So wurden vor allem Probleme bei der Lesbarkeit von Text, dem Erkennen von Symbolen und dem Layout der Unterlagen festgestellt. Legt man die Ergebnisse der Voruntersuchung zugrunde, hat die Umgebung keinen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung der AR-Arbeitsunterlagen. Deshalb wird in der Hauptuntersuchung die Wahrnehmungsgüte nur in der immersiven Umgebung betrachtet.

Anpassung des Entwurfs

Auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse der Voruntersuchung, werden der Versuchsaufbau, die AR-Arbeitsunterlagen sowie der virtuelle Prototyp hinsichtlich einer gemeinsamen Nutzung in der immersiven Umgebung optimiert. Am AVR-Presenter wird die Brille leicht schräg vor dem Auge angebracht () um den Abstand zum Auge zu verringern.

Mittels einer Klemmverbindung wird die Brille mit AR-Display an einem Helm befestigt. Dieser Schutzhelm bietet wesentlich besser Einstellmöglichkeiten als das vorher verwendete Basecap und trägt gleichzeitig den Sicherheitsbestimmungen in Gefahrenbereichen Rechnung in denen Servicetechniker unter anderem arbeiten. Durch die Klemmverbindung kann die Brille bei Bedarf vom Helm entfernt werden. An dem AR-Display wurden keine Modifikationen vorgenommen. Es kommt weiterhin das NOMAD 2000 zum Einsatz. Der Arbeitsablauf zum Erstellen von AR-Arbeitsunterlagen sowie deren Layout wurde überarbeitet (Abbildung 10).

Mit der Verwendung eines größeren Zeichenabstandes wird die Lesbarkeit von Text verbessert, weil eine deutlichere Trennung der einzelnen Buchstaben erreicht wird. Statt der Pixeldarstellung werden parametrische Vektorgrafiken verwendet, die von der jeweiligen Auflösung des AR-Displays unabhängig sind. Einzelne Segmente lassen sich sehr einfach extrahieren und nachbearbeiten. Des Weiteren wurde die Struktur der AR-Arbeitsunterlagen, speziell die Anordnung von Text und Symbolen überarbeitet. Die Symbole sind nun direkt am betreffenden Bauteil angeordnet und enthalten

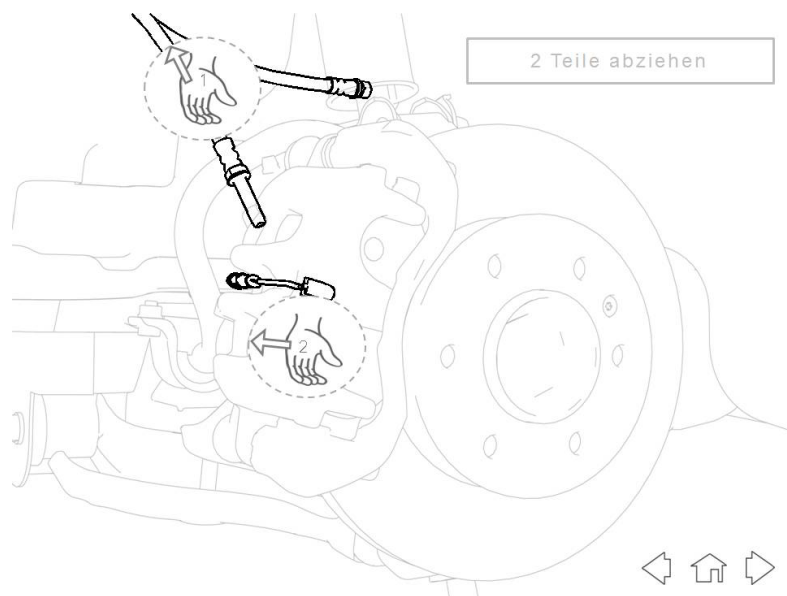


Abbildung 10: Optimierte Anweisung der AR-Arbeitsunterlagen



Abbildung 11: Kleintransporter auf Hebebühne

zusätzliche Richtungsinformationen. Dies erhöht die Verständlichkeit der Arbeitsanweisungen und reduziert die notwendigen Anweisungen in Textform. Alle beschreibenden Texte werden jetzt oben rechts im AR-Display angezeigt. Im Ergebnis sind die AR-Arbeitsunterlagen übersichtlicher und Anweisungen lassen sich schnell vom Servicetechniker interpretieren und durchführen.

Im realisierten Versuch wurden lediglich die Bremseinheit und umliegende Teile (z.B. Radkasten, Kotflügel, Stoßstange und Querlenker) abgebildet (vgl. Abbildung 6), da diese für die Wartungsuntersuchung unmittelbar von Bedeutung sind. Damit der Nutzer sich besser in die virtuelle Umgebung integriert fühlt und eine bessere Orientierung in der Wartungssituation möglich ist, wird das Exterieur des Sprinters vollständig abgebildet und eine der Wartungssituation entsprechende Kulisse hinzugefügt. Die fertige Szene mit virtuellen Prototypen zeigt Abbildung 11.

In der Szene befindet sich das Fahrzeug auf einer Hebebühne, eine übliche Situation bei einer Bremswartung um die Zugänglichkeit zu erleichtern und eine angenehme Arbeitsposition zu ermöglichen. Mittels Flight Stick lassen sich einzelne Komponenten (z.B. Staubkappen, Verschleißanzeige, Bremsschlauch), wie auch schon an dem vorhergehenden Prototyp demontieren. Zusätzlich wurde das Vorderrad in das Demontagemodell aufgenommen.

Hauptuntersuchung

In der Hauptuntersuchung ist die Teilnehmerzahl mit 46 wesentlich höher als bei der Voruntersuchung und setzt sich aus 23 Maschinenbaustudenten des ersten Semesters (Gruppe 1) und 23 Mitarbeitern der TU Dresden (Gruppe 2) zusammen. Die Teilnehmer von Gruppe 1 sind zwischen 18 und 29 Jahre alt und bringen nur wenig Fachkenntnis mit, haben allerdings schon Erfahrungen mit VR Technologien (z.B. 3D-Kino, Videospielen) gesammelt. Bei Gruppe 2 handelt es sich um ausgebildete Ingenieure deren Alter zwischen 24 und 64 Jahren liegt. Alle Teilnehmer dieser Gruppe sind bereits mit der CAVE vertraut und kennen AR Technologien. Allerdings sind keine Instandhaltungsingenieure unter den Teilnehmern, sie verfügen lediglich über Basiswissen in diesem Bereich. Da es bei

der Versuchsauswertung keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen gab, wird in diesem Beitrag keine Unterscheidung zwischen den Gruppen vorgenommen.

Mit der erhöhter Teilnehmerzahl baut die Untersuchung und Bewertung des AVR-Presenters auf eine breitere Datenbasis auf, womit die Ergebnisse der Voruntersuchung abgesichert werden. Auswirkungen der vorgenommen Änderungen fließen dabei in die Betrachtung mit ein. Um die Ergebnisse der Vor- und Hauptuntersuchung vergleichen zu können, werden in beiden Untersuchungen im Wesentlichen gleiche Fragenkataloge verwendet. Im Vergleich zur Voruntersuchung entfällt, wie beschrieben, die Bewertung der Wahrnehmungsgüte mit Filterbrille in immersiven Umgebung und außerhalb der immersiven Umgebung mit AVR-Presenter. Erweitert wird der Fragenkatalog hingegen um zusätzliche Aussagen über die Umsetzbarkeit der AR-Anweisungen am virtuellen Prototyp zu erfassen. Damit gliedert sich die Hauptuntersuchung in die 3 Arbeitspakete:

- Exp2-1 Erleben des virtuellen Prototyps mit AVR-Presenter
- Exp2-2 Erleben der AR-Arbeitsunterlagen mit AVR-Presenter
- Exp2-3 Ausführen von Anweisungen am virtuellen Prototyp

Die Gesamtdauer der Untersuchung liegt wie auch in der Voruntersuchung bei 30 Minuten. Nach der Beantwortung allgemeiner Fragen zur Person und dessen Kenntnisse im Bereich AR, VR und Instandhaltung, beginnt die Untersuchung mit dem AVR-Presenter. Im ersten Abschnitt macht sich der Proband mit AVR-Presenter und virtuellen Prototyp vertraut. Der Proband wird in die Steuerung eingewiesen und orientiert sich in der CAVE. Alle Probanden konnten den Kleintransporter auf der Hebebühne gut wahrnehmen und bewerteten die Immersion im Durchschnitt als gut (Abbildung 12).

Bewertungskriterien sind wie auch schon bei der Voruntersuchung die Qualität, die Tiefenwahrnehmung sowie das Größenverhältnis. Diese werden in die Wahrnehmung des gesamten Kleintransporters

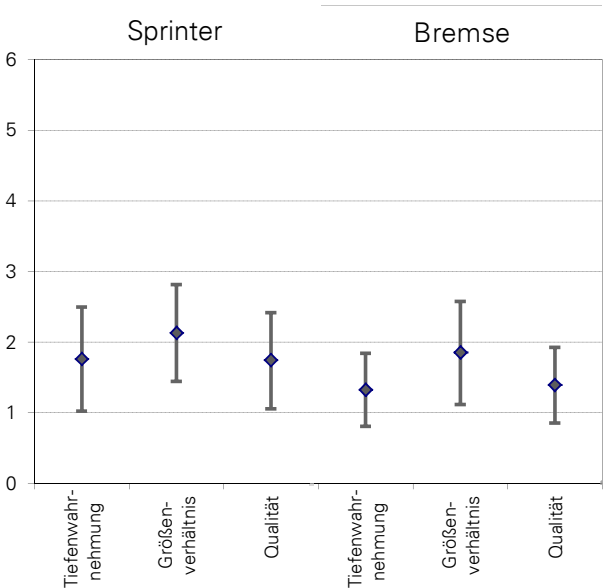


Abbildung 12: Wahrnehmungsgüte des virtuellen Prototyps

und die der Vorderbremse unterschieden. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Tendenzen aus der Voruntersuchung bestätigen sich, wobei die Ergebnisse im Allgemeinen etwas besser ausfallen. So bewerten 95 % der Probanden die Qualität und Tiefenwahrnehmung mindestens mit der Note 3 (befriedigend). Bei der Einschätzung der Größenverhältnisse vergeben immer noch 68% der Probanden mindestens die Note 3, was keine wesentliche Verbesserung zur Voruntersuchung darstellt (vgl. Abbildung 7). Eine signifikante Verbesserung ist jedoch bei der Tiefenwahrnehmung festzustellen. Bei der Bewertung des Sichtfeldes wurde sogar eine hoch signifikante Verbesserung erreicht. Diese Ergebnisse sind vor allem auf die Anpassung am AVR-Presenters zurückzuführen.

Im zweiten Abschnitt werden die Probanden in der CAVE aktiv und dafür mit der Handhabung des Flight Sticks vertraut gemacht. Am Beispiel des Vorderrades wird ein Ausbauvorgang unter Anweisung

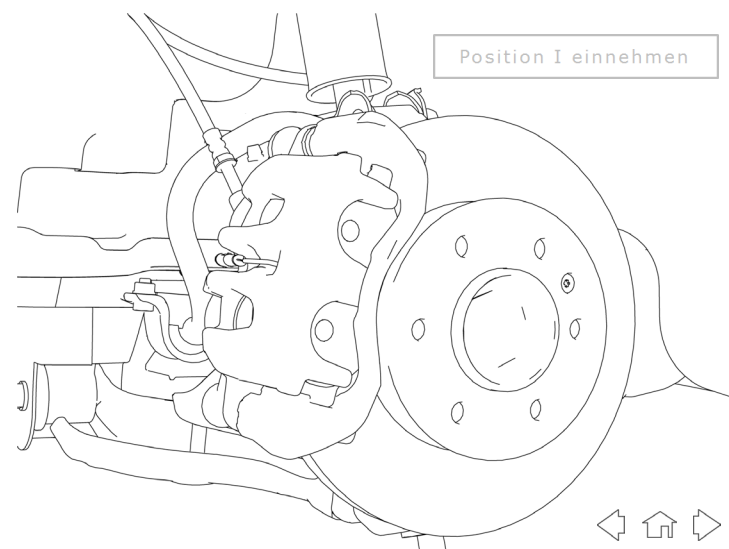


Abbildung 13: Modellausschnitt der Bremse als Objektgrafik

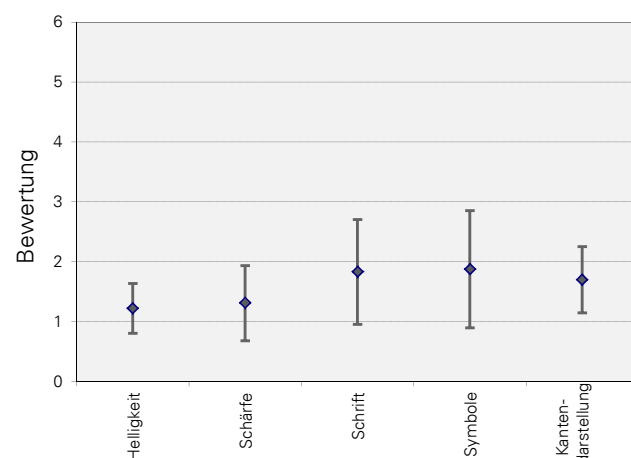


Abbildung 14: Wahrnehmungsgüte der AR-Arbeitsunterlagen

des Betreuers durchgeführt. Anschließend wird die erste Tätigkeitsbeschreibung im AVR-Presenter eingeblendet und zeigt einen Modellausschnitt als Kantendarstellung. Dieser muss mit dem virtuellen Prototyp manuell überlagert werden.

Die dargestellte Bremse wurde von allen Probanden als solche erkannt und konnte selbständig mit dem virtuellen Prototyp überlagert werden. Diese Aufgabe wurde mit gut lösbar bewertet und die Überdeckung als genau empfunden.

Nachfolgend müssen die Probanden selbständig Tätigkeiten am virtuellen Prototyp unterstützt durch die AR-Arbeitsunterlagen durchführen. Eine ständige Überlagerung vom virtuellen Prototyp mit dem Kantenmodell ist hierbei nicht notwendig. Folgenden Aufgaben sind unter Verwendung des Flight Sticks abzuarbeiten:

1. Ausbau der Verschleißanzeige und des Bremsschlauchs
2. Abziehen der Staubkappen am Bremssattel
3. Lösen der Befestigungsschrauben des Bremssattels
4. Abziehen des Bremssattels

Die Bearbeitungszeit jeder Aufgabe wird durch den Betreuer gemessen. Dieser gibt falls explizit vom Probanden gefordert, Hilfestellung zur aktuellen Aufgabe. Eine Bewertung der Wahrnehmungsgüte erfolgt an zwei ausgesuchten Arbeitsunterlagen. Dies sind zum einen die Einnahme der Arbeitsposition (vgl. Abbildung 13) und zum anderen die Beschreibung des Arbeitsschritts A1 (vgl. Abbildung 10). Die Auswertung erfolgt nach den gleichen Kriterien (Helligkeit, Schärfe, Lesbarkeit, Symbole, Kantendarstellung), wie in der Voruntersuchung und ist in Abbildung 14 dargestellt.

Im Vergleich zur Voruntersuchung (Abbildung 8) hat sich vor allem die Bewertung der Symbole verbessert, die jetzt detaillierter erkannt werden. Eine Verbesserung anderer Kriterien konnte nicht erreicht werden. Mit der Verwendung von Vektorgrafiken kann zwar eine auflösungsunabhängige Erstellung der Objektgrafik realisiert werden, ist aber bei der Anzeige weiterhin von den Hardwareparametern des jeweiligen AR-Displays abhängig. Damit ist bei gleichbleiben-

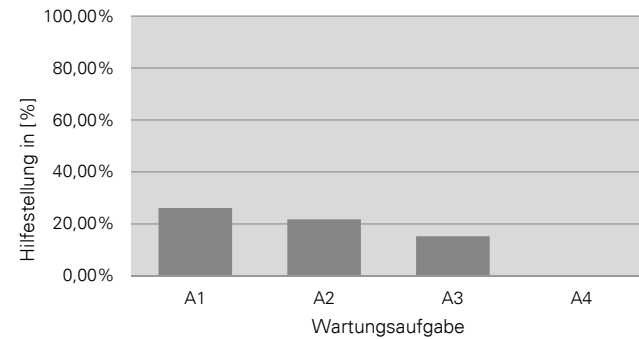


Abbildung 15: Hilfestellungen durch Betreuer je Aufgabe

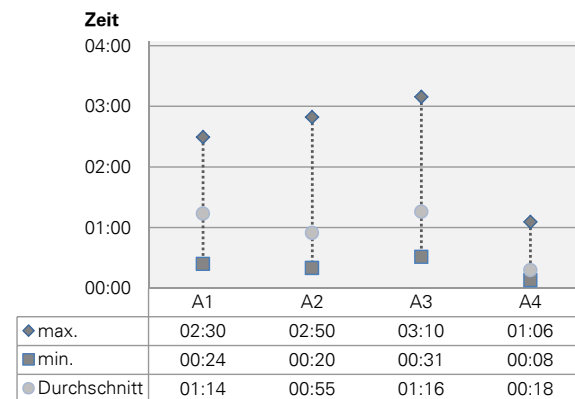


Abbildung 16: Bearbeitungszeit je Aufgabe

der Auflösung auch nur eine gleichbleibende Darstellungsqualität der Objektgrafik erreichbar. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die gemeinsame Wahrnehmung von AR-Arbeitsunterlagen und virtuellen Prototypen in einer guten Qualität realisiert werden kann. Die Arbeitsinhalte können von allen Probanden in Bezug zum virtuellen Prototyp gesetzt werden.

Die Häufigkeit der gegebenen Hilfestellung, die Bearbeitungszeit sowie die subjektive Einschätzung des Probanden werden herangezogen um den Schwierigkeitsgrad beim selbstständigen Arbeiten (A1 bis A4) mit dem AVR-System zu bewerten. Abbildung 15 zeigt

den prozentualen Anteil der Probanden, die Hilfestellungen bei der Lösung der Aufgaben benötigten.

Deutlich erkennbar ist, dass der Anteil an Hilfestellungen über die Versuchsdauer abnimmt. Zur Bewältigung der Aufgabe A1 benötigen 26 % der Probanden vor allem beim Umgang mit dem Flight Stick Hilfe. Beim Finden der Staubkappen und den damit verbunden Positionswechsel unter das Auto (A2) benötigen noch 22 % der Probanden Hinweise durch den Betreuer. Lediglich 2 Probanden hatten beim Finden der Schrauben (A3) Probleme und benötigten Hilfe. Als besonders schwierig erwies sich der Ausbau der Schrauben, da diese nur über eine kleine Angriffsfläche verfügen und der Flight Stick in Schraubenachse gedreht werden muss. Falls notwendig wurde ein günstiges Vorgehen mit dem Flight Stick gezeigt. Bei der letzten Aufgabe, dem Abziehen des Bremssattels (A4) benötigt kein Proband Hilfe. Dies bestätigt, dass nach einer Trainingsphase Wartungsabläufe in immersiven Umgebungen sehr gut evaluiert werden können und ein effizientes Arbeiten mit dem AVR-System möglich ist. Bekräftigt wird diese Aussage durch die sich verkürzenden Bearbeitungszeiten im Verlauf der Untersuchung. Abbildung 16 zeigt die erfassten Bearbeitungszeiten pro Aufgabe.

Mit jeder Aufgabe sinkt die Bearbeitungszeit. Eine Ausnahme bildet auch hier Aufgabe A3, die in ihrer Ausführung länger dauerte oder wie bei 3 Probanden gar nicht ausgeführt werden konnte. Die subjektive Einschätzung des Schwierigkeitsgrads in Abbildung 17 macht die Ursache dabei deutlich.

Der Schwierigkeitsgrad wird vom Probanden auf einer Skala von 1 (sehr leicht) bis 6 (sehr schwer) eingeschätzt, wobei das Lösen der Aufgaben in »Teile finden« (schwarz) und »Teile ausbauen« (grau) unterteilt wird. Es wird deutlich, dass sich mit fortschreitender Nutzung des AVR-Systems der Umgang mit diesem verbessert und die zu manipulierenden Teile der jeweiligen Aufgabe einfacher gefunden werden. Eine ähnliche Lernkurve ist beim Arbeiten mit dem Flight Stick erkennbar, wobei die subjektive Einschätzung des Schwierigkeitsgrades von Aufgabe A3 eine Ausnahme bildet und der Ausbau als schwierig eingestuft wird.

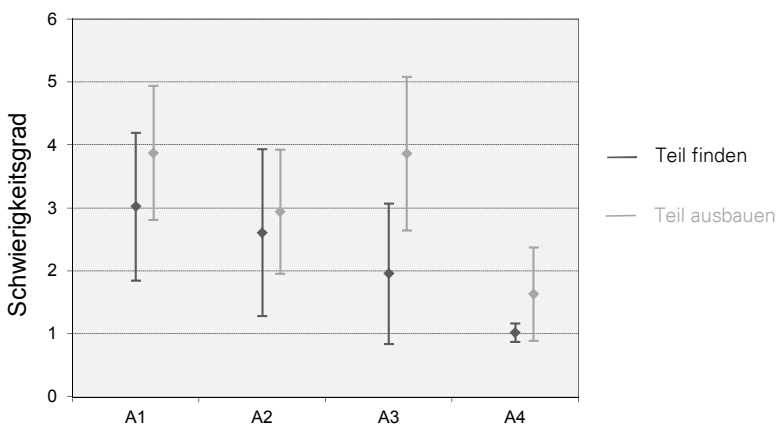


Abbildung 17: Ausführen von Anweisungen am virtuellen Prototyp

Fazit

Grundsätzlich bestätigt die durchgeführte Benutzerstudie, dass AR-Systeme in immersiven Umgebungen eingesetzt werden können und die gemeinsame Wahrnehmung von AR-Information und virtuellem Prototyp realisierbar ist. AR-Arbeitsunterlagen können evaluiert und angegebene Arbeitsschritte am virtuellen Prototyp durchgeführt werden. Die Probanden konnten nach einer Trainingsphase selbstständig mit dem AVR-System arbeiten sowie Anweisungen interpretieren und umsetzen. Dies verdeutlicht, dass das AVR-System auch ohne große Vorkenntnisse genutzt werden kann.

Eine Adaption des AVR-Systems auf ein komplexes Szenario ist unter Einbeziehung von erfahrenen Servicetechnikern umzusetzen um unter anderen die Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit in der Zielgruppe sicherzustellen. Um die Übertragbarkeit der AR-Arbeitsunterlagen auf das reale Produkt abzusichern muss ebenfalls eine vergleichende Untersuchung am Wartungsobjekt unter realen Bedingungen durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

Azuma, R. T. 1997: A Survey of Augmented Reality. In: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355–385, Cambridge: MIT Press.

Bertsch, B., Bullinger, H.-J. (Hrsg.) 2007: Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping. Heidelberg: Springer-Verlag

DIN 11042 1978: Instandhaltungshandbücher – Bildzeichnungen und Benennung, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Jundt, E.; Menk, C.; Schreiber, W. 2011: Projection-based Augmented Reality im Service-Training. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.) Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. 10. Paderborner Workshop, 239-252, Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.

Krevelen, D.W.F. van; Poelman, R. 2010: A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. In: The International Journal of Virtual Reality, 9(2) 1–20

Lukasser, H.; Böhme, J.; Lühr, B. et al. 2004: AR für die Montage komplexer Systeme, In: Friedrich, W. (Hrsg.): ARVIKA – Augmented Reality für die Entwicklung, Produktion und Service, 165–194, Erlangen: Publics Corporate Publishing

NOMAD Expert Technician System 2004: Configuration & Specification, Bothell: Microvision Inc.

Regenbrecht, H. 2007: Emerging technologies of augmented reality. In: Billingham, M.; Thomas, B. H. (Hrsg.): Industrial Augmented Reality Applications, 284 – 304, London: Idea Group Publishers.

Steger, W.; Stelzer, R.; Klaus, M. et. al. 2011: Practical evaluation of maintenance work in a mixed reality environment. In Proceedings of the ASME 2011 World Conference on Innovative Virtual Reality, Milan: ASME

Stelzer, R.; Petermann, D.; Saske, B.; Steger, W. 2009: Kollaborationsumgebung in einer heterogenen CAD-VR-Systemlandschaft In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.) Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. 8. Paderborner Workshop, 212–221, Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.

Stelzer, R.; Steindecker, E.; Saske, B. 2011: Augmented Reality am virtuellen Prototyp. In: Gausemeier, J.; Grafe, M. (Hrsg.) Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. 10. Paderborner Workshop, 225–236, Paderborn: Heinz Nixdorf Institut.

Wöhler, T.; Wolter, L.; Rothenburg, U.; Strauchmann, M.; Mader, S.; Haupt, M.: Konzepte und Implikationen zur Integration von VR-, CAx- und PDM-Systemen für die funktionale Absicherung von Montage-/Demontageoperationen. In: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme : 13. IFF-Wissenschaftstage, Magdeburg.

- Wohlgemuth, W. 2007: ARTESAS – Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications: Sachbericht Gesamtvorhaben; zusammenfassender Schlussbericht; BMBF-Leitprojekt ARTESAS, Nürnberg: Siemens AG
- Zhou, F.; Duh, H.; Billingham, M. 2008: Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. In: 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S.193–202. Cambridge

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer
 Dr.-Ing. Bernhard Saske
 Dipl.-Ing. Erik Steindecker
 Technische Universität Dresden
 Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
 01062 Dresden
www.tu-dresden.de/mw/ktc

Alexander Krauß & Uwe Fischer

Konstruktionsintegrierte Optimierung mit intelligenten Bauteilfeatures im Dünnschichtbereich

Globalisierung, gestiegener Konkurrenzdruck und ein effektiver Einsatz von Ressourcen zwingen die Unternehmen – nicht nur in der Automobilindustrie – zu einer permanenten Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess. Um schnell das optimale Design zu finden, kommen CAD- und CAE- Programme in einer frühen Entwicklungsphase des Bauteils zum Einsatz. Durch eine virtuelle Überprüfung und Verbesserung z.B. von Funktion, Gewicht und Lebensdauer können kostenintensive Prototypen und Versuche erheblich minimiert werden. In der Automobilindustrie rücken zudem akustische Eigenschaften immer mehr in den Fokus. Ein geringes Innenraumgeräusch oder der spezielle »Sound« eines Fahrzeuges sind klassenspezifische Qualitätsmerkmale, welche die Kaufentscheidung des Kunden stark beeinflussen (Zeller 2009). Bei der Konstruktion von Karosseriebauteilen muss dabei besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Resonanzeffekten gelegt werden. Moderne CAD-Programme – wie CATIA V5® der Firma Dassault – bieten bereits die Möglichkeit im CAD-Workflow Bauteileigenschaften zu ermitteln. Somit verschmelzen zunehmend die Grenzen zwischen Berechnung und Konstruktion. Allerdings setzt jeder Teilbereich Erfahrung und Expertenwissen voraus, wodurch immer noch eine entsprechende Kaskadierung der Aufgaben im Entwicklungsprozess zu finden ist. Diese wird nachstehend erläutert.

Nach Erörterung der Aufgabenstellung erstellt der Karosseriekonstrukteur einen ersten Bauteilentwurf im CAD. Dabei fließen verschiedene Parameter wie z. B. Funktion, Bauraum und Herstellbarkeit ein. Allerdings können spezielle Anforderungen nur schwer berücksichtigt werden. Hier befindet sich die Schnittstelle zum Berechnungsingenieur, welcher Bauteilkennwerte, meist mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM), ermittelt und optimiert. Dabei wird zuerst im sogenannten Preprocessing ein FEM-Modell erstellt, welches auf dem CAD-Modell des Konstrukteurs beruht. Zur Datenübermittlung sind Schnittstellen erforderlich, wodurch ein Verlust der Konstruktionshistorie und eventuelle Fehler durch Vereinfachungen die Folge sind. Ist ein funktionsfähiges und validiertes Modell erzeugt, können die berechneten Werte mit verschiedenen FEM-Netz-basierten Optimierungsverfahren angepasst werden. Im Dünnschichtbereich kommt dafür häufig die Formoptimierung zum Einsatz. Der Optimierungsalgorithmus verschiebt FE-Knoten im zulässigen Designbereich, welche durch eine Sensitivitätsanalyse ermittelt wurden. Die grobe Form eines möglichen Sickenbildes wird so approximiert (Harzheim 2008). Mit diesem Verfahren lässt sich beispielsweise die erste Eigenfrequenz eines flachen Endschalldämpfers durch Hohlprägungen erhöhen (Zeller 2009). Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist die Unabhängigkeit von der Qualität des CAD-Modells, da ausschließlich im FEM-Netz geändert wird (Harzheim 2008). Durch die gleichmäßige Verteilung von Designvariablen wird eine große Optimierungsfreiheit gewährleistet. Allerdings ist der größte Vorteil – unabhängig vom CAD-Modell zu sein – auch der größte Nachteil. Alle gefundenen Änderungen muss der Konstrukteur von Hand in das bestehende Geometriemodell einpflegen. Zudem leidet durch die Knotenverschiebung die Elementqualität erheblich. Es können so Optimierungsabbrüche oder realitätsferne Ergebnisse entstehen. Nach Intes (2012) gibt es zwar Ansätze diesen Effekt zu mildern, jedoch ist eine Restverzerrung gerade bei komplexen Bauteilen nie auszuschließen. Eine betragsgenaue Verschiebung von Eigenfrequenzen ist so nicht möglich, da das Optimierungsergebnis nicht der Endkontur entspricht. Um eine Elementverzerrung zu vermeiden, basiert die ebenfalls häufig verwendete Topologieoptimierung auf einem anderen Prinzip. Das Bauteil wird hier über die Veränderung verschiedener Elementeigenschaf-

ten, wie Dichte oder Blechdicke, angepasst (Schumacher 2005). Bei dieser Methode können gröbere Netze mit besserer Elementqualität verwendet werden. Für bestimmte Zielsetzungen – wie in Leypold (2005) gezeigt – ist sogar eine automatische Ergebnissrückführung ins CAD für optimierte Volumenkörper möglich. In Olhoff et al. (2007) wird ein Algorithmus zur Eigenfrequenzverschiebung vorgestellt, der auf der Topologieoptimierung beruht. Hier wird der Abstand zwischen zwei Eigenfrequenzen maximiert, um Resonanzeffekt zu vermeiden. Allerdings kommt dieser zurzeit in keinem kommerziellen Programm zum Einsatz. Die teilweise sehr abstrakten Ergebnisse der Topologieoptimierung müssen ebenfalls in das CAD-Modell eingearbeitet werden.

Egal ob Topologie- oder Formoptimierung, die vom Konstrukteur eingearbeiteten Anpassungen müssen durch nochmaliges Vernetzen und Berechnen an der Endgeometrie überprüft und validiert werden. Vor allem ist die Wirkungsweise einzelner Bereiche auf das Gesamtverhalten nicht immer schlüssig (Harzheim 2008). Die Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen bei FEM-Netz-basierten Optimierungen ist zudem nur partiell möglich. Bei empfindlichen Zielgrößen kann es unter Umständen dazu kommen, dass dieser zeitaufwändige Prozess bei einer grundlegenden Bauteiländerung wiederholt werden muss. An den genannten Fakten lässt sich zudem erkennen, dass die aktuelle Optimierungskette sehr personal- und kostenintensiv ist, da sie sequenziell durchlaufen wird. Die zahlreichen Softwareschnittstellen erschweren zudem eine direkte und effektivere Interaktion der Beteiligten.

Nach ausgiebiger Betrachtung der Vor- und Nachteile von FEM-Netz-basierten Optimierungsstrategien liegt der Gedanke nahe, einen Optimierungsprozess im CAD-Modell über eine entsprechende Parametrik zu implementieren. Ein endkonturnahes Optimierungsergebnis und geringere Elementverzerrungen im FEM-Netz durch regelmäßiges Neuvernetzen könnten so erreicht werden. Wie im Beispiel einer parameteroptimierten Ölwanne (Veiz et al. 2008) gezeigt, werden Sensitivitäten für ausgewählte Problemstellungen auf Grund der geringeren Anzahl von Designvariablen wesentlich besser ermittelt. Das Prinzip der Parameteropti-

mierung wird bereits im Programm SFE-Concept® der Fa. SFE verfolgt. Wie der Name vermuten lässt, ist diese Software jedoch nur für die Konzeptfindung geeignet und nicht für die gegebene Problemstellung. Der größte Nachteil dieser Methode ist jedoch die Parametrisierung im CAD-Modell selbst (Harzheim 2008). Besonders bei Flächenmodellen ist das manuelle Gestalten einer update-stabilen Geometrie schwierig und zeitaufwändig. Andererseits ist eine automatische Parametrisierung der Flächen über Splines, wie beispielsweise in Weiß (2010), Schumacher (2005) und Brecher (2011) vorgestellt, mit hohem Programmieraufwand verbunden, um die Spline-Kontrollpunkte zu koordinieren. Allerdings kann nur so eine updatestabile Geometrie erzeugt werden, welche Fertigungsparameter berücksichtigt. Zudem ist die Anzahl von Designvariablen im Vergleich zu einer FEM-Netz-basierten Optimierung wesentlich geringer, wodurch die Optimierungsfreiheit signifikant eingeschränkt wird. Aufgrund des hohen Aufwandes ist so eine vollständige Parametrisierung des gesamten Modells in den meisten Fällen nicht möglich.

Die Entwicklung eines effizienteren und schlankeren Optimierungsprozesses ist Inhalt des Mitte 2011 an der Westsächsischen Hochschule Zwickau gestarteten Forschungsprojektes „*Automatisierung von Optimierungsverfahren im Konstruktionsprozess*“, welches vom BMBF gefördert wird.

Dabei werden zwei wesentliche Zielstellungen verfolgt:

- Entwurf eines neuen Optimierungsprozesses der im CAD-Workflow implementiert ist
- Beeinflussung des akustischen Verhaltens ausgewählter Karosseriebauteile der Projektpartner

Ein erster Lösungsansatz für die angesprochenen Probleme wird im folgenden Beispiel anhand einer Grundlagenuntersuchung für eine partielle Eigenfrequenzerhöhung eines Karosseriebauteils gezeigt (Abbildung 1). Der entwickelte Optimierungsprozess soll es dem Konstrukteur ermöglichen, selbstständig in der CAD-Umgebung Verbesserungen am Bauteil vorzunehmen. Dabei bietet sich vor allem die oben genannte CAD-basierte Parameteroptimierung an,

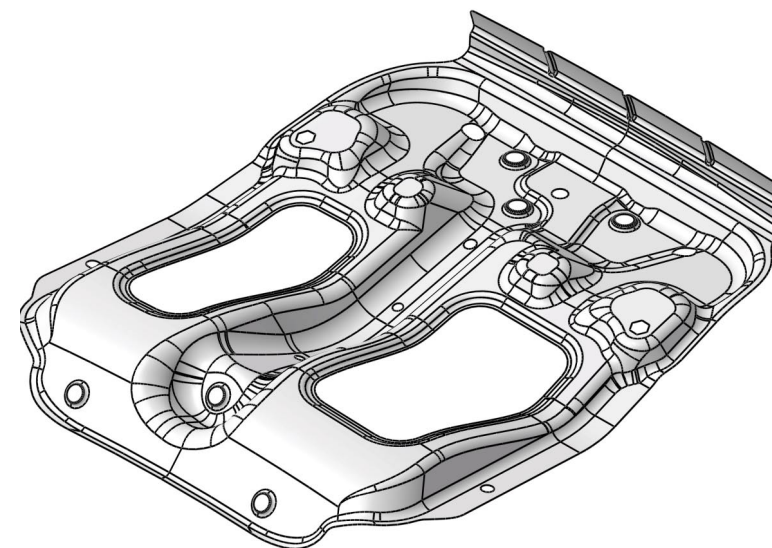


Abbildung 1: Karosseriebauteil für die partielle Eigenfrequenzoptimierung

um ein endkonturnahes Optimierungsergebnis zu erhalten. Der Berechnungsingenieur erhält in diesem Fall eine begleitende Rolle. Aufgrund des großen Funktionsumfangs und der häufigen Verwendung im Karosseriebau bildet CATIA V5® die Basis für diesen Prozess. Zuerst wurden die Eigenfrequenzen des Karosseriebauteils mit den Lagerungsrandbedingungen »Frei-Frei« (losgelöst von allen Anbindungen) berechnet. Die FEM-Modellerstellung und automatische Vernetzung erfolgt dabei über CATIA® – Advanced Meshing Tools (AMT). Eine interaktive Verknüpfung zwischen CAD-Geometrie und FEM-Netz wird somit etabliert. Eventuelle Fehler durch eine Datenschnittstelle werden umgangen und Elementverzerrungen im Zuge der Optimierung erheblich minimiert. Zudem wurden zahlreiche Untersuchungen zur erzeugten Elementqualität durchgeführt. Diese zeigten, dass bei richtiger Konfiguration des automatischen

Vernetzers auch bei komplexer Geometrie ein qualitativ hochwertiges FEM-Netz mit Acht-Knoten-Schalenelementen (S8R) erstellt werden kann. Besonders deutlich wird dies bei den Anbindungsstellen für die Stanzschrauben (Abbildung 2).

Der ABAQUS®-Solver, welcher in FuE-Vorhaben häufig zum Einsatz kommt, wurde in diesem Prozess eingebettet. Über die CATIA®-integrierte Oberfläche ABAQUS for CATIA® besitzt man die Möglichkeit ABAQUS®-Input-files direkt in CATIA® zu erstellen. Die Daten werden an den ABAQUS®-Solver übermittelt, berechnet und können anschließend im CAD-System visualisiert werden. Es ergibt sich so ein geschlossener Kreislauf, indem das CAD-Programm für die Schritte des Pre- und Postprocessing nicht verlassen werden muss. Für die Optimierung kam vorerst der CATIA-interne Product Engineering Optimizer® (PEO) als Parameteroptimierer zum Einsatz. Da kein zusätzliches Skripting notwendig war, erwies sich diese Kombination, nach Betrachtung verschiedener Programmverknüpfung, als die beste Variante (Krauß 2011). Das in CATIA erstellte FEM-Modell wurde mit einer experimentellen Modalanalyse (bis 500 Hz) validiert. Die maximale Frequenzabweichung zwischen Simulation und Experiment betrug dabei 3 Hz.

Im nächsten Schritt wird das Bauteil so optimiert, dass sich die vierte Eigenfrequenz von 223 Hz auf 260 Hz erhöht. Die anderen Eigenfrequenzen (bis 400 Hz) sollen sich dabei nur geringfügig ändern. Meist liegen die Bauteile – wie auch dieses – als nicht parametrischer Flächenverbund vor. Im besten Fall hat der Konstrukteur den Erstentwurf in CATIA® erzeugt, womit eine Parametrik und Konstruktionshistorie verbunden ist. Häufig stellt sich diese jedoch als sehr komplex dar, wodurch das Bauteil eine geringe Updatestabilität besitzt. Deshalb greift die hier vorgestellte Methodik auf die erstellten Basisflächen des Erstentwurfs zu und implementiert updatestabile parametrische Teilbereiche in die vorhandene Geometrie. Diese fungieren als unabhängige Systeme im Flächenverbund, womit die Arbeitsweise für eine Vielzahl von Bauteilen geeignet ist.

Mit einer vorgeschalteten Bereichsidentifikation durch einen Berechnungsingenieur wird zuerst die Frage geklärt, wo muss das

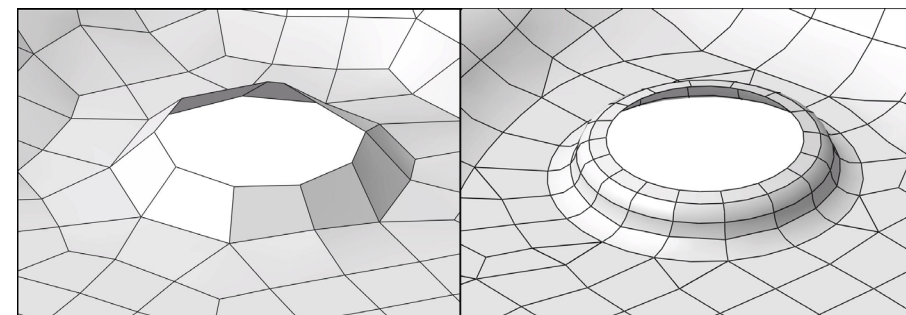


Abbildung 2: Links: Ausgangskonfiguration des FEM-Vernetzers (Elementgröße: 4mm)
Rechts: Optimierte Konfiguration des FEM-Vernetzers (Elementgröße: 4mm)

Bauteil geändert werden, um eine Anpassung der Zielgröße hervorzurufen. Die so ermittelten Gebiete wurden anschließend aus der Basisgeometrie herausgelöst, parametrisiert und wieder in die Basisflächen rückimplementiert. Die Parameter werden den CATIA-PEO® übergeben um die Zielgröße anzupassen (Abbildung 3). Veranschaulicht wird diese Vorgehensweise an den vorliegenden Karosseriebauteil, welches als nicht parametrische .model-Datei vorlag. Um die Änderungsbereiche zur Erhöhung der 4. Eigenfrequenz zu identifizieren wird ein Maximum an Optimierungsfreiheit benötigt. Dieses kann nur eine FEM-Netz-basierte Optimierung bieten. Das vorher erstellte FEM-Modell wird dazu exportiert und nach geringer Modifikation optimiert. Hier wurde untersucht, welche der beiden Methoden zur Eigenfrequenzerhöhung am besten geeignet ist. Dabei erwiesen sich die berechneten Veränderungen der Topologieoptimierung als nicht übertragbar. Die Formoptimierung hingegen zeigte bessere Ergebnisse. Gleichzeitig wird die Herstellbarkeit des Bauteils über eine Umformanalyse betrachtet. Die Ergebnisse werden später weiterverarbeitet und fließen, neben dem Bauraum, in die Grenzwerte für die Geometrieparameter ein. Im nächsten Schritt werden die gefundenen Bereiche eingearbeitet. Zuerst wird dafür großzügig ein Flächenbereich, welcher signifikante Änderun-



Abbildung 3: Erstellung der parametrischen Flächenbereiche

gen in der Formoptimierung aufwies, herausgelöst. Zur Implementierung einer updatestabilen Geometrie stellte sich die Verwendung von Booleschen Operationen als die beste Variante dar. Diese kann man jedoch nur auf Volumenkörper anwenden. Daher wird das herausgelöste Flächenstück in einen Hybridkörper überführt. Unterhalb dieses Körpers wird ein zweiter Volumenkörper erzeugt, welcher die Form einer späteren Hohlprägung hat. Um eine Entformung zu gewährleisten, wurde an ihm bereits eine parametrische Auszugsschräge angebracht. Über den in CATIA erstellten Parameter »Sickenhöhe« kann der Betrag der Extrusion des zweiten Körpers gesteuert werden. Ab einem bestimmten Wert durchdringt er den ersten Volumenkörper vollständig. Mithilfe einer Booleschen Operation, verschmelzen die beiden Körper. So entstandene Kanten können anschließend für eine Verrundung genutzt werden, wobei Radius und Aktivität ebenfalls mit Parametern versehen sind. Zur automatischen Vernetzung in CATIA mit Schalenelementen muss allerdings eine zusammenhängende Fläche vorliegen. Dazu werden die Außenflächen des gesamten Volumenkörpers abgeleitet und mit den Bereichsbegrenzungen beschnitten. Somit erhält man wieder die Grundfläche. Diese verändert sich jedoch bei Durchdringung des zweiten Körpers. Die parametrischen Flächenstücke – auch Patches genannt – werden mit der restlichen Geometrie zusammengefasst. Der Kernpunkt liegt dabei auf der intelligenten Parametrik, welche in diese Features implementiert wurde. Die Parametersteuerung erfolgt dabei über CATIA-interne Rules und Laws. CATIA-Rules® sind Unterprogramme, die im Strukturbaum des CAD-Modells zu finden sind. CATIA-LAWs® hingegen sind Skizzen, die als mathematische Funktion genutzt werden. Durch sie wird z. B. die Größe der

Auszugsschräge dynamisch mit steigender Sickenhöhe angepasst. Jedoch können mit dieser Methode nicht nur fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt werden, sondern auch die Bedürfnisse einer Simulation. Aufgeführt sei hierbei die Verrundungssteuerung, welche von der CATIA-Rule® vorgenommen wird. Erreicht der Verrundungsradius einen gewissen Grenzwert, welcher im CATIA-LAW® verankert ist, wird die gesamte Verrundung ausgeschaltet. Die Anzahl von Elementen mit schlechten numerischen Eigenschaften kann so erheblich minimiert werden. In diesem Beispiel stellte sich die Sickenhöhe als Haupteinflussfaktor für die Eigenfrequenzen dar. Somit wird nur dieser Parameter den Optimierungsprozess als Designvariable übergeben. Durch ein zuvor ausgeführtes Screening, kann man ermitteln welche Sicke auf die zu optimierende Frequenz den größten Einfluss hat. Über den Parameter »maximale Sickenhöhe« wird die Herstellbarkeit gewährleistet. Eine minimale Sickenhöhe wäre zwar auch sinnvoll, es entstehen jedoch Parameterbereiche, in denen der Optimierungsalgorithmus keine Lösung finden kann. Anschließend wird ein Prozess im CATIA PEO® aufgebaut und es erfolgt eine zweistufige Anpassung der Zielgröße. Zuerst wird die vierte Eigenfrequenz mit dem eingebrachten Sickenbild auf 260 Hz erhöht. Im zweiten Schritt werden die Eigenfrequenzen, welche sich nicht ändern sollten, über eine erneute Anpassung mit anderen Geometrieelementen wie Aussparungen, wieder in die Nähe ihrer Ausgangslage gebracht. Der benutzte Simulated Annealing Algorithmus konvergierte so zu einer Lösung. Das erzeugte Sickenbild und die optimierten Eigenfrequenzen im Vergleich zum Ausgangszustand, sind in Abbildung 4 dargestellt. Wird nun eine Bauteiländerung durchgeführt, kann der Konstrukteur selbstständig optimieren. Für ähnliche Bauteile könnte bei analogen Last- oder Randbedingungen die FEM-Netz-basierte Formoptimierung entfallen. Somit erhält man einen wesentlich effizienteren Prozess mit einem endkonturnahen Optimierungsergebnis.

Der hier vorgestellte Prozess versucht die Vorteile der CAD-Parameter- und der FE-Netz-basierten Optimierungsverfahren zu kombinieren. Wie im Beispiel gezeigt, lässt sich mit dem in CATIA integrierten Preprocessing für einfache Problemstellungen ein vertrauenswürdiges FEM-Modell erstellen. Dabei besteht eine in-

teraktive Verknüpfung zwischen FEM-Netz und CAD-Geometrie, wodurch direkt auf Bauteiländerungen reagiert werden kann. Datenschnittstellen werden somit vermieden, was auch eine zeitliche Effizienzsteigerung bedeutet. Zudem kann der Berechnungsingenieur auf Basis dieses Modells eine FE-Netz-basierte Formoptimierung ausführen. Durch die Ermittlung der Änderungsbereiche, die im CAD-Modell, als selbständige Systeme fungieren, kann eine updatestabile parametrische Geometrie erzeugt werden. Es ist zudem möglich, parametrische und nicht parametrische Bereiche miteinander zu verbinden und so ein fertiges Bauteil zu erhalten. Wird das Basismodell geändert, können auch mit geringem Aufwand die parametrischen Bereiche angepasst werden. Die Updatestabilität ist vor allem der einfachen Formelemente und den »Boolschen Operationen« zu verdanken. Durch die implementierte Parametersteuerung wird die Herstellbarkeit des Bauteils bei der Optimierung eingehend berücksichtigt. Somit erhält man einen wesentlich effizienteren Prozess mit einem endkonturnahen Optimierungsergebnis, was für die Robustheit einer partiellen Eigenfrequenzveränderung existentiell ist. Der Aufwand einer FEM-Netz-basierten Formoptimierung zur Bereichsfindung erweist sich jedoch als Nachteil. Zudem ist die Erstellung der Sicken noch nicht automatisiert.

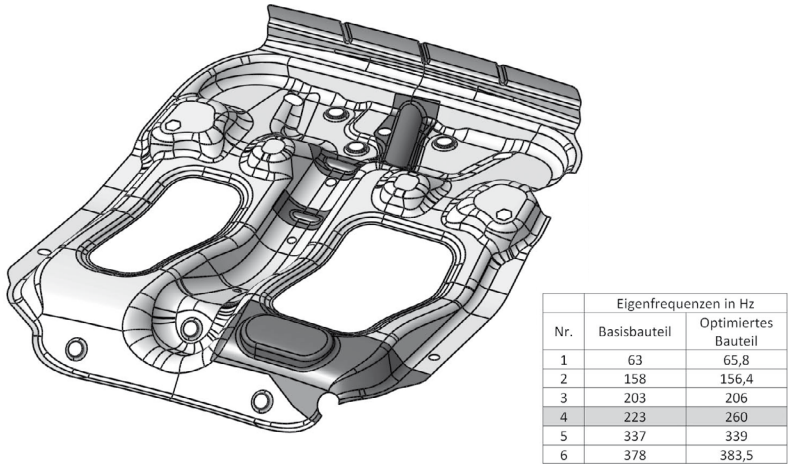


Abbildung 4: Optimierte Bauteil und Vergleich der Eigenfrequenzen

Zusammenfassend sind die Vor- und Nachteile der Methode nachstehend Stichpunktartig dargestellt.

Vorteile:

- Endkonturnahes Optimierungsergebnis
- Verknüpfung von parametrischer und nicht parametrischer Geometrie
- Berücksichtigung von Fertigungsparametern
- Geringere Netzverzerrungen während der Optimierung durch Neuvernetzen
- Erzeugung von lokaler updatestabiler parametrischer Geometrie
- Minimierung von Datenschnittstellen
- Nahezu selbständige Optimierung durch den Konstrukteurs
- Erneute Anpassung des Bauteils bei Änderung der Ausgangsgeometrie

Nachteile:

- Bereichsidentifikation über FE-Netz-basierte Formoptimierung
- CAD-Daten müssen vorhanden sein

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes wird unter anderem an realen Bauteilen untersucht, ob die Veränderungen effektiv sind. Weiterhin wird an einer eigenen Optimierungsstrategie gearbeitet, welche die Bereichsidentifikation vereinfachen soll. Ein anderer Schwerpunkt liegt außerdem auf einer schnelleren und effektiven experimentellen Modellverifikation. Am Ende soll ein teilautomatisierter Prozess vorhanden sein, bei dem es nicht notwendig ist, die CAD-Umgebung in irgendeinem Schritt der Optimierung zu verlassen.

Literaturverzeichnis

Brecher, C. 2011: Optimierung des strukturellen Verhaltens von Maschinenbauteilen durch parametergestützte Variation von Freiformgeometrien mit geometrischen Restriktionen. <http://gepris.dfg.de/gepris/octopus/gepris/?jsessionid=C20DA34428611BDEDB8965B3895A76BA?module=gepris&task=showDetail&context=projekt&id=13165220&selectedSubTab=2>, 11.04.2012

- Harzheim, L. 2008: Strukturoptimierung, Grundlagen und Anwendung.
Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH
- INTES, 2012: Beads for Optimizing Vibrations. http://www.intes.de/kategorie_support/download/flyer/E/BeadGeneration.pdf, 11.04.2012
- Krauß, A. 2011: Optimierung der Schlossverstärkung für die Heckklappe am Audi C6 hinsichtlich akustischem Verhalten, Diplomarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau
- Leybold, D. 2005: Überführung topologieoptimierter Fahrzeugrohbaugeometrien in die CAD-Ebene. In: Scharff, P. (Hrsg) 2005: 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Maschinenbau von Makro bis Nano, Ilmenau: Verlag ISLE
- Olhoff, N. & Du, J. 2007: Topological design of freely vibrating continuum structures for maximum values of simple and multiple eigenfrequencies and frequency gaps. Heidelberg: Springer-Verlag
- Schumacher, A. 2005: Optimierung Mechanischer Strukturen, Grundlagen und industrielle Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag
- Veiz, A. & Will, J. 2008: Optimierung einer Ölwanne, Anwendung der Prozesskette ProE – ANSYS Workbench – optiSlang. http://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/bibliothek/WOST_5.0/WOST_5_Veiz.pdf,
- Weiß, D. 2010, Feature-based spline optimization in CAD, A step towards geometry-based structure creation. Heidelberg: Springer-Verlag
- Zeller, P. 2009 (Hrsg): Handbuch der Fahrzeugakustik.
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag

Kontakt

Dipl.-Ing.(FH) Alexander Krauß
Westsächsische Hochschule Zwickau
Dr.-Friedrichs-Ring 2A
08056 Zwickau
Alexander.Krauss@fh-zwickau.de
www.fh-zwickau.de

Prof. Dr.-Ing. Uwe Fischer
Westsächsische Hochschule Zwickau
Dr.-Friedrichs-Ring 2A
08056 Zwickau
Uwe.Fischer@fh-zwickau.de

Carsten Böhme, Clemens Lieberwirth & Klaus Brökel

Konzept zum Parameterraustausch zwischen unterschiedlichen CAD/CAE-Plattformen

Einleitung und Motivation

Im ZIM-Projekt Vestainnen wird die Entwicklung einer stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage (SWSF) kleiner Leistung fortgesetzt. Dabei liegen die Schwerpunkte auf der Modellierung und Simulation der Belastungen an Anlage und den Abläufen in der Feuerung.

Insgesamt sind am Projekt sieben Partner beteiligt, die parallel und weitgehend unabhängig arbeiten und die Entwicklung ihres Teilprojekts vorantreiben. Bedingt durch die Vielfalt der Aufgaben kommt bei jedem Partner eine eigene, für die Teilaufgabe geeignete Softwarelösung zum Einsatz. Um die Entwicklungsergebnisse jedoch gemeinsam nutzen zu können, müssen diese eigenständigen Teilmodelle jederzeit auf einen gemeinsamen Stand gebracht werden können, um dieselbe Baugröße und Konfiguration der SWSF abzubilden.

Anwendungsszenario und Anforderungen

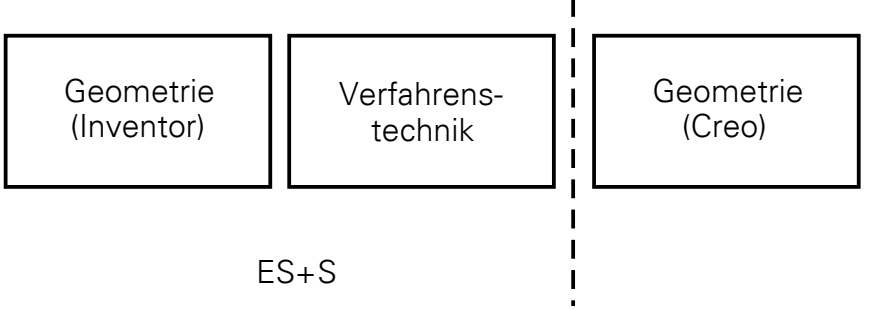
Geometrische Modelle werden an drei Stellen gepflegt (Abbildung 1). Der Industriepartner ES+S GmbH vollzieht die verfahrenstechnische Auslegung der Anlage in Excel und möchte sein Geometriemodell in Inventor vorhalten. Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD verwendet ein vollständiges Geometrie-

modell in Creo/Parametric. Davon werden vereinfachte Modelle zur FEM-Analyse der Belastungen in Creo/Simulate abgeleitet. Für den Lehrstuhl für Thermodynamik wird ein stark vereinfachtes Geometriemodell zur Weiterverwendung in Ansys bereitgestellt.

Die angestrebte Lösung zielt ausschließlich auf den inhaltlichen und zeitlichen Umfang des Forschungsprojekts. Erweiterbarkeit und Allgemeingültigkeit spielen folglich keine Rolle; die Nutzer sind vorab bekannt. Die Lösung darf die Freiheit der Partner bei der Bearbeitung ihrer Aufgabenstellung möglichst wenig einschränken; sie muss transparent und leicht zugänglich sein. Die Verwendung von Spezialsoftware ist zu vermeiden.

Ein Abgleich zwischen den Modellen der Partner ist nur selten erforderlich, es ist also keine automatisierte Lösung nötig, wie sie beispielsweise von Chen (2006) oder Scherer (2007) beschrieben wird. Trotzdem ist die manuelle Anpassung der unterschiedlichen Modelle oder die bereits seit langem kritisierte manuelle Weitergabe von CAD-Modellen (Gabbert 1998) zu vermeiden. Die Verwendung von Austauschformaten bedingt in der Regel immer noch den Verlust der Parametrierung, so dass diese Methode nur nach abgeschlossener Entwicklung geeignet ist. Hinzu kommt der höhere Koordinierungsbedarf bei manueller Weitergabe.

Abbildung 1: Teilmodelle der Projektpartner

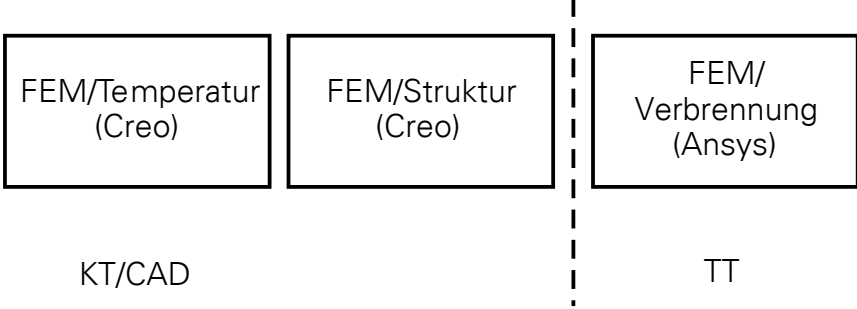


Vorherrschende Austauschpfade sind a) der Weg von der verfahrenstechnischen Auslegung zum Konstruktionsmodell oder zu den FEM-Modellen, b) die Weitergabe von an den Konstruktionsmodellen vorgenommenen Änderungen an die FEM-Modelle und c) die einheitliche Ablage der in den Berechnungsmodellen gewonnenen Ergebnisse.

Lösungskonzept

Da die verwendeten Modelle ohnehin vollparametrisch aufgebaut werden und zum Teil bereits mit externer Parametersteuerung verknüpft sind, bietet es sich an diese Mechanismen zu vereinheitlichen und alle Modelle in Abhängigkeit von einer gemeinsamen Parameterbasis aufzubauen. Die vergleichsweise einfache Geometrie der Wirbelschichtfeuerungsanlage erlaubt die Beschreibung der Konstruktion mit einer überschaubaren Menge von Kennwerten.

In dieser gemeinsamen Parameterbasis werden sämtliche Kennwerte verwaltet. Die abhängigen Modelle nutzen jeweils, entsprechend ihrer Komplexität, eine Untermenge der Parameter. Die Konstruktionsmodelle nutzen alle geometrischen Parameter (Liste A). Das Ansys-Modell hingegen benötigt nur eine kleine Untermen-



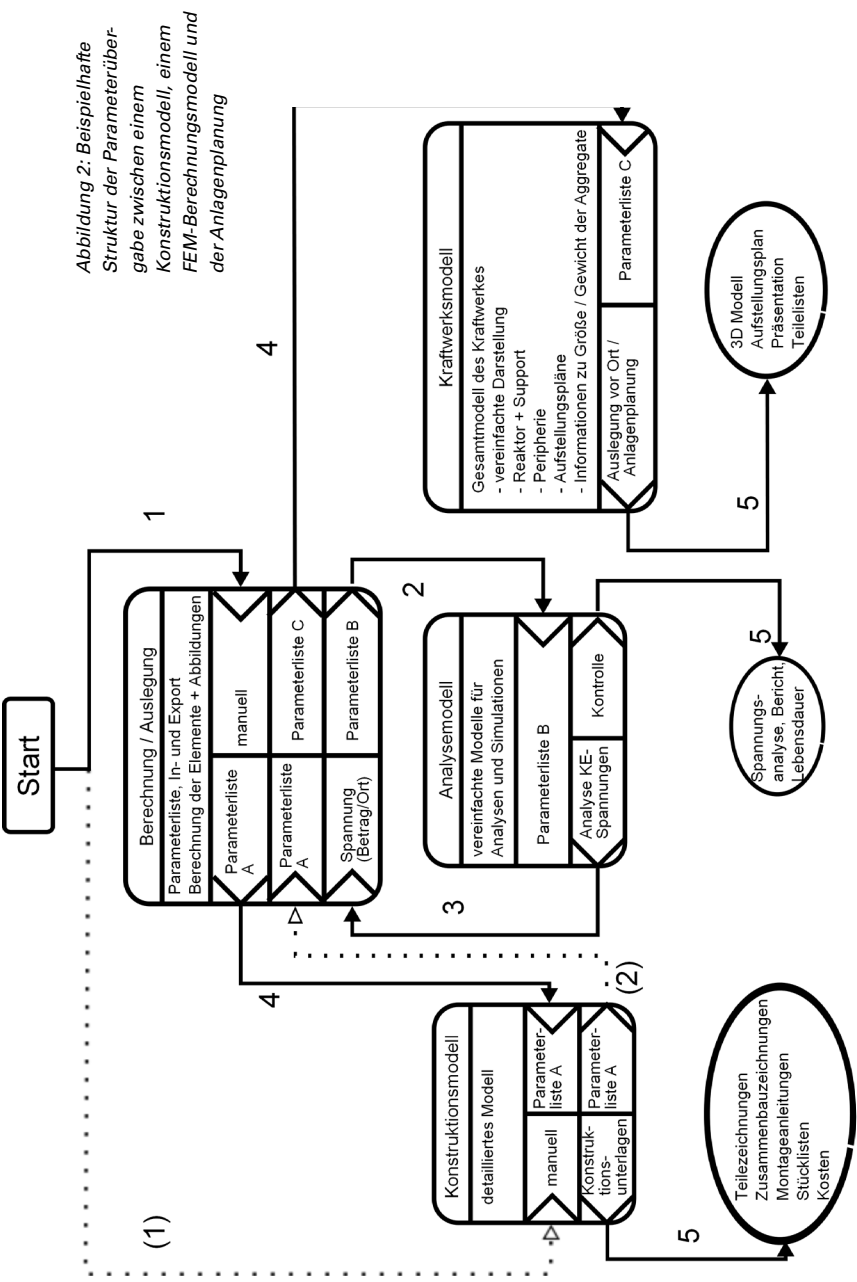
ge der Geometrieparameter (Höhe, Durchmesser) zur Anpassung der Hauptabmessungen, dafür aber auch einen Teil der verfahrenstechnischen Daten wie den Brennstoff- und Luftdurchsatz (Liste B). Auslegung oder Angebotserstellung erfordern wiederum eine andere Untermenge (Liste C). In Abbildung 2 sind mögliche Abläufe dargestellt.

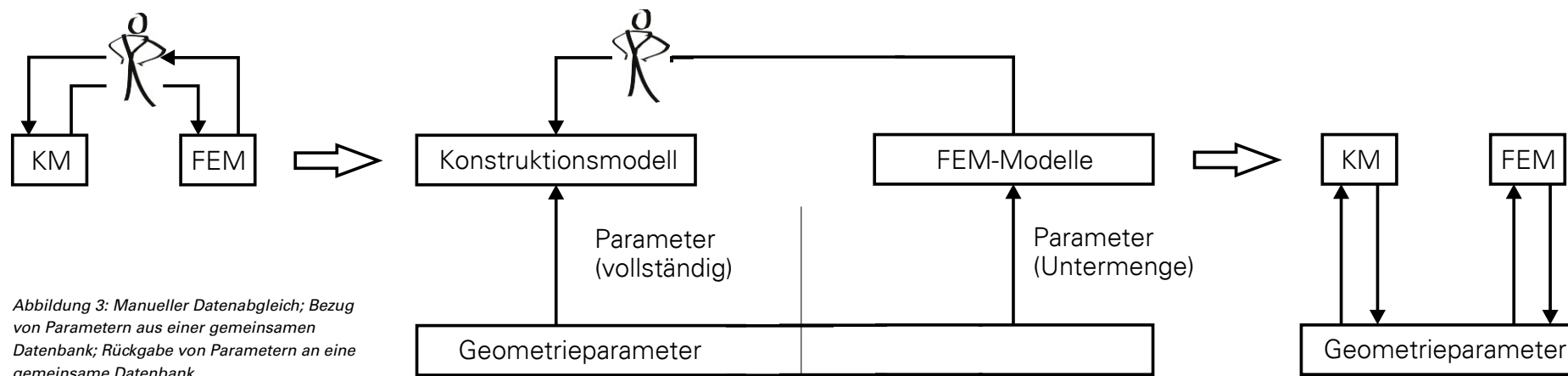
Eine solche Lösung verwaltet alle wesentlichen Anlagenparameter in strukturierter Form. Gleichzeitig lässt sie den Bearbeitern der einzelnen Modelle weitgehende Freiheit. Die Konstruktionsmodelle dürfen durchaus abweichende Details aufweisen; durch den Bezug auf gemeinsame Hauptparameter können alle Entwicklungszweige dennoch auf einen aus verfahrenstechnischer Sicht gleichen Stand gebracht werden.

Ein Beispiel für den Nutzen dieser Möglichkeiten bietet die Arbeit an den beteiligten Lehrstühlen. Wird eine abgegrenzte Konstruktionsaufgabe an einen Studenten übertragen, so muss dieser sich während seiner gesamten Bearbeitungszeit auf eine unveränderte Ausgangsbasis stützen und seine Aufgabe unabhängig bearbeiten können. Somit basiert das Arbeitsergebnis auf einem Monate zuvor eingefrorenen Zustand oder einer einzelnen Baugröße. Die gemeinsame Parameterbasis der Modelle ermöglicht trotzdem eine Annäherung an den aktuellen Stand. Dieses Konzept zeichnet sich durch sein geringes Abstraktionsniveau aus. Dies ist beabsichtigt, da somit die Datenübertragung zwischen den Modellen auch ohne spezielle Kenntnisse nachvollziehbar bleibt. Der Zugriff auf und Eingriff in die Parameterlisten ist jederzeit möglich. Bei konsequenter Nutzung der gemeinsamen Parameterbasis zur Modellsteuerung werden die Bearbeiter von vielen Anpassungsarbeiten entlastet (Abbildung 3).

Realisierungsbeispiel

Für die Verknüpfung von Excel, Creo, Inventor und Ansys werden die in den jeweiligen Programmen erforderlichen Arbeitsschritte in Kurzform erläutert. Grundlage ist immer der vollständige Datensatz in Excel, auf den die verknüpften Anwendungen zugreifen.





Excel

In einer Excel-Arbeitsmappe wird die gemeinsame Parameterdatenbasis gepflegt. In separaten Arbeitsblättern werden Geomtriedaten, Auslegungsdaten und Simulationsergebnisse verwaltet. Abweichende Konfigurationen können in weiteren Blättern abgelegt werden. Zu jedem Parameter sollten neben dem erforderlichen Wert auch Einheit, Bezeichnung und Erläuterung vorhanden sein. Die in der verfahrenstechnischen Auslegung ermittelten Hauptabmessungen für jede Konfiguration der Anlage werden direkt in die Excel-mappe übernommen oder manuell eingepflegt. Bei Bedarf stehen die Messwerte aus den Simulationen für die Auslegungsrechnung zur Verfügung.

Creo

In Creo/Parametric wird ein sinnvoll strukturiertes Modell der Wirbelschichtanlage erstellt. Die Excel-Arbeitsmappe wird als Analyse-KE in dieses Modell eingebunden. Die in einem auswählenden Bereich der Arbeitsmappe enthaltenen Werte werden als Parameter übernommen. Diese tragen automatisch ihre Zellennummer als Name und können manuell benannt werden. Die Parameter des Analyse-KEs sind nun in Creo verwendbar. In Creo veränderte Parameter können in ein weiteres Excel-Arbeitsblatt

oder eine CSV-Datei ausgegeben werden. Die zur Modellsteuerung verwendete Arbeitsmappe wird von Creo nicht manipuliert. Genau wie bei der Arbeit mit Inventor müssen die Werte daher mit Hilfe eines Makros ausgelesen übertragen werden. Für die verschiedenen FEM-Analysen werden aus dem Konstruktionsmodell vereinfachte Modelle abgeleitet. Diese behalten ihre Abhängigkeit und können so weiterhin aus Excel angepasst werden. Berechnungsergebnisse an ausgewählten Messpunkten werden in ein neues Blatt der Excel-Mappe exportiert und stehen dann zur weiteren Verwendung zur Verfügung.

Inventor

In der Software Autodesk Inventor wird die Geometrie erneut modelliert. Dabei muss sichergestellt sein, dass Abhängigkeiten ausgehend von den gleichen Hauptabmessungen wie im Creo-Modell aufgebaut werden. Die während der Modellierung automatisch angelegten Parameter können in geeigneter Weise benannt werden. Inventor ist in der Lage, eine Parameterliste einschließlich Bezeichnungen, Einheiten und Werten aus einem Excel-Arbeitsblatt einzulesen, welches direkt im Parametermenü eingebunden werden kann. Mit den so importierten Werten kann das Modell

regeneriert werden. Der Parameterexport aus Inventor erfolgt in das XML-Format. Dabei wird die gesamte Parameterliste ausgegeben; die interessierenden Hauptparameter können mit einem Excel-Makro in das Arbeitsblatt übertragen werden.

Ansys

Für die Verwendung in Ansys wird zunächst die in Creo erzeugte Geometrie importiert. Den Parametern dieser Geometrie werden dann in Ansys die entsprechenden Zellen aus Excel zugewiesen. Aus Ansys erfolgt keine Rückgabe von Werten.

Einordnung

Rüppel (2007) nennt 4 Evolutionsstufen der Kooperation: Austausch von Produktmodellen in Dateien, Nutzung von Produktmodellen in zentraler Datenbank, Nutzung verteilter Produktmodelle in inhomogener Umgebung, Integratives Kooperationsmodell. Die vorgestellte Methode verwendet eine gemeinsame Parameterbasis und ist daher mit der Stufe 2 vergleichbar. Sie verzichtet dabei auf den Austausch von Geometriemodellen und gibt lediglich Parameter weiter, die von den inhomogenen Anwendungen genutzt werden können.

Während das Konzept auf Excel-Basis für das vorliegende Szenario geeignet ist und hinsichtlich des Einrichtungsaufwandes attraktiv ist, ist die Erweiterbarkeit über die Nutzung im Projekt hinaus nur gering. Grenzen zeigen sich bei detailreichen Geometrien, da die Handhabung einer großen Menge an Parameterverknüpfungen nicht praktikabel ist. Die erforderlichen manuellen Arbeitsschritte beschränken weiterhin die Eignung für häufigeren Datenaustausch zwischen den Partnern oder die Verwaltung vieler unterschiedlicher Entwicklungsstände. Diese Einschätzung entspricht der von Schichtel (2002) dargelegten Kritik an Excel-Lösungen.

Zusammenfassung

Mit der beschriebenen Vorgehensweise steht eine für alle Partner zugängliche Lösung zur Verfügung. Dabei wird auf die Fähigkeiten der ohnehin vorhandenen Software zurückgegriffen. Die Lösung wird damit den Möglichkeiten und Anforderungen innerhalb des Projektes gerecht. Die Realisierbarkeit für kleinere Datenmengen wurde gezeigt.

Literaturverzeichnis

- Scherer, R., Weise, M., Katanuschkov, P. 2007: Ein Kooperationsmodell für die Kontrolle divergierender Planungszustände. In: Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau, Teil III, 197–218
- Gabbert, U., Wehner, P. 1998 The product data model as a pool for CAD-FEA data. In: Engineering with Computers, 14 (2), 115–122
- Rüppel, U. 2007: Grundlegende Betrachtungen zur vernetzten Kooperation. In: Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau, Teil I, 3–17
- Chen et al. 2006: Collaborative Design in PDM / 3D CAD Integrated Environment. In: Wuhan University Journal of Natural Sciences, 11 (3), 642–648
- Schichtel, M. 2002: Produktdatenmodellierung in der Praxis. München: Carl Hanser Verlag.

Kontakt

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Carsten Böhme
Universität Rostock, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Straße 2
18059 Rostock
carsten.boehme@uni-rostock.de

Prof. Dr.-Ing. Klaus Brökel
Universität Rostock, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Straße 2
18059 Rostock
www.kt.uni-rostock.de

Victor Gomes, Durval J. De Barba Jr.,
Jefferson de Oliveira Gomes, & Karl-Heinrich Grote

LCA to support decision-making in layout designs

1 Introduction

The economic impact of environmental regulations in the manufacturing sector and the increasing costs of primary resources have pressured companies wishing to obtain competitive advantages to seek ways to rationalize these resources, either through changes in products specifications or in manufacturing process. These actions depend on solutions that should consider the limits set out in the interdependencies between economic, environmental and social areas, which comprise the so-called sustainability tripod. In this case, the guiding principle for decisions should follow the approach of sustainable development. For this purpose, a proper performance indicators evaluation of processes is a great step to improvement actions and decision making for modifications. Continuous improvement approaches and support of mathematical tools, such as the Discrete Event Simulation (DES) have been used for identifying waste on the shop floor and for cost analyses for manufacturing optimization (Standridge et al. 2006). One of the advantages resulting from the application of DES in corporations is its capability to include the impact of randomness in a system. All the dynamics and the non-deterministic nature of the parameters eliminate the use of static tools such as spreadsheets for solving many line design problems. Furthermore, all commercial simulation software provides detailed animation capabilities. The animation of the manufacturing

process and flow can help engineers to visually detect problems or bottlenecks and also to test out alternate line designs. For this reason, the DES may be applied to generate requirements and sustainable systems specifications for manufacturing. However, the analyses results performed by using DES are not sufficient for the joint assessment of impacts on the three dimensions of sustainability (Johansson et al. 2010; Kuhl & Zhou 2009; Joschko et al. 2009).

A tool widely used in the academic environment and by corporations to calculate pollutant emissions rates in the product life cycle is Life Cycle Assessment (LCA). This can supplement cost assessments performed with DES in the production process phase.

This work discusses the combined use of DES with LCA to analyze production resources utilization in manufacturing systems. Towards this end, it seeks through a case study to analyze this joint use in decision-making for purchasing forklifts, according to sustainable premises.

2 Analysis for Sustainable Manufacturing

There are distinct tools and techniques to analyze and provide environmentally sustainable manufacturing systems. In most cases, consisting of cost analysis integrated with pollutant emissions analysis (Joschko et al. 2009; Johansson et al. 2010; Helu et al. 2010; Hermann et al. 2011). One of the biggest challenges for projects of new production systems is in obtaining data for the environmental impacts analysis, incorporated into the typical analyses of production (production capacity, material flow, transport, occupation rate of posts, etc.). The following topics introduce two evaluation methods for this type of analysis.

2.1 Life Cycle Assessment

In an LCA study is possible to develop a systematic analysis of the environmental consequences associated with products during their lifecycle. The most significant application of LCA concerns to support the decision-making in areas such as innovation, regulations (industrial, environmental), strategies and policies.

LCA consists of a four-stage process: Goals and scope definition; Inventory analysis (LCI); Impact assessment (LCIA); and results interpretation. LCA only permits to assess potential environmental impacts from different types (air pollution, land use, toxicity). LCIA aims at converting flows into potential impacts (midpoint) and consequences or effects (endpoint).

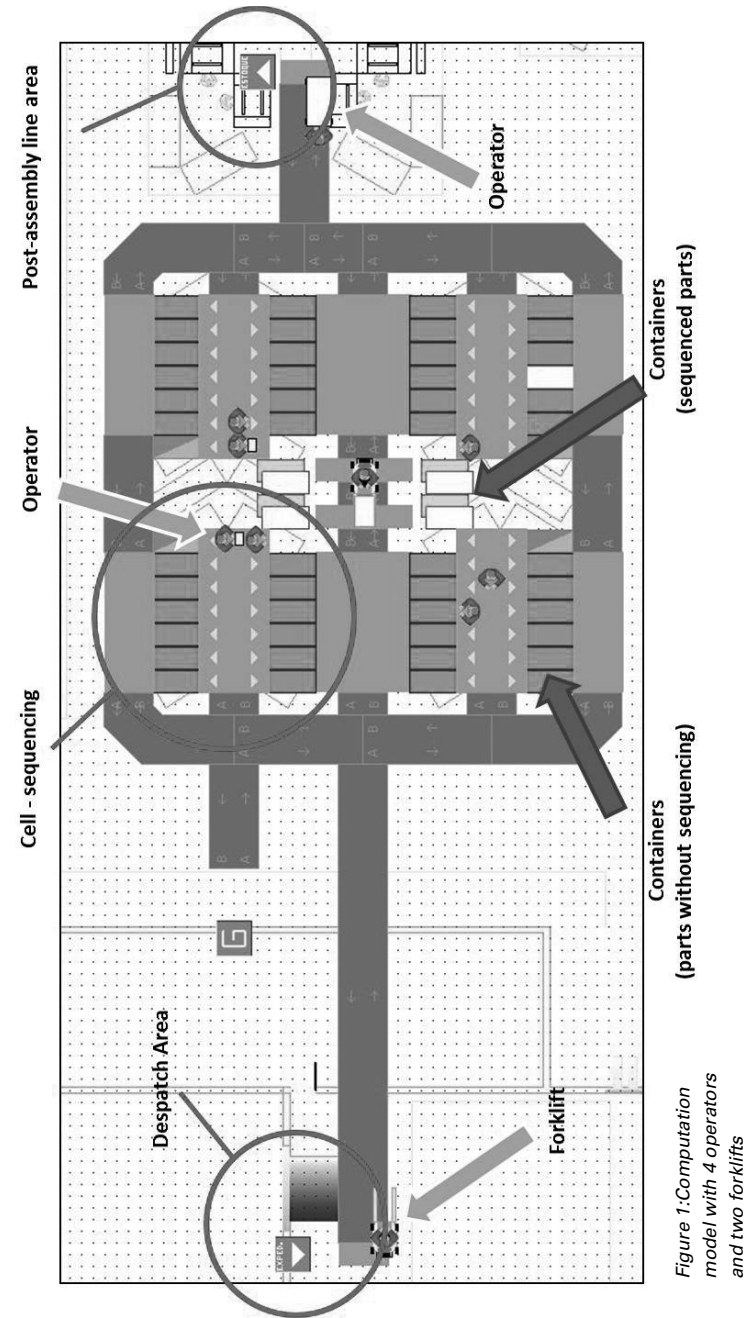
The biggest limitation of LCA studies as a tool for sustainability is that its environmental impacts only covers standard, not considering economic and social aspects (Silva 2010). The cost aspect is being integrated to LCA through liaisons with the life-cycle cost (LCC- Life Cycle Cost), that considers the cost implications originated in the entire product life cycle (Haggar 2007).

2.2 Sustainability Analyzes with Discrete Event Simulation (DES) method

The development of a computer program is just one of the many activities of a simulation process. In order for this to be successful, other activities should be followed. This set of activities or process is known in the literature as a methodology of simulation or life cycle of a simulation model (Banks et al. 2001).

By means of a computer simulation is possible to check some peculiar characteristics of a production floor as: the lead-time, identifying resources capacity constraints, the verification time of use rates of workers and machinery, the physical space required and the production volume variance (Kuehn 2006). Automotive companies have increasingly used the simulation as a prominent decision support tool. Most makes use of DES to model manufacturing systems and to analyze issues relating to the factory layout, process flow, material handling systems, capacity planning, investment in new equipment and production scheduling and logistics as well (Kuehn 2006).

There are many other criteria, which one could measure with DES besides to support production profitability improvements. Environmental considerations are becoming more relevant and require greater attention. DES with LCA is one possible combination for analyzing the cause and effect of various scenarios where time,



resources, place, and randomness of input variables affect the outcome in sustainable manufacturing design.

This joint application establishes the dynamic environment for sustainable production systems assessments and is an unexplored area with a few research publications. The few examples include: Solding and Petku (2005) and Solding and Thollander (2006). Both describe how DES could be utilized to reduce electricity consumption for foundries. Johansson et al (2009) describe how DES could be utilized in combination with LCA for decreasing environmental impacts during food production (Johansson et al. 2009). Also Kuhl & Zhou (2010) describe LCA with DES applied to logistics developments.

3 Case Study

The case study verified a joint application of LCA with DES to support the decision making to purchase manufacturing facilities, considering costs and greenhouse gas emissions. For this purpose was analyzed a sequencing process layout involving automotive door panels. From data input process, computational models were developed and different scenarios proposed were simulated.

The simulation results have shown the number of forklifts and operators needed to meet production requirements and also the covered distances by forklifts. At the end of the case study was possible to determine the best layout and the forklifts type being used.

3.1 System Description

The model is a supermarket product with 504 m2 area. The products are automotive door panels, sequenced by the operators according to the customer's orders, and transported by forklift trucks until the dispatch sector.

Computational models have been developed for the manufacturing system. It has four sequencing cells. Each cell has twelve containers overlapping with panels out of sequence from the assembly line, arranged in six sequenced pairs, and two containers with already sequenced panels, also overlapping.

| | Cells amount | Operators amount | Forklifts amount |
|-------------|--------------|------------------|------------------|
| Scenario 5 | 4 | 8 | 1 |
| Scenario 6 | 4 | 8 | 2 |
| Scenario 7 | 4 | 4 | 1 |
| Scenario 8 | 4 | 4 | 2 |
| Scenario 9 | 2 | 4 | 1 |
| Scenario 10 | 2 | 4 | 2 |
| Scenario 11 | 2 | 2 | 1 |
| Scenario 12 | 2 | 2 | 2 |

Table 1: Simulated Settings

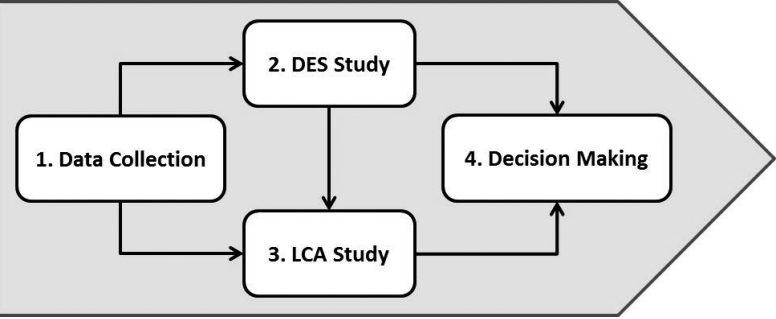


Figure 2: Experimental Planning

Figure 1 illustrates the computational model, with two operators per cell and two forklifts. For the production behavior analysis were simulated different settings, ranging from the number of operators, forklifts and cells, according to table 1. For computational modeling and simulation it was used the software Plant Simulation by Siemens.

3.2 Experimental Planning

The case study was implemented, according to the four stages presented in Figure 2: Data collection; DES study; LCA study and

decision making. The process data were acquired in step 1. From these data, computational models were developed in step 2. In parallel with results supplied by the simulation analyses was conducted in step 3 a Life Cycle Assessment to verify the use of forklifts with different energy sources. The results from these two methods supported the decision making for the acquisition of forklifts.

3.2.1 Data Collection

The data collection corresponds to the entire process of data input modeling and computational model formulation.

Most systems have some random phenomenon that governs. For these cases, input data modeling consists in defining probabilistic models. In a production system with machines and operators, an important random phenomenon is related to the handling time of operators and transporters. For cases where there is no way to collect data, either consult databases, deterministic data are used (Banks et al., 2001).

The case study presented corresponds to the layout designs phase. Thereby were considered deterministic data for material handling acquisition, for movements by operators and forklifts and for loading and un-loading by forklifts. Data for the life-cycle emissions analyzes were taken from Technical Report the JLCA and Energetics Incorporated of the United States.

3.2.2 DES Study

A simulation study begins with the definition of its goals. For this case study, the settings goals were verify: the production resources work rates; the production resources amount needed for the production of 380 containers sequenced per day; the distances travelled by forklifts. Later, conceptual models were constructed. A conceptual model was created with data collected from the production system, such as layouts, production flows, sequence diagrams, amount of machine and operators, speeds from machines and operators, shifts calendars and paths. The model only contained resources used for producing its components. Other production resources were not included.

The verification of the DES model was made continuously by studies of critical processes in the actual production and comparing them with processes in the model. Production data such as lead times from the model were compared with real times from the production for validation purposes.

The simulation results are presented in table 2, in accordance with the pre-established objectives. This table presents the results to the best observed scenarios for a period of one month and contains a comparative analysis of costs, according to the premise of production of 380 containers per month. In this first moment, the highest scoring regarding productivity and cost was obtained by scenario 7, with four sequencing cells, four operators (1 per cell) and one forklift performing the transport of containers. The distance travelled values are also data input for LCA analysis.

3.2.3 LCA Study

Figure 3 presents the results of a LCA study where the Global-warming potential (GWP) is observing in the comparison between electric and diesel forklifts.

| Scenarios | | Operators Amount | Forklifts | | Containers (Qty) | Cost (x\$) | Score |
|-----------|-----|------------------|-----------|-----------------------|------------------|------------|-------|
| | | | Amount | Covered Distance [km] | | | |
| 4 Cells | S5 | 8 | 1 | 2210 | 610 | 77400 | 68,3 |
| | S6 | 8 | 2 | 1376 | 1150 | 104400 | 95,3 |
| | S7 | 4 | 1 | 2031 | 603 | 52200 | 100 |
| | S8 | 4 | 2 | 1185 | 783 | 79200 | 85,6 |
| 2 Cells | S9 | 4 | 1 | 2138 | 571 | 52200 | 94,8 |
| | S10 | 4 | 2 | 1087 | 682 | 79200 | 74,6 |

Table 2: Simulation results

The usage phase of forklifts highlighted in the Figure 3 is of greatest environmental impact factors within its life cycle. This high rate is directly related to the fuel consumption. In this way, the main factor to materially influence the choice of layout in forklift used must be the type of fuel used.

In Figure 4 there is a comparison of five types of fuels used by forklifts, listing their environmental impacts due GWP. This is displayed in metric tons CO2 equivalent per unit per year: Electricity, LPG (Liquefied Propane Gas), CNG (Compressed Natural Gas), Diesel and Gasoline. When these fuels are compared with the LPG, it appears that the Electricity has the lowest impact (-18%). On the other hand the Gasoline has the most impact, (+24%). The difference between CNG and Diesel is very small, being +1.4% and +2.8% respectively. It should also be noted that Diesel has a particulate matter (PM) issue that, when suspended in air, is harmful to human health. This makes the use of this fuel in forklifts working indoors or with low ventilation unfeasible.

3.2.4 Decision Making

In this step was considered the simulation results, presented in table 3, and analysis of fuel use in forklifts, discussed in figures 3 and 4. It is noted that the Scenario 7 has shown the lowest monthly cost, with the best relation cost/productivity among the scenarios evaluated. In addition, your daily productivity can be increased by up to180 containers/day (29%) with the addition of an extra forklift (moves to the scenario 8). This option provides flexibility in the case of an increase in demand. Due to these factors, the scenario 7 is recommended as the best alternative. The Scenario 7 also has shown the lowest travelled distance by forklift (2.031 km/month) which will result in lower fuel consumption and, consequently, into a smaller environmental impact.

For decision-making related to the fuel be used in forklifts noted that the electricity would be the best choice, followed by the LPG and CNG.

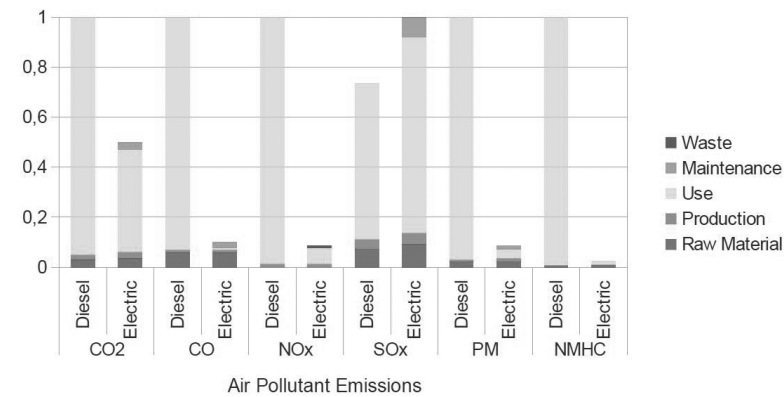


Figure 3: Analysis of GWP to forklifts, electric and diesel (Suzuki 2006)

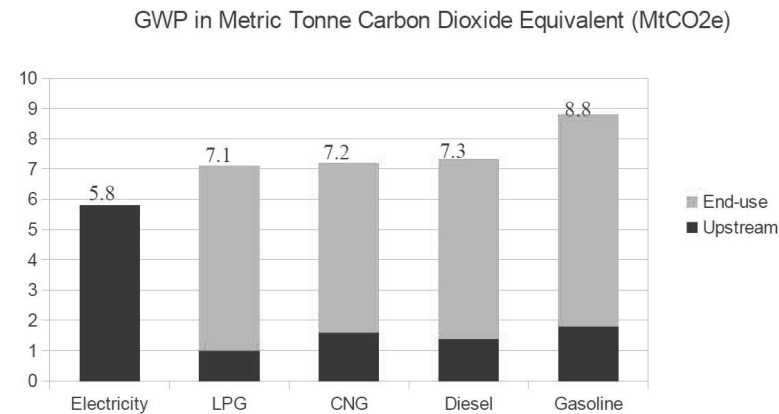


Figure 4: Comparison of fuels used by forklifts (Antes et al. 2007)

4 Conclusions and Prospects

The combined use of DES and LCA presents as a dynamic evaluation process to analyze production resource in manufacturing systems. In the case study presented in this paper, simulation output data, as distance travelled, could be compared with LCA studies of forklift fuels and to support the decision making to choose the type of forklift, according to sustainable premises. The best scenario related to the cost has also shown the smaller environmental impact. Thus it was not necessary to use results from LCA studies as input data in others computational models.

Further work in this area will be made so that the relationship between these two analysis methods to be exploited in work with greater interaction in the relation cost/environmental impact. In these cases, the output data from LCA will be input data for DES.

References

- Standridge, C.R.; Marvel, J.H. 2006: Why Lean Needs Simulation. In: Winter Simulation Conference, Piscataway, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1907–1913.
- Johansson, B., Fasth, A., Stahre, J., Heilala, J., Leong, S., Lee, Y. T., Riddick, F. 2010: Enabling Flexible Manufacturing Systems by Using Level of Automation as Design Parameter. Winter Simulation Conference.
- Kuhl, M.E., and X. Zhou. 2009: Sustainability Toolkit for Simulation-based Logistics Decisions. Winter Simulation Conference.
- Joschko, P., Page, B., Volker, W. 2009: Combination of Job Oriented Simulation with Ecological Material Flow Analysis as Integrated Analysis Tool For Business Production Processes. Winter Simulation Conference.
- Helu, M.; Rühl, J.; Donfeld, D.; Evaluating Trade-Offs Between Sustainability, Performance, and Cost of Green Machining Technologies. Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.
- Solding, P., Petku, D. 2005: Applying Energy Aspects on Simulation of Energy-Intensive Production Systems. Winter Simulation Conference.
- Solding, P., Thollander, P. 2006: Increased Energy Efficiency in a Swedish Iron Foundry Through Use of Discrete Event Simulation.

SUZUKI, N. 2006: LCA Activities of Toyota Industries Corporation: Case Study. JLCA News Letter nov. n.2.

Antes, M. 2007: Propane's Greenhouse Gas Emissions: A Comparative Analysis http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/submittals/other/climatechangestudy_final.pdf. (Technical Report). Energetics Incorporated

Gaines, L.L., Elgowainy, A., Wang M.Q. 2008: Full Fuel-Cycle Comparison of Forklift Propulsion Systems. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/537.pdf> (Technical Report). Argonne National Laboratory

Kontakt

M. SC. Victor Emmanuel Gomes
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
<http://imk.uni-magdeburg.de/>

M. SC. Durval João de Barba Junior
Instituto Federal Sul Riograndense, Campus Sapucaia do Sul
93216-120 Sapucaia do Sul – RS – Brazil
www.sapucaia.ifsul.edu.br/

Prof. Dr. Eng. Jefferson de Oliveira Gomes
Aeronautical Institute of Technology
Competence Center for Manufacturing
12.228-900 São José dos Campos – SP – Brazil
www.ccm-ita.org.br

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote,
Chair OvG-University Magdeburg,
Mechanical Engineering Dept.
Institut fuer Maschinenkonstruktion / Konstruktionstechnik
Universitaetsplatz 2
39106 Magdeburg
<http://imk.uni-magdeburg.de/>

Thomas Hohnen, Ino Schliefer,
Claudia Gneist & Jörg Feldhusen

Methode zur kennwertgestützten Modularisierung – Retrospektive Untersuchung der Produktmodularität

1 Einleitung

Die Produktmodularität beeinflusst den finanziellen Erfolg eines Unternehmens (Eitelwein & Weber 2008). Das wirtschaftliche Einsparpotenzial der Produktmodularisierung wird dabei im Wesentlichen durch die Wiederverwendung von Produktkomponenten und der damit verbundenen Skalen- und Lernkurveneffekte erzielt (Göpfert 1998, Schölling 1997, Kersten & Koppenhagen 2002).

Modularität ist von firmenspezifischen Faktoren abhängig (Hohnen 2010). Die Kenntnis dieser Faktoren und deren quantitative Ausprägung sind Voraussetzung für eine Determinierung der Produktmodularität hinsichtlich eines Kostenoptimums. Da diese Einflüsse nicht nur firmenspezifisch sind, sondern insbesondere von Produktparte zu Produktparte variieren (siehe Eitelwein & Weber 2008), ist es zweckmäßig, die jeweilige Modularität zu ermitteln und diese in Form einer Anforderung als Eingangsgröße an die Produktentwicklung weiter zu geben. Daraus leitet sich die Notwendigkeit einer Vorgehensweise ab, die es ermöglicht, die Modularität eines Produktes analysieren zu können und eine eindeutig quantifizierbare Aussage über die Modularität auszugeben.

Die Modularität ist eine graduelle Eigenschaft der Produktarchitektur (Baumgart 2005, Pahl et al. 2007) und beschreibt, ob ein Produkt integral (niedrigste Modularität) oder modular (höchste Modularität) aufgebaut ist. Unter der Produktarchitektur wiederum wird das Beziehungsschema zwischen Funktionsstruktur eines Produktes und seiner physischen Struktur verstanden (Baumgart 2005, Pahl et al. 2007). Für die Quantifizierung der Modularität stehen daher der Zusammenhang aller Komponenten zueinander – der Begriff Komponenten steht stellvertretend für einzelne Bauteile oder auch Baugruppen – und der Vernetzung der Funktionen zu den Komponenten im Mittelpunkt. Beispielhaft sind dazu in Abbildung 1 diese Verknüpfungen dargestellt.

Während links jeweils ideal-integrale Strukturen abgebildet sind, steigt die Modularität nach rechts bis ganz rechts die ideal-modularen Strukturen abgebildet sind. Diese Beziehungsschemata stehen im Fokus einer Vorgehensweise zur Analyse der Produktmodularität. Diese Vorgehensweise wird in Kapitel 2 hergeleitet. Im dritten Kapitel dieses Beitrags werden die eingesetzten Kennwerte vorgestellt. Anhand einer retrospektiven Untersuchung von zwei Beispielprodukten in Kapitel 4 werden die Vorgehensweise und die beiden Kennwerte validiert.

2 Prozess zur Produktentwicklung modularer Produkte

Nach Eitelwein besitzen 93 % aller Produkte mindestens ein Vorgängermodell, so dass Erfahrungen mit den Produkten und den verwandten Technologien vorliegen (Eitelwein & Weber 2008). Daher werden Neukonstruktionen in dem zu entwickelnden Prozess ausgeschlossen. Die Basis für den zu entwickelnden Prozess zur Modularisierung stellt das von Pahl et al. (2007) vorgestellte Grundschema des allgemeinen Lösungsprozesses dar, siehe Abbildung 2 linker Prozess.

Nach diesem Schema durchläuft jeder Lösungsprozess die sechs Bausteine Konfrontation, Information, Definition, Kreation, Beurteilung und Entscheidung (Pahl et al. 2007). Daher ist eine Anforderung

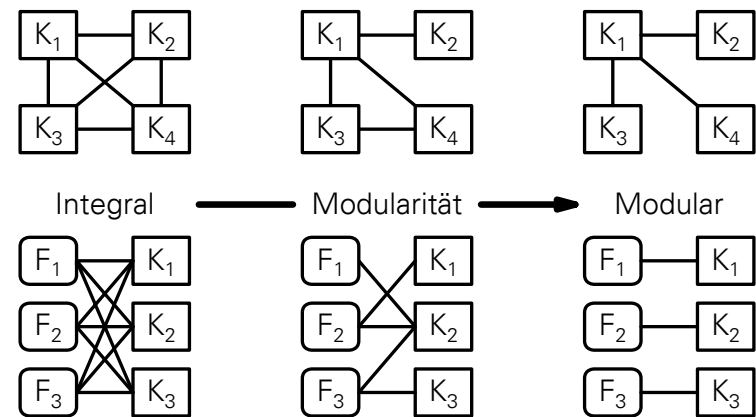


Abbildung 1: schematische Darstellung von Beziehungsschemata von Komponenten (K) untereinander (vgl. Hölttä-Otto 2007) und von Funktionen (F) zu den physischen Komponenten

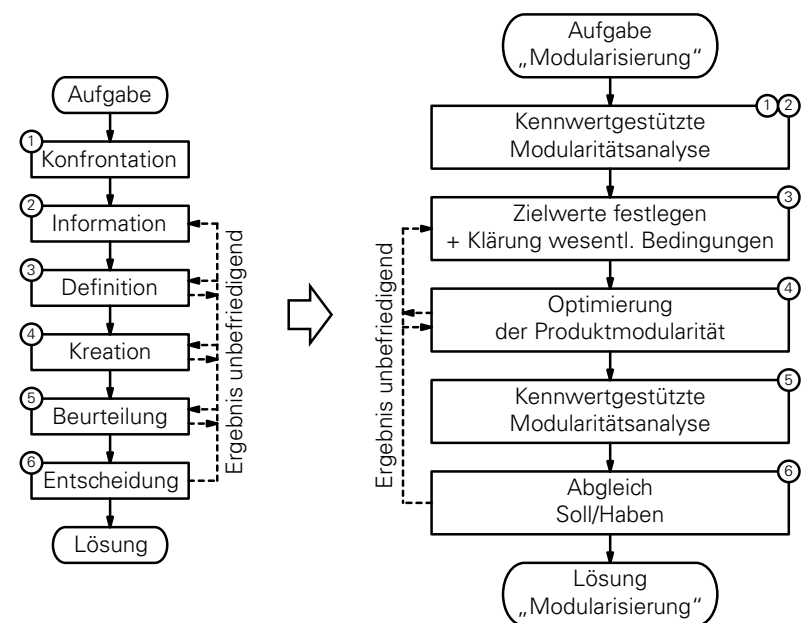


Abbildung 2: Adaption des Prozesses zur Modularisierung auf Basis des allgemeinen Lösungsprozesses

rung an den zu entwickelnden Prozess, dass jeder dieser Bausteine des allgemeinen Lösungsprozesses darin enthalten sein müssen.

Der rechte Prozess von Abbildung 2 zeigt den daraus adaptierten Prozess zur Produktmodularisierung. Die Aufgabenstellung für den Prozess ist das Bestreben, das Produkt kostenoptimiert zu modularisieren, wobei nicht notwendigerweise modularere Strukturen kostengünstiger als integralere Strukturen sein müssen (siehe Hohnen 2010). Im ersten Schritt des adaptierten Prozesses findet eine kennwertgestützte Modularitätsanalyse des Vorgängerproduktes statt. In der Konfrontationsphase werden mittels Kennwerten die bestehenden Strukturen berechnet, um die Modularität des Gesamtproduktes aber auch einzelner Baugruppen zu quantifizieren. In der Informationsphase findet eine Analyse der erhaltenen Kennwerte und Strukturen statt. Ziel hierbei ist die Modularität des bestehenden Produktes zu analysieren. Ob eine hohe oder niedrige Modularität die Zielgröße der Modularisierung darstellt, wird im zweiten Prozessschritt definiert. In dieser Definitionsphase werden die Zielwerte festgelegt. Hierbei besteht die Möglichkeit, dass diese Zielwerte vom Produktmanagement vorgegeben werden. Die Voraussetzung hierfür ist das Wissen, welche Wirkung eine steigende oder sinkende Produktmodularität auf die Herstellkosten aufweist. Dieser Zusammenhang von Produktmodularität und Produktkosten wird in diesem Beitrag nicht behandelt. Neben den Zielwerten werden in dieser Phase offene oder wichtige Randbedingungen für den Modularisierungsprozess definiert. Im dritten Schritt des adaptierten Prozesses findet die Optimierung der Produktmodularität statt. Beispielhaft für die Kurationsphase seien die Modularisierungsmethoden von Baumgart (2005), Göpfert (1998) und Erixon (1998) genannt. Um beurteilen zu können, ob die Zielwerte aus Prozessschritt 2 erreicht worden sind, muss in der Beurteilungsphase erneut eine kennwertgestützte Modularitätsanalyse des optimierten Produktes durchgeführt werden. Die Detaillierungstiefe hierbei muss der Konfrontationsphase (Prozessschritt eins) entsprechen, um eine Vergleichbarkeit zum Vorgängerprodukt zu gewährleisten. Im letzten Prozessschritt, der Entscheidungsphase, findet ein Abgleich der Ergebnisse mit den in Schritt 2 definierten Zielwerten statt. Sofern die Ziele nicht erreicht werden, muss ein iterativer Rücksprung im

Modularisierungsprozess vorgesehen werden. In einem solchen Fall muss entweder die Produktmodularität weiter optimiert werden oder die Zielwerte und deren Erreichbarkeit müssen hinterfragt und ggf. geändert werden.

Ein oben angesprochener, wichtiger Aspekt stellt die Detaillierungstiefe der kennwertgestützten Modularitätsanalyse dar. Abbildung 3 zeigt das iterative Vorgehen der Modularitätsanalyse inklusive einer Darstellung, welche Kennwerte zu welchem Zeitpunkt der Analyse berechnet werden können.

Zu Beginn der Analyse wird die erste Ebene der Produktstruktur betrachtet. Dazu werden die Komponenten dieser Ebene aufgelistet. Im zweiten Schritt werden die Funktionen jeder Komponente

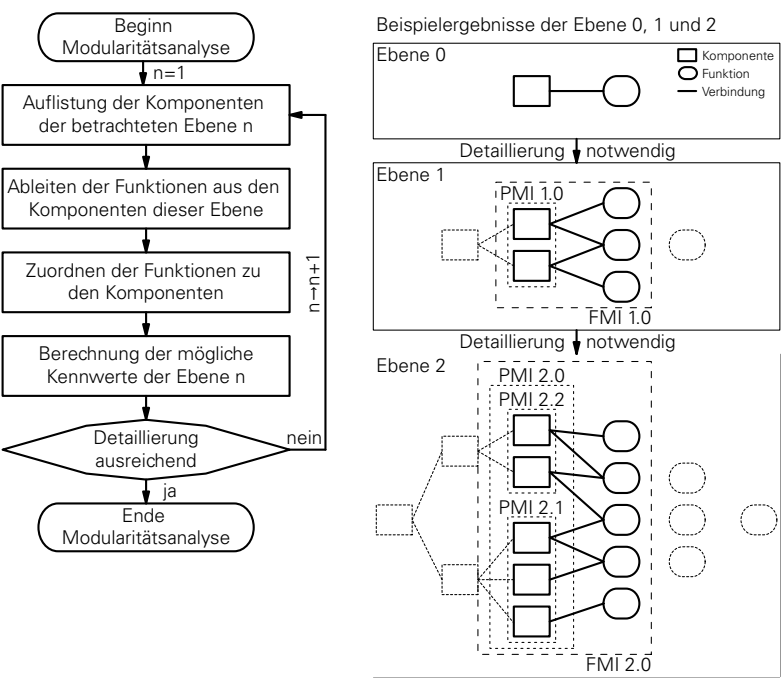


Abbildung 3: Vorgehen zur Detaillierung der kennwertgestützten Modularitätsanalyse inkl. Beispielsergebnisse

identifiziert und aufgelistet. Danach werden im dritten Schritt die Funktionen und Komponenten einander zugeordnet, das heißt, wenn eine Komponente an der Ausführung der Funktion beteiligt ist, werden diese miteinander verbunden. Während im zweiten Schritt Funktionen doppelt vorkommen können, ist im dritten Schritt jede identifizierte Funktion nur einmal vorhanden. Im nächsten Schritt werden die möglichen Kennwerte berechnet. Die hier dargestellten Kennwerte physischer Modularitätsindex (PMI) und funktionaler Modularitätsindex (FMI) werden in Kapitel 3 vorgestellt. Die Anzahl der berechenbaren Kennwerte hängt einerseits von der Detaillierungsebene, andererseits von der Produktstruktur des eigentlichen Produktes ab. Exemplarisch sei hier auf die Beispielergebnisse in Abbildung 3 verwiesen. Während auf Ebene 1 nur die physische Modularität aller Komponenten analysiert werden kann (siehe PMI 1.0), besteht auf Ebene 2 neben der Modularitätsanalyse aller Komponenten (siehe PMI 2.0) zusätzlich die Möglichkeit den physischen Zusammenhang der einzelnen Baugruppen zu analysieren (siehe PMI 2.1 und PMI 2.2).

Nach der Berechnung der Kennwerte muss geklärt werden, ob die Detaillierungstiefe ausreicht. Wesentlicher Einschränkungsfaktor wird die Handhabbarkeit der einzelnen Ebenen sein, da der Aufwand zur Bestimmung der Kennwerte exponential steigt. Tiefste aus Sicht der Autoren sinnvolle Detaillierung ist die Aufsplittung von Bauteilen in Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen.

3 Vorstellung der genutzten Kennwerte

Nachdem in Abschnitt 2 der Prozess zur Modularisierung auf Basis einer kennwertgestützten Modularitätsanalyse vorgestellt wurde, soll in diesem Abschnitt die Berechnungsmethode der von Hohnen (2012) hergeleiteten Kennwerte physischer und funktionaler Modularitätsindex (PMI und FMI) vorgestellt werden.

Abbildung 4 zeigt das Vorgehen zur Kalkulation der beiden Kennwerte. Die Produktarchitektur (Schritt 1) stellt die Basis für die Berechnung der Kennwerte dar. Ausgehend von dieser werden in Schritt 2 zwei Strukturen abgeleitet. Bei der ersten Struktur werden in

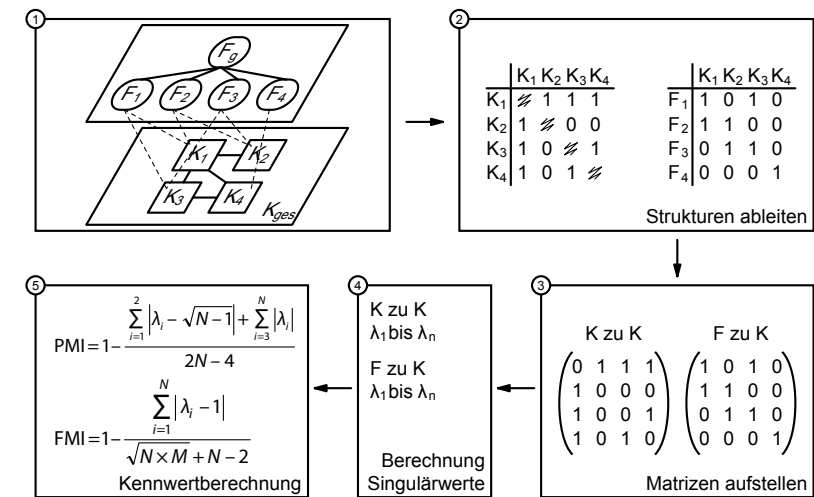


Abbildung 4: Berechnungsmethode der Kennwerte physischer Modularitätsindex (PMI) und funktionaler Modularitätsindex (FMI)

Form einer Matrix die physischen Zusammenhänge der Komponenten (K) analysiert. Sofern die Komponenten einer Zeile mit der Komponente aus der Spalte eine Schnittstelle aufweisen, wird in die Zelle eine 1 eingetragen. Liegt keine Schnittstelle vor, erhält die Zelle den Wert 0. Da eine Komponente mit sich selbst keine Schnittstelle aufweisen kann, erhält die Diagonale keinen Wert. Analog zum Zusammenhang der Komponenten untereinander wird in der zweiten Struktur der Zusammenhang von Komponenten zu Funktionen (F) aufgestellt. Sofern eine Komponente an der Erfüllung einer Funktion beteiligt ist, wird in die entsprechende Tabelle eine 1 eingetragen, wenn keine Verbindung vorliegt eine 0. Ausgehend von diesen Strukturen werden im dritten Schritt Matrizen aufgestellt. Während die »K zu K«-Matrix notwendigerweise quadratisch ist (Dimension $N \times N$), ist die »F zu K«-Matrix in der Regel nicht quadratisch (Dimension $N \times M$). In Schritt vier wird eine Singulärwertzerlegung (siehe z. B. Liesen 2011) der beiden Matrizen durchgeführt. Abschließend werden die Kennwerte auf Basis der

Singularwerte und der Dimensionen der Matrizen berechnet. Da die Kennwerte auf Basis von Ähnlichkeitsfunktionen (vgl. Stöcker 2009) aufgebaut wurden, liegen die Grenzwerte der Kennwerte zwischen null und eins, wobei ideal-integrale Strukturen dem Wert null und ideal-modulare Strukturen dem Wert eins entsprechen.

4 Retrospektive Untersuchung und Validierung des entwickelten Prozesses

Zur Validierung des oben vorgestellten Prozesses wurde eine retrospektive Untersuchung durchgeführt. Im Rahmen dieser Validierung wurden mehrere Produktgenerationen zweier Beispielprodukte mit Hilfe der kennwertgestützten Modularitätsanalyse verglichen.

Als Beispielprodukte wurden Rasenmäher- und Waschmaschinenmodelle je einer Firma ausgewählt. Beiden Produkten gemeinsam ist, dass diese Konsumgüter darstellen und auf einem Käufermarkt angeboten werden. Daher kann von einer Marktsituation ausgegangen werden, die zu einem Kostendruck führt, welche die firmenspezifische Optimierung der Produkte und der Produktmodularität bedingt. Angenommen wird daher, dass die über die Produktgenerationen durchgeführten Entwicklungsschritte zu einer Kostenoptimierung aus Sicht der produzierenden Firma geführt haben.

Eine weitere für diese Untersuchung wichtige Gemeinsamkeit der Produkte ist, dass die Hauptfunktionen über die betrachteten Produktgenerationen hinweg keine nennenswerten Änderungen erfahren haben. Im Speziellen sind die Hauptfunktionen der Produkthardware unverändert geblieben. Somit können maßgebliche Änderungen der Produktarchitektur und der damit verbundene Einfluss auf die Kennwerte der Daten ausgeschlossen werden.

Aufgrund der oben genannten Punkte gehen die Autoren davon aus, dass die Montageoptimierung, die Steigerung der Integralbauweise und die strategische Wiederverwendung bestehender Kernkomponenten (Gleichteil-/Wiederholteilstrategie) im Fokus der firmenspezifischen Kostenoptimierung stehen.

Um die Montage der Produkte zu optimieren, wird angenommen, dass die Anzahl der physischen Zusammenhänge der Komponenten untereinander sinkt und gleichzeitig die Komplexität der Komponentenvernetzung reduziert wird. Somit sollte der Kennwert PMI größer werden. Eine vereinfachte Montage kann zusätzlich zu einer Trennung von Funktionsträgern führen. Diese Abweichung vom ideal-modularen Zustand (jede Komponenten ist eineindeutig einer Funktion zugeordnet, siehe Ulrich 1995) sollte zu einem Sinken des Kennwerts FMI führen.

Um die Anzahl der Bauteile zu reduzieren, wird eine Integralbauweise angestrebt. Eine technische Möglichkeit hierbei stellt der Einsatz alternativer Fertigungsverfahren (z. B. Kunststoffspritzgussverfahren) dar, wobei jedem Bauteil mehr Wirkflächen und somit Funktionen zugeordnet werden. Da einzelne Bauteile mehrere Funktionen übernehmen, sollte der Kennwert FMI sinken. Eine Bauteilreduzierung hat direkt keinen Einfluss auf die Verflechtung der Bauteile. Somit wird davon ausgegangen, dass der Kennwert PMI nicht durch die Bauteilreduktion beeinflusst wird bzw. der Effekt aus der Montagevereinfachung tendenziell verstärkt wird. Die Wiederverwendung firmenspezifischer Kernkomponenten führt wie oben schon erwähnt zu Skalen- und Lernkurveneffekten und reduziert so die Kosten für die produzierende Firma. Die Steigerung der Wiederverwendbarkeit führt zu einer funktionalen und physischen Abkapselung der Kernkomponenten von Bestandteilen, die nicht wiederverwendet werden können oder strategisch nicht wiederverwendet werden sollen. Diese Abkapselung führt zu einer Entflechtung der Produktarchitektur. Somit sollte der Kennwert FMI größer werden. Die physische Abkapselung der Kernkomponenten beeinflusst den Kennwert PMI nur indirekt. Abhängig davon, ob die Strukturen der physischen Bauweise integraler oder modularer werden, ändert sich der Kennwert.

Zusammenfassend zeigt Tabelle 1 die erwarteten Auswirkungen der kostenoptimierenden Maßnahmen auf die Kennwertverläufe, siehe Tabelle 1. Die Autoren erwarten, dass die PMI-Kennwerte über die Produktgenerationen hinweg ansteigen werden und dass die FMI-Kennwerte annähernd unverändert bleiben. Eine eindeutige Prognose zum FMI-Kennwertverlauf kann nicht getroffen werden, da

verschiedene Maßnahmen sowohl zum Anstieg als auch zum Abfall des Kennwertes führen können und noch nicht geklärt ist, wie stark unterschiedliche Maßnahmen die Kennwerte beeinflussen.

Nachdem die Hypothesen der Kennwertverläufe aufgestellt wurden, wurden die ausgewählten Produktgenerationen mittels der kennwertbasierten Modularitätsanalyse (siehe Abbildung 4) untersucht. Um einen vergleichbaren Detaillierungsgrad zu haben, wurden die Produkte auf Bauteilebene heruntergebrochen. Zur Vereinfachung wurde beim physischen Modularitätsindex eine Analyse der einzelnen Baugruppen vernachlässigt und nur die physischen Zusammenhänge aller Komponenten analysiert.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der berechneten FMI- und PMI-Kennwerte der ausgewählten Beispielprodukte.

| | FMI | PMI |
|--|---------|----------|
| Montageoptimierung | (sinkt) | steigt |
| Steigerung der Integralbauweise | sinkt | konstant |
| Wiederverwendung bestehender Komponenten | steigt | konstant |

Tabelle 1: Angenommene Änderungen der Kennwerte FMI und PMI

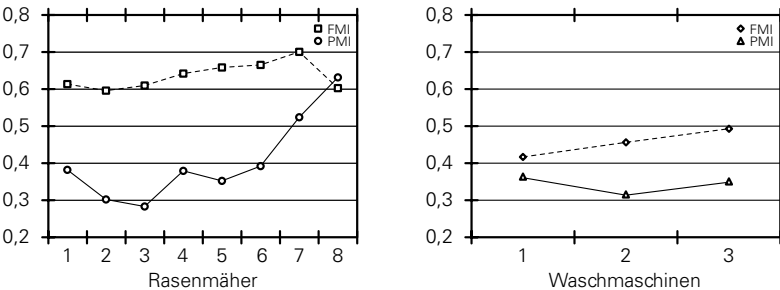


Abbildung 5: Entwicklung der berechnete PMI- und FMI-Kennwerte der ausgewählten Beispielproduktgenerationen

Um den Verlauf der Entwicklungsschritte grafisch hervorzuheben, wurden die berechneten Werte mit einer Linie verbunden. Die mit 1 gekennzeichnete Produktgeneration ist jeweils die älteste Produktgeneration. Mit aufsteigender Bezifferung sind die Produkte später entwickelt worden.

Im linken Diagramm, das die Kennwertverläufe der Produktgenerationen des Rasenmäherbeispiels darstellt, wird deutlich, dass die vorher getroffenen Annahmen durch den Kennwert abgebildet werden. Der physische Modularitätsindex (PMI) steigt von minimal 0,28 bei der dritten Produktgeneration bis maximal 0,63 bei der achten Produktgeneration an. Dies ist einerseits mit einer deutlichen Reduktion der Komponenten von maximal 147 auf 56 Bauteile zu erklären, andererseits sinkt die relative Anzahl möglicher physischer Zusammenhänge von ca. 5 % auf ca. 2 %. Der funktionale Modularitätsindex (FMI) schwankt zwischen den Werten 0,59 und 0,69. Bis zur siebten Produktgeneration liegt ein langsamer Anstieg des Kennwertes vor. Anhand der den Autoren vorliegenden Produktausgangsdaten kann dies durch eine Modularisierung einzelner Baugruppen bzw. Bauteile erklärt werden. Die gleichzeitige Reduktion der Komponenten schwächt den Anstieg des Kennwerts ab und führt im letzten Entwicklungsschritt zu einem Abfall des Kennwerts. In diesem Entwicklungsschritt sinkt die Anzahl der verbauten Komponenten um ca. 33 % von 84 Bauteilen auf 56 Bauteile und reduziert sich damit im Verhältnis stärker als bei vorherigen Entwicklungsschritten.

Das rechte Diagramm, welches die Kennwertverläufe der Produktgenerationen des Waschmaschinenbeispiels darstellt, unterstützt die vorher getroffenen Annahmen nur teilweise. Der FMI-Kennwert steigt von 0,42 auf 0,49. Dieser Anstieg ist im Wesentlichen durch die Entflechtung der Produktarchitektur zu erklären. Bei Produktgeneration 1 sind ca. 11,6 % aller möglichen Verbindungen von Funktionen zu Komponenten vorhanden. Bei Produktgeneration 3 sind dies nur noch ca. 8,2 %. Die Reduktion der Bauteile von 296 auf 259 fällt weniger ins Gewicht. Der PMI-Kennwert schwankt zwischen 0,25 und 0,29 und verläuft tendenziell konstant. Anhand der Produktausgangsdaten, welche den Autoren vorliegen, ist ersichtlich, dass die

physische Baustruktur entgegen der oben getroffenen Hypothesen annähern unverändert bleibt. Somit bildet der PMI-Kennwert wiederum den Sachverhalt richtig ab.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages wurde ein Prozess zur Modularisierung von Produkten vorgestellt. Der Fokus des Beitrages lag dabei in einer kennwertgestützten Modularitätsanalyse der Produktmodularität, die Bestandteil des Modularisierungsprozesses ist. Mit Hilfe der Kennwerte physischer und funktionaler Modularitätsindex (PMI und FMI) wird in diesem Prozess die Produktmodularität qualitativ beschrieben, indem die physische Baustruktur und die Produktarchitektur – der Zusammenhang von Funktionen und Komponenten – der Produkte qualitativ beschrieben wurden.

Die qualitative Determinierung der Produktmodularität ist notwendig, um langfristig, kostenoptimierte Produkte entwickeln zu können. Daher wurde eine retrospektive Untersuchung validiert, inwieweit der vorgestellte Modularisierungsprozess und die vorgestellte kennwertgestützte Modularitätsanalyse die Produktentwicklung unterstützen können. Hierzu wurden reale Daten von mehreren Produktgenerationen zweier Beispielprodukte nachträglich mit Hilfe der kennwertgestützten Modularitätsanalyse untersucht. Als Beispielprodukte wurden Produkte ausgewählt, die bedingt durch die Konkurrenzsituation und den belieferten Markt unter einem Kostendruck stehen.

Die Validierung hat ergeben, dass die kennwertgestützte Modularitätsanalyse die Entwicklung der Produktmodularität richtig abbildet. Vorher aufgestellte Annahmen über die Entwicklung der Produktmodularität der Beispielprodukte und die Entwicklungstendenzen der Kennwerte nach Produktüberarbeitung konnten mit Hilfe der Kennwerte mit Einschränkung bestätigt werden. Bei den Fällen, in denen der Kennwert den aufgestellten Annahmen über die Entwicklungstendenz widersprach, konnte in einer nachträglichen Betrachtung der realen Daten festgestellt werden, dass die Annahmen für das betroffene Beispielprodukt nicht zutrafen. Dies zeigt die Qualität der Kennwerte.

Obwohl mit den Kennwerten die Produktmodularität qualitativ determiniert werden kann, wurde im Rahmen dieses Beitrages nicht geklärt, ob im Rahmen einer Produktentwicklung eine höhere oder niedrigere Qualität kostengünstiger ist. Dies soll im Rahmen von weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

- Baumgart, I. 2005: Modularisierung von Produkten im Anlagenbau. Aachen: Mainz
- Eitelwein, O. & Weber, J. 2008: Unternehmenserfolg durch Modularisierung von Produkten, Prozessen und Supply Chains, Benchmarking-Studie Modularisierung. Norderstedt
- Erixon, G. 1998: Modular Function Deployment, A Method for product modularisation. Stockholm
- Göpfert, J. 1998: Modulare Produktentwicklung, Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Wiesbaden
- Hölttä-Otto, K. & de Weck, O. 2007: Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. In: Concurrent Engineering, 15 (2), 113–126
- Hohnen, T. 2010: Ein Ansatz zur kostenoptimalen Modularisierung. In: Feldhusen, J. (Hrsg.): Aachener Konstruktionstechnik – Mitteilungen. Aachen: Shaker
- Hohnen, T. 2012 (in Druck): Entwicklung zweier Kennwerte zur Quantifizierung der Modularität. In: Feldhusen, J. (Hrsg.): Aachener Konstruktionstechnik – Mitteilungen. Aachen: Shaker
- Kersten, W. & Koppenhagen, F. 2002: Systematische Ableitung modularer Produktarchitektur, Komplexitätsreduzierung in der Konzeptphase. In: PPS Management 7 (1), 9–13
- Liesen, J., Mehrmann, V. 2011: Lineare Algebra, Ein Lehrbuch über die Theorie mit Blick auf die Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. 2007: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. Berlin: Springer
- Schölling, W. 1997: Kundenorientierte Produktinnovation und Produktstandardisierung. In: ZWF 92 (11), 561–565.
- Stöcker, P. 2009: Eine Methode zur rechnergestützten Ähnlichkeitssuche für Baukastenprodukte. Aachen: Shaker
- Ulrich, K. 1995: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy 24 (3), 419–440

Kontakt

Dipl.-Ing. Thomas Hohnen
Dipl.-Ing. Ino Schiefer
Dipl.-Wirt.-Ing. Claudia Gneist
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen
RWTH Aachen University
Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstraße 54B
52074 Aachen
www.ikt.rwth-aachen.de

Nikoletta Szélig, Sándor Vajna & Michael Schabacker

Modellierungsmethoden für die Prozessplanung

Einführung

Die aktuelle Situation in der Produktentwicklung ist durch zunehmend dynamische und komplexe Aufgabenstellungen gekennzeichnet. Die Entwicklung eines Produktes ist kein linearer Prozess, der kontinuierlich über klar definierte Schritte zum Ziel geführt wird. Nur wenige Produkte werden neu konstruiert, meist handelt es sich dabei aber um Anpassungs-, Änderungs- oder Variantenkonstruktionen (Vajna 1982, Pahl & Beitz 1986). Ein weiterer Aspekt bei der Entwicklung ist, dass die dort verwendeten Prozesse schnell und ohne großen Aufwand in Prozessmanagementwerkzeuge eingebunden werden müssen. Diese Werkzeuge wiederum verwenden verschiedene Modellierungsansätze, wie z.B. die Netzplantechnik, die Design Structure Matrix (DSM) und die Containermodellierung. Gegenstand dieses Beitrages ist es, diese verschiedenen Ansätze zu analysieren und ihre Vor- bzw. Nachteile aufzuzeigen. Dabei hat sich herausgestellt, dass es vorteilhaft ist, eine Kombination der zuvor genannten Methoden zu verwenden. Des Weiteren werden auch die Schnittstellen von BPMN, DSM und Containermodellierung näher beleuchtet.

1 Grundlegende Definitionen

1.1 Definition Prozess

Da es verschiedene Möglichkeiten gibt, einen Prozess zu definieren, werden nachfolgend kurz verschiedene Definitionen aus der Literatur erläutert und der für diesen Beitrag relevante Begriff des Prozesses präsentiert. Eine allgemein übliche Definition eines Prozesses ist die eng zusammenhängende, gegenseitig abhängige Folge von Aktionen. Diese Aktionen wiederum führen zu bestimmten Ergebnissen, und zu ihrer Ausführung sind Ressourcen, Werkzeuge und Methoden notwendig (Miller 1994, Harrington 1991)).

Nach Saatkamp (2002) ist ein Prozess »ein Vorgang, der einen messbaren Input in einen messbaren Output verwandelt; besteht aus Teilprozessen und letztlich Arbeitsschritten, die in einem sach- und zeitlogischen inneren Zusammenhang stehen; ist wertschöpfend, d. h. durch die Arbeitsschritte wird ein Mehrwert für das Unternehmen geschaffen; ist repetitiv, d. h. er wird mit ähnlichen Inputs und ähnlichen Arbeitsschritten in einer bestimmten Wiederholrate durchgeführt; ist zielorientiert, d. h. Zweck des Prozesses ist die Verwirklichung von sachlichen, formalen, sozialen oder ökologischen Zielen.«

In diesem Beitrag wird ein Prozess als eine Folge bestimmter Aktivitäten verstanden, die schrittweise in einer bestimmten Reihenfolge zum Erreichen eines Zieles ausgeführt werden. Ein wichtiger Unterschied zum Projekt ist, dass ein Prozess mehrmals durchlaufen werden kann, Bestandteil eines anderen übergeordneten Prozesses sein kann bzw. andere Teilprozesse enthalten kann (Abbildung 1).

1.2 Definition Modell

Die Einführung von Modellen ist immer dann geboten, wenn es gilt, komplizierte Sachverhalte einfacher darzustellen oder bekanntes und unbekanntes Teilwissen modellhaft zusammenzufügen. Weiterhin entstehen diese bei der schrittweisen Entwicklung von Theorien und Verbesserung von Ergebnissen (Kocsondi 1976). Es gibt zwei Hauptgründe, Prozessmodelle zu verwenden (Staud 2006):

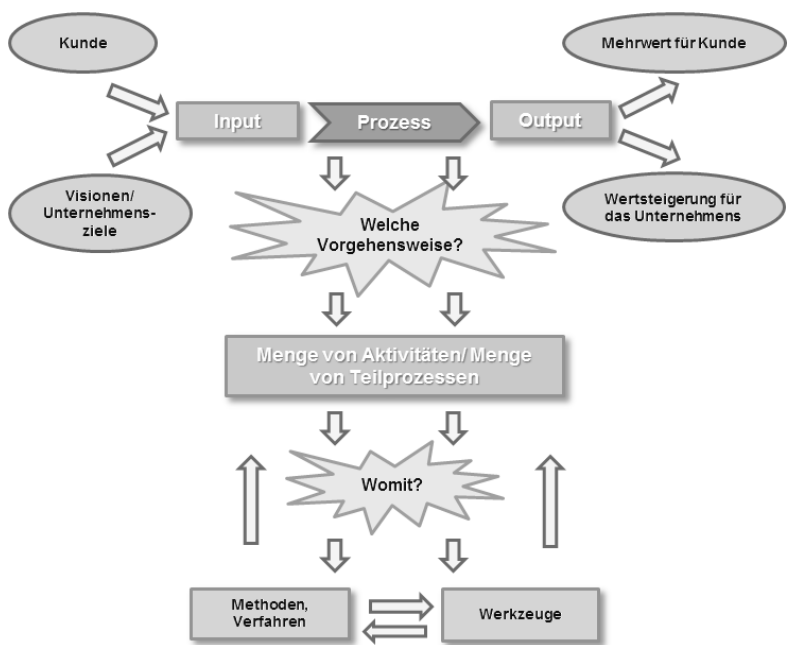


Abbildung 1: Bestandteile eines Prozesses (Schabacker 2001)

- Zunehmende Komplexität der Prozesse in der Produktentwicklung, um eine systematische Ordnung in den Prozessabläufen zu erzielen.
- Erforderliche Softwareunterstützung bei der Modellierung von Prozessen in der Produktentwicklung, die die Realität der Prozessabläufe nahezu widerspiegeln soll.

Das Modell beruht auf der Abstraktion, dass in einer vorgegebenen Zeit nur bestimmte hervorgehobene Eigenschaften des Prozesses berücksichtigt werden, jedoch unwesentlich erachtete Merkmale vernachlässigt werden. Die drei wichtigsten Merkmale des Prozesses sind die Elemente, deren Eigenschaften und die zwischen den beiden auftretenden Beziehungen (Precht & Burkard 2008).

Für das Modell sollen nur Informationen zur Verfügung stehen, die auch für spätere Prozesssimulationen und -optimierungen relevant sind. Dagegen werden die Informationen vernachlässigt, die das Prozessverständnis erschweren oder unmöglich machen. Die Struktur des Modells soll im Gegensatz zum realen Prozess einfacher sein, allerdings müssen die erhobenen Informationen im realen Prozess implementierbar sein.

1.3 Prozessmodell

Ein Prozessmodell ist ein auf der Beschreibung und Modellierung in Form von Prozessen basierendes Vorgehensmodell zur effizienten Bearbeitung von Aufgabenbereichen, die sich aus einer Vielzahl von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Einzeltätigkeiten zusammensetzen (Motyel 2006).

Ein Prozessmodell ist naturgemäß die Basis für das Prozessmanagement. Die Minimalanforderung an ein Prozessmodell besteht darin, dass die einzelnen Prozessschritte (häufig als Prozessfunktionen bezeichnet) in ihrer logischen Reihenfolge beschrieben, mit ihren Abhängigkeiten dargestellt und dazu die Ergebnisse einer Prozessfunktion (»Output«) und die Voraussetzungen für ihre Durchführung (Input) aufgelistet sind. In Verbindung mit der Abgrenzung des Prozessmodells zeigt die Input-/Output-Betrachtung auch die Schnittstellen zu anderen Prozessen und/oder einzelnen Support-Funktionen auf (Freisleben 2001, Bullinger et al. 2009).

2 Angewandte Modellierungsmethoden bei Produktentwicklungsprozessen

Zur Beschreibung der Produktentwicklungsprozesse gibt es mehrere Möglichkeiten der Prozessmodellierung (Abbildung 2). Die verschiedenen Abhängigkeiten und Verbindungen der einzelnen Prozessaktivitäten werden mit Hilfe von Balkendiagrammen und Flussdiagrammen dargestellt. Um zeitliche Vorgänge abzubilden, werden meist Netzpläne verwendet, die ihren Ursprung in der mathematischen Graphentheorie haben. Um die Strukturen der Teilprozesse (z. B. serielle, parallele, iterative Abläufe) besser erkennen zu können, eignet sich am besten die Containerdarstellung.

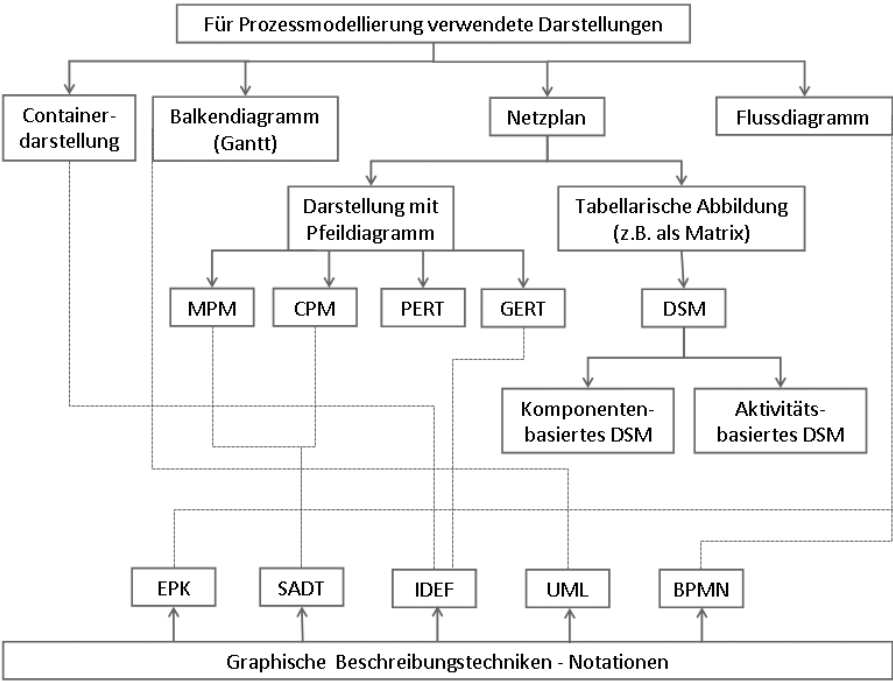


Abbildung 2: Für Prozessmodellierung verwendete Darstellungen und Notationen

2.1 Balkendiagramm

Beim Balkendiagramm (Abbildung 3) handelt es sich um eine grafische Darstellung der Ergebnisse der Ablauf- und Terminplanung eines Projektes oder eines Projektteilbereichs, in der die relevanten Objekte, z.B. Vorgänge oder Aktivitäten, mit horizontal liegenden, zeitlich geordneten Balken gekennzeichnet werden. Deren zeitliche Lage wiederum kann meist intuitiv erschlossen werden oder aber auch aus einem Netzplan abgeleitet werden (Schelle 2005, Motyel 2006)).

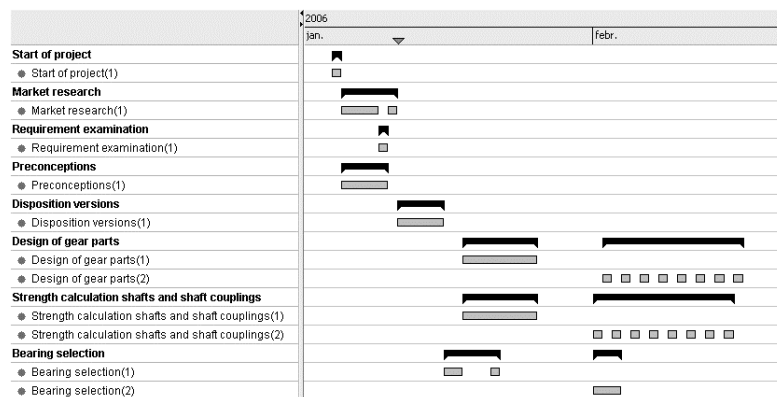


Abbildung 3: Balkendiagramm (Rick 2007)

2.2 Netzplantechnik

Werkzeuge der Netzplantechnik sind Verfahren, die das Planen, Strukturieren, Steuern und Regeln von komplexen Prozessen ermöglichen. Grundsätzlich haben diese ihren Ursprung im Projektmanagement. Weiterhin lassen sich mit Netzplänen Projektablaufe effizient planen und darstellen. Dabei gibt es verschiedene Netzplanformen, die wiederum nur Varianten eines einheitlichen Grundmodells sind (Schwarze 1994).

Zur graphischen Repräsentation von Netzplänen werden meist Pfeildiagramme verwendet. Jedoch ist es auch möglich, diese mit Hilfe tabellarischer Abbildungen zu interpretieren, die den Prozess bzw. Projektablauf beschreiben, die die einzelnen Vorgänge charakterisieren und die Reihenfolge bzw. Abhängigkeiten von Ereignissen oder Tätigkeiten aufzeigen (Jankulik 2005).

Bei der weiteren Charakterisierung von Netzplänen ist es wichtig, die Zeitplanung zu berücksichtigen. Jedoch darf niemals die Struktur der Prozessaktivitäten vernachlässigt werden. Zur Unterscheidung werden in diesem Beitrag folgende Unterkategorien verwendet:

- deterministische Verfahren
- stochastische Verfahren

Bei deterministischen Verfahren werden die geplanten Zweige bis zum Ende des Prozesses abgelaufen. Beispiele hierfür ist die Meta Potential Method (MPM), die Critical Path Method (CPM) und deren Variationen.

Der genaue Ablauf eines stochastischen Verfahrens lässt sich nicht definitiv vorhersagen. In diesen Systemen hat jeder einzelne Schritt eine Auswirkung auf die Richtung und Zeitdauer des späteren Ablaufs des Projektes. Die »Program Evaluation and Review Technique« (PERT) modelliert die Aufgabenzeiten mit einer Zufallsvariable (meist über eine Beta-Verteilung).

Eine weitere Art der stochastischen Netzplantechnik benutzt Entscheidungspunkte nach einzelnen Schritten. Diese Form des Netzplanes wird Entscheidungsnetzplan genannt. Eine Besonderheit dieses Netzplanes ist, dass mindestens eine ODER-Bedingung vorhanden sein muss. Das führt zu einer stochastischen Ablaufstruktur, d.h. einige Vorgänge werden unter Umständen nicht ausgeführt. An den Ausgängen können für weiterführende Wege bestimmte Wahrscheinlichkeitswerte zugeordnet werden. Bei der Realisierung des Projekts müssen allerdings nicht alle Wege durchlaufen werden (DIN 69900). Mögliche Vertreter dieser Methode ist z.B. die Graphical Evaluation and Review Technique (GERT), die jedoch Schleifen enthalten kann (Motyel 2006), und Netzpläne, die auf Petri-Netze basieren (Generalized Asymmetric Nets (GAN)).

2.3 Design Structure Matrix (DSM)

Bei früheren Arbeiten zur Systemmodellierung wurden häufig Graphen genutzt. Jedoch bei der Modellierung und später auch Optimierung komplexer Systeme gewinnt die DSM-Matrix immer mehr an Bedeutung.

DSM ist eine Matrizendarstellung eines gerichteten Graphs (die Matrix enthält nur Nullen und Einsen). Dabei handelt es sich um eine $m \times m$ quadratische Matrix, bei der m der Anzahl der Elemente ist. Mit Hilfe dieser Darstellung kann man gut das Vorhanden- bzw. Nichtvorhandensein von Relationen zweier Prozessaktivitäten repräsentieren und Zyklen und Iterationen darstellen. Außerdem lässt es sich

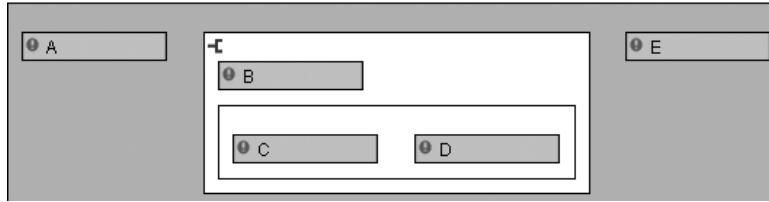


Abbildung 4: Beispiel einer Containerdarstellung

besonders gut in andere Darstellungen überführen bzw. kann gut aus anderen Darstellungen erzeugt werden.

Hinsichtlich der Produktentwicklungsprozesse können zwei Typen der DSM-Matrix hervorgehoben werden:

- Die komponentenbasierte DSM beschreibt die Interaktionen zwischen den Elementen in einem komplexen Produkt mit der Berücksichtigung der Geometrie, Strömung der Energie, der Information und des Materials. Von diesem Typ kann man die aktivitätsbasierte DSM ableiten.
- Die aktivitätsbasierte DSM zeigt die Abhängigkeit der Arbeitsschritte von verschiedenen Konstruktionselementen. Der Austausch von Informationen kann daher als ein Graph oder mit Hilfe einer DSM beschrieben werden.

2.4 Containerdarstellung

Das Prinzip der Containermodellierung (Abbildung 4) ist, dass die sequentiellen, parallelen, iterativen oder alternativen (Teil-) Prozesse eine Gruppe bilden können, den sogenannten Container. In diesen Containern werden Prozessaktivitäten mit den dazugehörigen prozessrelevanten Daten und Informationen eingefügt. Die Container können wiederum andere Container enthalten oder in anderen, größeren Containern enthalten sein. Häufig benutzte Containerkonstrukte können in einer Teilprozessbibliothek abgelegt werden und jederzeit an einer beliebigen Stelle in jedem Prozessmodell wieder verwendet werden.

2.5 Notation der graphischen Beschreibungstechniken

Für die Beschreibung der Prozessmodelle gibt es unterschiedliche Sprachwerkzeuge, die auf bestimmten Netztypen basieren und jeweils eigene Symbole und Notationen verwenden. Darunter fallen:

- SADT – Structured Analysis and Design Technique (Marca 1988)
- IDEF – Integrated Definition ((Kim et al. 2001, Smith, Smith 1977))
- UML – Unified Modeling Language) (Harel 1987)
- BPMN – Business Process Modeling Notation) ((Freund & Rücker 2010, Palluch & Wentzel 2012)
- EPK – Ereignisgesteuerte Prozesskette) (Keller et al. 1992)

3 Anforderung an das Modellierungswerkzeug

Heutzutage sind die Produktentwicklungsprozesse dynamischer geworden. Die Modellierung muss diese Tendenz nachverfolgen können. Im Umfeld der Entwicklung komplexer Systeme kann es Probleme bei der Einhaltung von zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen geben. Um diese Größen einzuhalten, kann ein Modellierungswerkzeug wertvoll sein.

Die wenigsten Prozesse laufen immer gleich ab. Viel häufiger kommt es vor, dass die durchlaufenden Prozesspfade in den unterschiedlichen Prozessinstanzen variieren, weil bestimmte Dinge eben nur unter bestimmten Umständen zu erledigen sind (Freund & Rücker 2010).

Der Produktentwicklungsprozess soll systematisch und konsequent aufgebaut werden, wobei die eingesetzte Modellierungsmethode und das Modellierungswerkzeug eine bedeutsame Unterstützung darstellen.

Die Anforderungen an ein bestimmtes Modellierungswerkzeug sind wie folgt:

- Die Darstellung der Hauptprozesse und die Abbildung der Nebenprozesse sowie abhängige Verzweigungen und Schleifen sollen nachvollziehbar sein.
- Das Prozessmodell soll mit Hilfe der Datenbank und mit dem Werkzeug erzeugt werden und die realen Prozessabläufe möglichst ähnlich wiedergeben.
- Bei einem beendeten Entwicklungsprojekt soll das verwendete Prozessmodell wieder zur Verfügung stehen, welches man teilweise (Teilprozess oder ganzer Prozess) für andere Problemlösungen benutzen kann. Im Prozessmodell stehen alle Details, die zum erfolgreichen Projekt geführt haben.
- Bei geeigneter Dokumentierung sind die geeigneten Prozesse zu finden, die als Basis für die gegebene Entwicklungsaufgabe dienen können. Dazu ist es nötig, eine Wissensbasis auszuarbeiten. Die Teilprozesse kann man in Bibliothekssystemen speichern, um die Suche und die Wiederbenutzung zu erleichtern. In der Bibliothek werden die Prozessmodelle mit eigenen Kennzeichen versehen, welche abrufbar und für den weiteren Verbrauch veränderbar sind.
- Das Prozessmodell aus der Bibliothek soll zum aktuellen Prozess flexibel anpassbar sein.
- Man muss viele Prozesse verstehen und deren Ähnlichkeiten (beispielsweise über Mustervergleiche) bestimmen, damit man aus allgemeinen Bausteinen das neue Prozessmodell bekommen kann.
- Das Modell soll kontinuierlich änderbar sein, da Details oft erst während der Produktentwicklung klarwerden.
- Die Anforderung eines Unternehmens an ein Modellierungswerkzeug ist, dass dieses in die vorhandene Systemlandschaft des Unternehmens einfach eingebettet werden kann.

Für jegliche Art von Prozessen soll es möglich sein, eine allgemeingültige Software zu erstellen, die es bei unterschiedlichem Charakter ermöglicht, in verschiedenen Unternehmen Prozesse zu modellieren.

4 Vor- und Nachteile der am häufigsten benutzten Modellierungsdarstellungen

Vorgangspfeil-Netzpläne, wie z. B. CPM, können zur Anwendung kommen, wenn das Projekt einfache Anordnungsbeziehungen besitzt, die selten geändert werden müssen. CPM-Netzpläne sind für Kosten- und Einsatzmittelplanung weniger geeignet. Vorgangsknoten-Netzpläne, z. B. MPM, haben den Vorteil, dass den Vorgangsknoten viele unterschiedliche Informationen zugeordnet werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie sich relativ schnell ändern lassen. Ereignis-Knoten-Netzpläne wie PERT oder GERT sollten bei Projekten verwendet werden, bei denen die Vorgänge wie in den meisten Entwicklungsprozessen entweder zeitlich oder strukturell nicht genau vordefiniert werden können (stochastische Netzplanmethode).

Die DSM-Methode bietet die Möglichkeit, sequentielle und parallele Aktivitäten zu modellieren, und nebenbei voneinander abhängige Beziehungen der Aufgaben zu beschreiben. Die DSM integriert die Elemente von Netzplantechnik und in bestimmten Fällen die Elemente der Kostenplanung. Des Weiteren ist von der DSM-Methode einfach ein Gantt-Diagramm abzuleiten. An DSM basierend ist es einfach, eine Aufgabenreihenfolge zu suchen, die in Bezug auf den Zeitaufwand und die Kosten optimal ist.

Die Notationen der graphischen Beschreibungstechniken bieten vielfältige Darstellungsmöglichkeiten und sind daher wegen ihrer einfachen Nutzung sehr beliebt.

Der Nachteil von SADT ist, dass diese Notation wegen der graphischen und hierarchischen Abbildung (an einem gegebenen Seitenformat ist nur ein begrenzter Platz für Boxen und Symbole vorhanden) nicht übersichtlich und deshalb schwer zu handhaben und zu modifizieren ist.

Nachteil der IDEF ist, dass er hauptsächlich nur für sequentielle Prozesse geeignet ist. Prozesse, die Parallelitäten und Zyklen enthalten, sind nur dann modellierbar, wenn diese ausgerollt sind bzw. wenn die zuvor modellierten Vorgänge in tiefere Ebenen auf sequentielle Prozesse weiter zerlegbar sind.

Obwohl das UML ein anerkannter Modellierungsstandard ist, wird es häufig kritisiert, weil die Handhabung zu kompliziert ist und Mehrdeutigkeiten sowie Widersprüche auftreten können.

Gegenüber anderen Notationen ist die Bedeutung der BPMN-Notation exakt definiert. Leider ist es oftmals schwierig, verständliche und übersichtliche Prozessmodelle zu erstellen, da die korrekte und vollständige Darstellung gemäß BPMN oftmals recht viele Details erfordert (Freund & Rücker 2010).

Der Nachteil von EPK ist, dass diese auf Ereignissen basiert, aber Prozessaktivitäten. Das Ziel ist es daher, eine vorgegebene Modellierungssprache mit dem eigenen Metamodell der Autoren dieses Beitrages zu verknüpfen.

Vorteilhaft wäre ein Prozessmanagementwerkzeug, das

- für die Prozessplanung eine mit BPMN kombinierte Flussdiagrammdarstellung,
- für die Konsistenzprüfung eines Prozesses eine Containermodellierung und
- für Zeiten-, Kosten- und Risikovorhersagen gerade bei iterativen und alternativen Abläufen eine DSM

bietet. Damit kein Übertragungsverlust von Prozessinformationen erfolgt, müssen hierzu Regeln für die Konvertierung zwischen den eben drei genannten Modellierungsmethoden gefunden werden. Um später gleiche oder ähnliche Teilprozesse zu identifizieren, werden diese (unabhängig von der Modellierungsmethode) in Prozessbibliotheken gespeichert und auf spezifische Bedürfnisse angepasst, so wie eine neue oder geänderte Produktanforderung erfolgt ist. Gerade in der heutigen schnelllebigen Wirtschaftslage wird es zunehmend wichtiger, dass sowohl der Zeit-, Ressourcen- und Kostenbedarf des Entwicklungsprozesses als auch die Risiken einer Produktentwicklung mit entsprechender Genauigkeit abschätzbar ist.

5 Konzept des Modellierungswerkzeugs

Es darf nicht übersehen werden, dass Erstellung und Pflege der Prozessmodelle einen nicht zu vernachlässigenden Aufwand erfordert. Aus diesem Grund sollte bei der Modellierung mit Augenmaß gearbeitet und nicht zu sehr detailliert vorgegangen werden.

Bei der Ausarbeitung der Modellierungsmethode muss sich vor Augen gehalten werden, dass das Werkzeug möglichst alle Anforderungen erfüllt, unterschiedliche Ansichten für die Modellierung ermöglicht und in derselben Zeit die Vorteile der Modellierungsmethode vereinigt. Das Ergebnis ist ein Trialwerkzeug (Abbildung 5), bei dem eine DSM-Matrix, ein Diagramm mit BPMN-Symbolen und ein Containermodell zu einem Prozessmodellierungswerkzeug verbunden werden.

Aus Erfahrung hat sich gezeigt, dass die Containermodellierung einerseits eine sehr gut strukturierte Prozessdarstellung (siehe Abschnitt 2.4) bietet, andererseits vom Benutzer während der Prozessaufnahme allerdings schwierig zu handhaben ist.

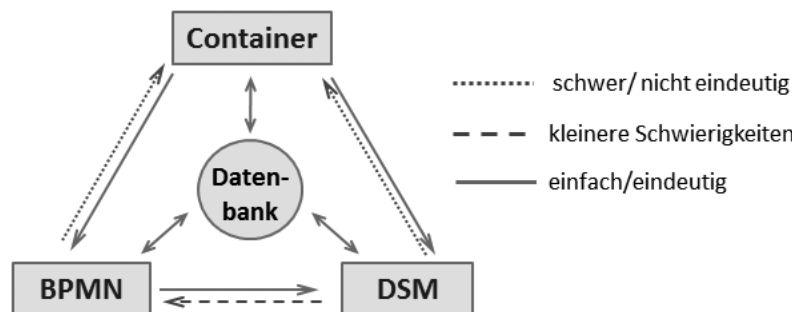


Abbildung 5: Schnittstellen zwischen den drei Darstellungen des Prozessmodells

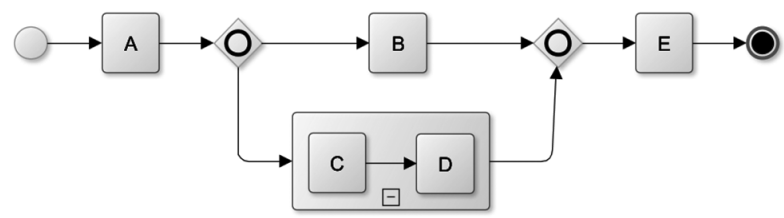


Abbildung 6: Diagramm mit BPMN-Darstellung

Daher bietet es sich an, den BPMN 2.0-Standard zu benutzen. BPMN verfügt neben mit Pfeilen verbundenen Aktivitätselementen auch über Teilprozess-Symbolelemente, die aus Übersichtlichkeitselementen aus- und zugeklappt werden können.

Das BPMN-Diagramm (Abbildung 6) ist ein Vorgangsknotennetz mit unterschiedlichen Gateways, die die Verzweigungen, parallele oder alternative Abläufe ermöglichen. Als Notation werden die genormten Symbole der BPMN genutzt. Diese graphische Beschreibungstechnik ermöglicht auch die Darstellung von stochastischen Abläufen. Bei der Modellierung werden die drei Gateways (Datenbasiertes exklusiven Gateway (XOR), Inklusives Gateway (OR) und Paralleles Gateway (AND)) angewendet. Mit deren Hilfe sind die Alternativen und parallelen Elemente darstellbar. Bei einem exklusiven Gateway kann nur eine Alternative eintreten, die sich gegenseitig ausschließt. Das Gateway kann verzweigt und zusammenführend sein. Das inklusive Gateway kann eine Und-Oder-Situation beschreiben, bei der entweder ein, mehrere oder auch alle ausgehende Pfade gleichzeitig durchlaufen können. Die kombinierte Wirkung wird auch genutzt, wenn die Pfade wieder zusammenlaufen. Manche Aktionen müssen nicht erst beginnen, wenn die anderen fertig sind, sondern beide (oder auch mehrere) lassen sich gleichzeitig erledigen. Dafür gilt das parallele Gateway, das sowohl parallelisierend und auch synchronisierend funktioniert. Die Parallelisierung bedeutet nicht, dass die Aufgaben zwangsläufig gleichzeitig ausgeführt werden müssen (Freund, Rücker 2010).

Während der Prozessmodellierung wird weder in der Containermodellierung noch mit BPMN die Anzahl möglicher Iterationsläufe und den wahrscheinlichsten Weg von möglichen Prozessalternativen festgehalten. Dies erfolgt erst in einer Prozesssimulation, wenn die Durchlaufzeit und die Kosten des Prozesses ermittelt werden sollen. Kommt man nach einer Prozesssimulation zu dem Schluss, dass die Prozessstruktur optimiert werden soll, ist es sehr schwierig, diese Strukturen in der Container- und BPMN-Darstellung aufzubrechen. Daher wird eine Zwischenstufe benötigt, die dieses Aufbrechen einfach ermöglicht. Dies erfolgt mit der DSM-Matrix, die mit voller Genauigkeit die Beziehung der einzelnen Elemente des Prozesses definiert und abbildet. Sie behandelt die Zyklen und Rückkopplungen eindeutig und einfach. Mit der Ergänzung ist es möglich, die Alternativen im Prozess abzubilden.

In der DSM-Matrix (Abbildung 7) werden alle Alternativen aufgelistet. Diese werden als Bruchzahl dargestellt. Z.B. kann bei drei Alternativen der Wert 1/3 möglich sein. Dieser Wert hat nichts mit der Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Alternativen zu tun. Die aktiven Alternativen werden später ähnlich wie die parallelen Elemente behandelt.

| | A | B | C | D | E |
|---|---|-----|-----|---|-----|
| A | | 1/2 | 1/2 | | |
| B | | | | | 1/2 |
| C | | | | 1 | |
| D | | | | | 1/2 |
| E | 3 | | | | |

Abbildung 7: Erweiterte DSM-Matrix

Der Durchgang zwischen den drei Darstellungen ist assoziativ. Es ist möglich, die Prozessdaten in alle Darstellungen einzugeben, und es wird danach zu anderen Darstellungen konvertiert. Jede der drei Darstellungen haben ihre Vor- und Nachteile. So ist es auch nicht möglich, alle Prozessinformationen in allen Darstellungen genauso zu erstellen. Deshalb wird das Trialwerkzeug genutzt. So ist es möglich, alle Informationen in der besten Darstellung bearbeiten und den späteren Zeit- und Ressourcenbedarf schätzen oder eine Optimierung durchführen zu können.

6 Zusammenfassung

Mit graphischer Darstellung, wie z.B. BPMN, kann die Prozessstruktur mit Verbindungspfeilen einfach dargestellt werden. Jedoch sind die Teilprozessstrukturen in dieser Darstellungsart, insbesondere bei parallelen Prozessen, teilweise schwer erkennbar. Dieser Nachteil wird durch die Containermodellierung (ein Container beinhaltet eine serielle, parallele, iterative oder alternative Prozessstruktur) ausgeglichen, da klar erkennbar ist, welche Prozessergebnisse beim Verlassen eines Containers vorliegen. Diese Modellierungsmethode hat aber den Nachteil, dass bei iterativen oder alternativen Abläufen zusätzliche Container definiert werden müssen, um zu wissen, ob serielle, parallele, iterative oder alternative Prozessstrukturen darin enthalten sind. Iterative Abläufe können bei der BPMN sehr unübersichtlich und nicht eindeutig dargestellt werden, da gerade bei ineinander verschachtelten iterativen Abläufen nicht erkennbar ist, wo der Anfang eines iterativen Teilprozesses ist. Dieser Nachteil wird wiederum durch DSM ausgeglichen, da man mit DSM die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen eindeutig angeben und so eine klare Prozessstruktur darstellen kann. Es ist nicht zu erwarten, dass die Elemente sofort in der richtigen Reihenfolge (aus Sicht der Zeit, Ressourcen und Kosten) aufgeschrieben werden. Mit DSM ist die Neuordnung der Prozesselemente zum Einhalten von Zeit-, Ressourcen- und Kostenzielen möglich.

Literaturverzeichnis

- Bullinger, H.-J., Spath, D., Warnecke, H.-J., Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation, Strategien, Planung, Umsetzung; 3., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, DIN 69900 Teil 1: Projektwirtschaft – Netzplantechnik – Begriffe (08/1987)
- Freisleben, D.: Gestaltung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen mit einem wissensbasierten Vorgehensmodell, Diss. Universität Magdeburg, 2001
- Freund J., Rücker, B.: Praxishandbuch BPMN 2.0, 2. Aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien 2010.
- Harel D.: State charts: A Visual Formalism for Complex Systems, Science of Computer Programming, 1987. vol.8(3), pp.231–274
- Harrington, J. H.: Business Process Improvement: The Breakthrough for Total Quality, Productivity and Competitiveness, New York, McGraw-Hill, 1991
- Jankulik E., Kuhlang P., Piff R.: Projektmanagement und Prozessmessung, Die Balanced Scorecard im projektorientierten Unternehmen, Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2005, pp. 75–77
- Keller G., Nüttgens M., Scheer A.-W.: „Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage Ereignisgesteuerter Prozeßketten (EPK)“. Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Universität des Saarlandes, Heft 89, 1992
- Kim C-H., Yim, D-S., Weston R. H.: An Integrated use of IDEF0, IDEF3 and Petri net methods in support of business process modelling, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, vol.215(4), 2001, S. 317–330
- Kocsondi, A.: Modell-módszer: A modellek helye és szerepe a tudományos megismerésben. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976
- Marca D. A., McGowan C. L.: Structured analysis and design technique: SADT, McGraw-Hill, New York, 1988
- Miller, L. C. G.: Business Process Re-engineering: A Management Handbook. Seattle, WA (USA): Eigenverlag 1994
- Motyel, E.: Projektmanagement Lexikon, Begriffe der Projektwirtschaft von ABC-Analyse bis Zwei-Faktoren-Theory, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006.
- Pahl, G., Beitz, W.: Konstruktionslehre, Springer Verlag, Berlin. 1986
- Palluch, J., Wentzel P.-R.: Prozess-Modellierungssprachen: Eine Übersicht, Method Park Software AG, www.methodpark.de, 23.01.2012
- Prechtel, P., Burkard F.-P.: Metzler Lexikon: Philosophie. Begriffe und Definitionen, Verlag J. B. Metzler, Stuttgart

- Rick, T.: Gépipari terméktervezési folyamatok erőforrás és költségszempontú optimalása a termékstruktúra figyelembevételével, Dissertation, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépszerkezettani Intézet, Budapest, 2007
- Saatkamp, J.: Business Process Reengineering von Marketingprozessen – Theoretischer Bezugsrahmen und explorative empirische Untersuchung, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, GIM Gesellschaft für Innovatives Marketing e.V., Nürnberg 2002
- Schabacker, M.: Bewertung der Nutzen neuer Technologien in der Produktentwicklung, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Integrierte Produktentwicklung, Band 1, 2001
- Schelle, H., Ottmann, R., Pfeiffer, A.: Projektmanager. GPM-Selbstverlag, Nürnberg, 2005
- Schwarze, J.: Netzplantechnik: eine Einführung in das Projektmanagement; 7., vollst. Überarb. Aufl. – Herne; Berlin: Verl. Neue Wirtschafts-Briefe, 1994
- Smith J. M., Smith D. C. P.: Database Abstraction: Aggregation, Communications of the ACM, 1977. vol.20(6), pp.405–413
- Staud, J.: Geschäftsprozessanalyse, Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware, Dritte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- Vajna, S.: Rechnerunterstützte Anpassungskonstruktion, VDI-Fortschritts-Berichte 10/ 16, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982

Kontakt

Dipl.-Ing. Nikoletta Szélig
 Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Dr. h. c. Sandor Vajna
 Dr.-Ing. Dipl.-Math. Michael Schabacker
 Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl für
 Maschinenbauinformatik
 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
 Universitätsplatz 2.
 39106 Magdeburg
Imi.uni-magdeburg.de

Marcel Böttrich, Matthias Sieber & Ralph Stelzer

Numerische Methode zur Bestimmung der Fahrwerkskonfiguration aus Baukastenkomponenten

1 Motivation und Zielstellung

Die Herausforderungen für die Automobilindustrie werden aufgrund der internationalen Wettbewerbssituation, den dynamischen Markt- und Kundenanforderungen sowie neuen Technologietrends immer größer. Die Unternehmen reagieren darauf mit einer Individualisierung der Produktpalette und Ausweitung der Funktionsvielfalt, um sich von Konkurrenten zu differenzieren und Marktnischen zu besetzen. Neben neuen Fahrzeugmodellen und -derivaten ist eine steigende Anzahl an Kundenfunktionen insbesondere aus den Bereichen Infotainment, Fahrerassistenz, Kommunikation, Komfort und Sicherheit zu beobachten. Diese Produktdiversifizierung führt zu einer signifikanten Komplexitätssteigerung für die Hersteller, wodurch sowohl die Entwicklungszeit und -kosten als auch die Produktqualität negativ beeinflusst werden können. Viele Unternehmen haben sich aus diesem Grund auf ein geeignetes Komplexitätsmanagement, zum Beispiel durch die Einführung von Baukastensystemen, sowie auf den Einsatz effizienter virtueller Entwicklungsmethoden ausgerichtet. Das Ziel ist es, bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung sowohl einen hohen Reifegrad bezüglich der geometrischen und funktionalen Eigenschaften der Konzepte als auch eine geeignete Wiederverwendungsstrategie von Komponenten zu erreichen, um spätere kosten- und zeitintensive Änderungsschleifen zu vermeiden.

Einen Ansatz hierzu bietet innerhalb der Fahrwerksentwicklung der BMW GROUP das Chassis Configuration Tool – CCT. Dieses Entwicklungswerkzeug ermöglicht es, Fahrwerkskonfigurationen mit geringem Kapazitätseinsatz unter Verwendung vorhandener Komponenten aus einem Baukasten direkt innerhalb der virtuellen Entwicklungsumgebung zu erstellen. Durch die speziell für die frühen Entwicklungsphasen angepassten CA-Modelle und den hohen Automatisierungsgrad können die erarbeiteten Konzepte sowohl geometrisch als auch funktional mit phasengerechter Aussagequalität in kürzester Zeit bewertet werden (Böttrich et al. 2010).

Die Herausforderung bei der automatisierten Konfiguration der Fahrwerkskonzepte aus Baukastenkomponenten besteht darin, ein kinematisch vollständig bestimmtes Fahrwerkssystem zu erstellen, mit dem auch starrkinematische Feder- und Lenkzustände abgebildet werden können. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieser Beitrag mit einer numerischen Methode zur Bestimmung der Fahrwerkskinematik innerhalb des Chassis Configuration Tools.

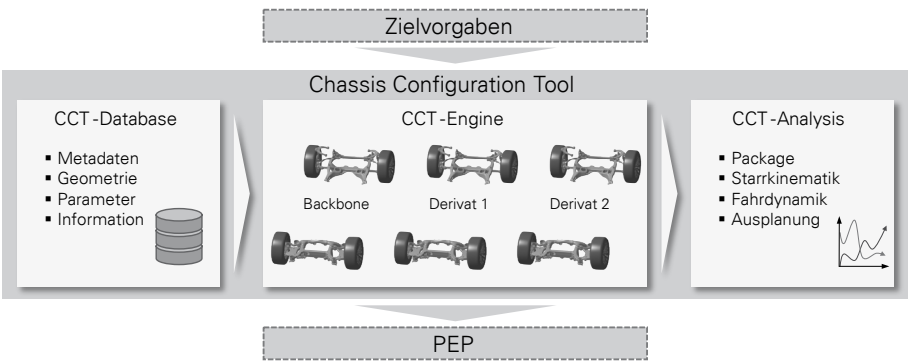


Abbildung 1: Gesamtkonzept des Chassis Configuration Tools (Böttrich et al. 2010)

2 Chassis Configuration Tool – CCT

2.1 Gesamtkonzept einer toolgestützten Fahrwerkskonfiguration

In den frühen Phasen der Produktentwicklung entstehen viele Konzeptideen, deren Umsetzbarkeit häufig lediglich auf Basis von Expertenwissen oder den Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten bewertet wird. Dadurch ist das Risiko sehr groß, dass das ausgewählte und weiterzuverfolgende Konzept aufgrund der fehlenden quantitativen Beurteilung später nicht den gewünschten Anforderungen entspricht. Aus diesem Grund zielt der Ansatz des Chassis Configuration Tools darauf ab, bereits in den sehr frühen Phasen die Konzeptideen mit Hilfe von virtuellen Entwicklungsmethoden abzubilden. Der toolgestützte Prozess ermöglicht eine automatisierte Produktkonfiguration entsprechend der gewählten Baukastenstrategie und darauf aufbauend eine phasengerechte geometrische und funktionale Bewertung innerhalb kürzester Zeit.

Das Gesamtkonzept des mit Hilfe des CAD-Systems CATIA V5 umgesetzten Tools ist in Abbildung 1 dargestellt und besteht im Wesentlichen aus den drei Bausteinen CCT-Database, CCT-Engine sowie CCT-Analysis (Böttrich et al. 2010). Die Konfiguration von Fahrwerkskonzepten erfolgt in der CCT-Engine auf Basis der in der CCT-Database abgelegten Baukastenkomponenten. Der hohe Automatisierungsgrad des Chassis Configuration Tools ermöglicht zudem eine permanente funktionale und geometrische Analyse der entstehenden Fahrwerke sowie die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielvorgaben innerhalb der CCT-Analysis Umgebung.

Neben einzelnen Fahrwerkssystemen lassen sich auch Produktfamilien abbilden, bei denen die Derivate mit ihren spezifischen Eigenschaften aus dem Backbone-Fahrzeug abgeleitet sind und ein sinnvoller Einsatz von Neu- und Wiederholteilen eine Senkung von Produkt- und Entwicklungskosten bewirkt. Die Abhängigkeiten bei Mehrfachverwendung der Komponenten innerhalb der entstehenden Produktfamilie sind dabei im CCT abgebildet. Dadurch können die Auswirkungen von Bauteiländerungen sofort in allen Derivaten, in denen diese Komponenten als Wiederholteile zum Einsatz kommen, dargestellt und bewertet werden. Dies ermöglicht eine

sichere Beurteilung der erarbeiteten Konzepte aller Fahrwerke einer Produktfamilie bereits in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses. Die Weiterverwendung der generierten CA-Daten in die folgende Phase der Konzeptdetaillierung erfolgt über eine standardisierte Schnittstelle, wodurch die Verknüpfung mit den bestehenden Entwicklungsmethoden des Produktentstehungsprozesses gewährleistet wird (Bötttrich et al. 2010).

2.2 Datenmodell zur Abbildung der Baukastenkomponenten

Für die automatisierte Konfiguration von Fahrwerken im CCT ist ein entsprechendes Datenmodell mit standardisierten Schnittstellen, Strukturen und Datenformaten erforderlich. In der CCT-Datenbank werden hierzu neben Serien- und Entwicklungsbauteilen auch Komponenten aus Industriebaukästen verwaltet (vgl. Bötttrich et al. 2010). Jedes Fahrwerksbauteil ist funktionsgerecht gegliedert und als Datensatz durch Metadaten, Ersatzmodelle, Kennwertparameter sowie die dazugehörigen 3D-Repräsentationen beschrieben (siehe Abbildung 2).

Die Zusammenstellung des Fahrwerks mit Komponenten aus der Baukastendatenbank erfolgt mit Hilfe des im CAD-System umgesetzten Konfigurationstools. Dazu werden zunächst die parametrischen Ersatzmodelle, der vom Anwender aus der Baukastendatenbank gewählten Komponenten instanziiert und mit den dazugehörigen Kennwertparametern versehen. Die Ersatzmodelle, deren kinematische Anbindungsstellen in einem körperfesten Bauteilkoordinatensystem durch Vektoren beschrieben sind, dienen dabei als reduzierte Repräsentationen der jeweiligen Komponentenkategorie (siehe Abbildung 3). Sie definieren die grundsätzlichen geometrischen Eigenschaften der Komponenten, wie zum Beispiel Bauteillängen oder Positionen von Gelenkpunkten. Für nachfolgende Bauraumuntersuchungen können zusätzlich die 3D-Repräsentationen, welche die reale Form der Komponente abbilden, aus der Datenbank geladen und entsprechend der Ersatzmodelle positioniert werden.

Die Vektorbeschreibung der einzelnen Bauteile und der definierte Feder- und Lenkzustand sind die einzigen Informationen, die für die räumliche und kinematisch eindeutige Anordnung der Komponenten zur Verfügung stehen. Nach Instanziierung der zu betrachten-

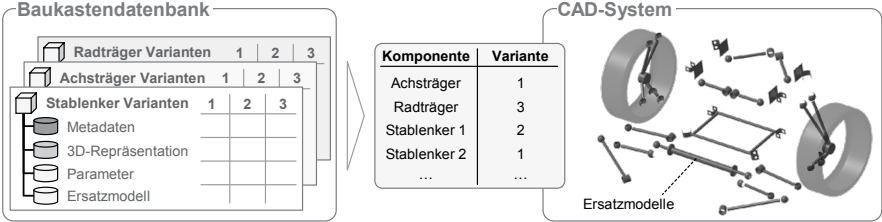


Abbildung 2: Konfiguration von Fahrwerken mit Baukastenkomponenten

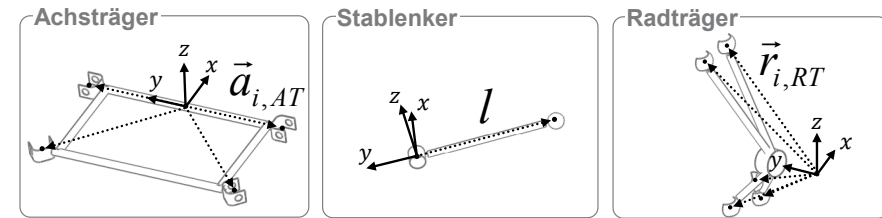


Abbildung 3: Parametrische Ersatzmodelle verschiedener Komponentenklassen

den Bauteile aus der Baukastendatenbank sind diese aber zunächst ohne gegenseitigen Bezug und definierter Lagebeschreibung im CAD-System vorhanden (siehe Abbildung 2 rechts). Das Ziel der vorgestellten Methode ist es, in einem nächsten Schritt die Bestimmung der Fahrwerkskinematik und die Positionierung der Bauteile vorzunehmen.

3 Numerische Methode zur Bestimmung einer Fahrwerkskonfiguration

3.1 Integrierte Methoden der CAD-Systeme zur Kinematikabbildung

Im Rahmen von Vorbetrachtungen zur automatisierten räumlichen Positionierung der Ersatzmodelle im CCT wurden verschiedene integrierte Methoden der CAD-Systeme, bei denen es sich im Wesentlichen um Zwangsbedingungen in Form von Constraints oder Kinematic Joints handelt, untersucht. Dabei erwies sich, dass diese keine zufriedenstellende Lösung bieten. Als zentrale Nachteile stellten sich die eingeschränkte Automatisierbarkeit beim Austausch einzelner Komponenten im Sinne einer Baukastenstrategie sowie die Mehrdeutigkeit und Fehleranfälligkeit in der Lösungsfindung bei unterschiedlichen Ausgangslagen der Bauteile heraus. Die Abbildung 4 zeigt am Beispiel eines ebenen Ersatzsystems, dass bei der automatisierten Lagebestimmung im CAD-System mehrere Lösungsvarianten aufgrund der veränderten Ausgangslage des zu positionierenden Dreiecks auftreten.

Die Anbindungsstellen der drei Stäbe und des jeweiligen Dreiecks sind dabei entsprechend den Fahrwerkersatzmodellen durch Vektoren in ihrem körperfesten Koordinatensystem und die drei ortsfesten Verbindungsstellen im Inertialsystem definiert. Im Beispiel werden die eine rotatorische und die zwei translatorischen Freiheitsgrade des Dreiecks über die Anbindung der drei Stablenker eingeschränkt. Deren Verbindung mit dem Dreieck und den ortsfest-

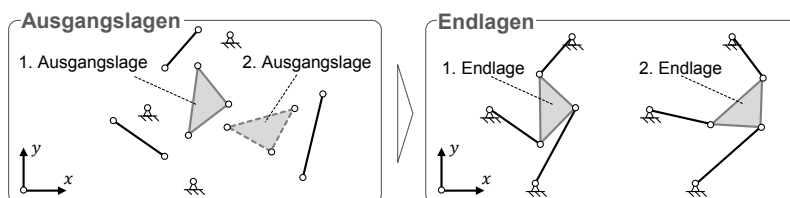


Abbildung 4: Mehrdeutigkeit in der Lösungsfindung bei integrierten Methoden der CAD-Systeme

sten Gelenkpunkten im Inertialsystem erfolgt über Drehgelenke, die im CAD-System mit Hilfe von Zwangsbedingungen realisiert sind. Je nach Ausgangslage der einzelnen Modellkomponenten vor der Aktivierung der Constraints bzw. Joints entstehen trotz gleichbleibender geometrischer Eigenschaften unterschiedliche Lösungen für das Positionierproblem, was für eine eindeutige Bestimmung der Fahrwerkskinematik nicht zufriedenstellend ist. Des Weiteren gibt es Startpositionen, aus denen heraus es nicht gelingt eine Lösung für die definierten Zusammenbaubedingungen zu generieren, obwohl eine reale Lösung existiert. Hierbei handelt es sich häufig um Strecklagen bei denen die Schließung der Verbindung mit einem der Lenker nicht umgesetzt werden kann.

Aus diesen Gründen wird für die eindeutige Bestimmung der Fahrwerkskinematik im CCT nicht auf die integrierten Zwangsbedingungen der CAD-Systeme sondern auf eine numerische Methode zurückgegriffen, mit der ein System von nichtlinearen Bindungsgleichungen iterativ berechnet wird.

3.1 Vektorzüge und Aufstellen der Bindungsgleichungen

Die Basis der numerischen Methode zur eindeutigen Bestimmung der Fahrwerkskonfiguration bildet die Vektorbeschreibung einer jeden Komponente in ihrem körperfesten Koordinatensystem durch die Ersatzmodelle, die Vorgaben bezüglich des Feder- und Lenkzustandes ebenso die Position des Achsträgers im Inertialsystem. Das Ziel ist die Berechnung der Lage des Radträgers im Raum für die jeweilige Fahrwerksseite. Ausgehend davon lassen sich die Positionen der restlichen Bauteile wie Lenker und Räder bestimmen.

Für das Aufstellen der nichtlinearen Bindungsgleichungen wird der Ansatz zur Berechnung der Vorwärtskinematik einer Stewart-Gough-Plattform (Hexapod) angewendet. Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf Fahrwerkssysteme ist durch den grundsätzlich ähnlichen Aufbau eines Hexapods und einer allgemeinen Mehrlenkerachse gewährleistet (siehe Abbildung 5).

Die sechs unabhängigen Koordinaten des Radträgers einer jeden Fahrwerksseite bezogen auf das Inertialsystem setzen sich aus drei

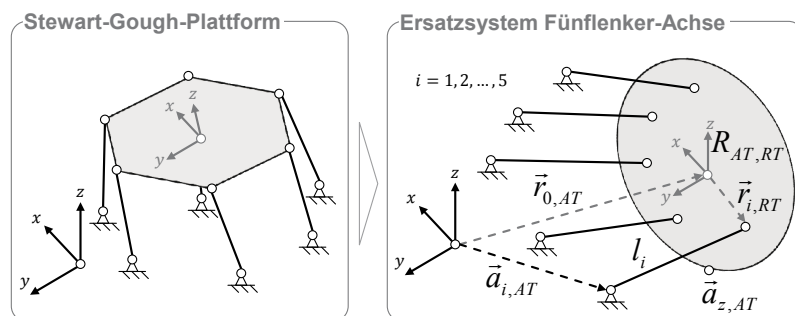


Abbildung 5: Strukturaufbau der Stewart-Gough-Plattform und der allgemeinen Fünflenker-Achse

Positionskoordinaten sowie den drei für die rotatorische Transformation notwendigen Drehwinkeln zusammen (Gleichung 1 und 2). Für letztere wird eine Rotationsmatrix verwendet, die sich aus den drei relativen Elementardrehungen um die negative z-, positive x'- und ebenfalls positive y''-Achse zusammensetzt.

$$\vec{r}_{0,AT} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{AT,RT} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cdot \cos \beta + \sin \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta & \sin \gamma \cdot \cos \alpha & \cos \gamma \cdot \sin \beta - \sin \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \gamma \cdot \cos \beta + \cos \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta & \cos \gamma \cdot \cos \alpha & -\sin \gamma \cdot \sin \beta - \cos \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ -\cos \alpha \cdot \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Für eine allgemeine Fünflenker-Achse in Konstruktionslage können fünf Bindungsgleichungen nach der Gleichung 3 bestimmt werden. Diese entsprechen der Abstandsbedingung für jedes Bein einer Stewart-Gough-Plattform nach Joswig & Theobald 2008 als jeweils geschlossener Vektorzug.

$$(\vec{r}_{0,AT} + R_{AT,RT} \cdot \vec{r}_{i,RT} - \vec{a}_{i,AT})^2 - (l_i)^2 = 0, \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

Die Einschränkung des letzten Freiheitsgrades des Kinematikprinzips erfolgt über die Definition des Federzustandes des Fahrwerks in Konstruktionslage. Dieser wird als Eingangsgröße vorgegeben und bestimmt die z-Koordinate im Ortsvektor des Radträgers, wodurch diese als Unbekannte entfällt. Mit diesen fünf Bindungsgleichungen lässt sich somit die Position des Radträgers ermitteln.

Dieser allgemeine Fall ist auf weitere Fahrwerkssysteme mit Mehrlenkerprinzip übertragbar, wodurch auch Doppelquerlenker- oder Federbeinachsen berechnet werden können. Die Abbildung von definierten Lenkzuständen für Vorderachsen ist durch die Verschiebung von achsträgerseitigen Anbindungsstellen (Lenkgetriebe) realisierbar. Zudem lassen sich mittels Erweiterung des Gleichungssystems auch Federzustände berechnen, deren Radhub entweder über den Dämpferweg oder über die Verschiebung des Radaufstandspunktes in globaler z-Richtung erfolgt.

3.2 Berechnung mit dem dynamisch gedämpften Newton Verfahren

Das resultierende nichtlineare Gleichungssystem (NGLS) für ein jeweiliges Fahrwerkssystem, bestehend aus den definierten Bindungsgleichungen, ist anschließend mit Hilfe eines speziell für den Fahrwerksbereich angepassten dynamisch gedämpften Newton-Verfahrens zur Bestimmung der Nullstellen lösbar. Als Basis dient die »Newton-Raphson« Methode, die nach Pott 2007 eine schnelle und hinreichend genaue Lösung für die Positions- und Orientierungsberechnung aus einem nichtlinearen Gleichungssystem nach Gleichung 4 bietet.

$$F(\vec{x}) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} = 0, \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Mit diesem numerischen Iterationsverfahren wird der Lösungsvektor ausgehend von geeigneten Startwerten mit einem Korrekturan-satz (Gleichung 5) schrittweise durch Linearisierung des Gleichungs-

systems (Gleichung 6) der Nullstelle angenähert (Schwarz 2009).

$$\bar{x}_{i+1} = \bar{x}_i - \frac{F(\bar{x}_i)}{J(\bar{x}_i)} \quad (5)$$

$$F(\bar{x}_{i+1}) \approx F(\bar{x}_i) + J(\bar{x}_i) \cdot (\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i) = 0, \quad \text{mit } J(\bar{x}_i) = \frac{\partial F}{\partial \bar{x}} \quad (6)$$

Das Newton-Raphson Verfahren konvergiert je nach Startwerten lokal quadratisch und wird durch die Definition eines Abbruchkriteriums beendet (Braess & Seiffert 2007). Die schnelle Konvergenz dieses Verfahrens in der Nähe der Nullstelle ist für praktische Anwendungen beispielsweise für Steuerungsaufgaben in der Robotik ein Vorteil. Für die Lösung der nichtlinearen Bindungsgleichungen zur Bestimmung der Fahrwerkskinematik ist jedoch das Newton-Raphson Verfahren nur teilweise geeignet, da aufgrund des großen Lösungsbereiches und den damit verbundenen häufig ungenügenden Startwerten nicht immer eine Lösung gefunden wird. Zur Verbesserung der Startwertempfindlichkeit kann in Anlehnung an das Relaxationsverfahren ein sogenannter Dämpfungs- oder Schrittweitenparameter r eingeführt werden (Gleichung 7) (Braess & Seiffert 2007).

$$\bar{x}_{i+1} = \bar{x}_i - r \frac{F(\bar{x}_i)}{J(\bar{x}_i)}, \quad \text{mit } 0 < r < 1 \quad (7)$$

Mit dem somit gedämpften Newton Verfahren kann nun ein globales Konvergenzverhalten erreicht werden. Allerdings wird durch die numerische Dämpfung die Konvergenzgeschwindigkeit beeinträchtigt, denn je niedriger der Wert für den Dämpfungsparameter ist, desto langsamer konvergiert das Verfahren. Bei $r = 1$ ist das gedämpfte Newton Verfahren dem Newton-Raphson Verfahren gleichzusetzen. Ein idealer Wert für den Dämpfungsparameter existiert nicht, dieser muss schließlich individuell für jedes Problem bestimmt werden.

Um den erweiterten Konvergenzbereich aus dem gedämpften Newton Verfahren mit einer kurzen Rechenzeit zu kombinieren ist eine automatisierte Anpassung des Dämpfungsparameters notwendig. Möglich wird dies durch ein in Anlehnung an Gekeler 2006 umgesetztes Verfahren bei dem ein individuell für das jeweilige vorherrschende Problem geeigneter Dämpfungsparameter während der Berechnung ermittelt wird. Diese als dynamisch gedämpftes Newton Verfahren bezeichnete numerische Methode besteht somit aus zwei Iterationsschleifen, eine für das Newton Verfahren und eine für die Anpassung des Dämpfungsparameters. Die Vorgehensweise dieser Methode bewirkt, dass nur dann ein angepasster Dämpfungsparameter bei einzelnen Iterationsschritten zum Einsatz kommt, wenn dieser erforderlich ist. Dadurch wird die Schrittweite anders als bei dem gedämpften Newton Verfahren nicht unnötig reduziert, aber gleichzeitig die globale Konvergenz dieses Verfahrens beibehalten. Die Abbildung 6 zeigt den grundsätzlichen Prozessablauf für dieses Berechnungsverfahren.

Für ein jeweiliges Fahrwerkssystem sind einmalig ausreichend genaue Startwerte im Vektor x_0 festzulegen. Vor jeder Iteration wird zunächst der Wert für die Dämpfung auf $r = 1$ zurückgesetzt. Letzteres bewirkt, dass der numerische Dämpfungsfaktor nur wenn nötig eingesetzt wird und eine maximale Schrittweite und somit eine schnelle Lösungsgenerierung erzielt wird. Danach folgt die Kontrolle des Abbruchkriteriums für die aktuelle Iterationsschleife des dynamisch gedämpften Newton Verfahrens, ob das Verfahren bereits ausreichend gegen eine Lösung konvergiert ist. Dies ist der Fall, sobald der Betrag des Gleichungssystems F kleiner als das definierte Abbruchkriterium ε ist. Wenn dies nicht zutrifft, werden auf Basis des Newton Verfahrens die nächsten Iterationswerte berechnet. Diese werden zunächst mit dem vorläufigen Vektor x^* ermittelt, der erst dann zum endgültigen Vektor x_{i+1} wird, wenn der Betrag des NGLS mit den vorläufigen Werten kleiner als der Betrag des NGLS mit dem alten x_i Werten ist. Dadurch soll erreicht werden, dass die neuen Iterationswerte zu einer dem Dämpfungsparameter angepassten Verringerung des Betrages des NGLS und somit zu einer Annäherung an die Lösung führt. Ist dies nicht der Fall, wird

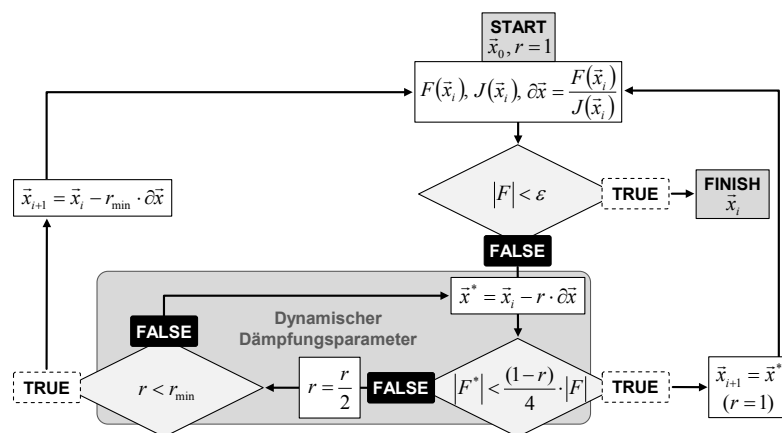


Abbildung 6: Lösungsalgorithmus des dynamisch gedämpften Newton Verfahrens

die Schleife für die individuelle Anpassung des Dämpfungsparameters gestartet. Dabei halbiert sich der Parameter r so lange, bis die vorläufigen Iterationswerte x^* schließlich zu einer Verbesserung des Betrages des NGLS führen und eine neue Newton Iteration gestartet werden kann. Unterschreitet der Dämpfungsparameter ein definiertes Minimum r_{min} , wird die Schleife abgebrochen und die endgültigen Iterationswerte mit dem minimalen Dämpfungsparameter bestimmt.

Untersuchungen zeigten, dass das dynamisch gedämpfte Newtonverfahren zum einen zu einer sicheren und eindeutigen Lösungsfindung für das Positionierungsproblem im Fahrwerksbereich führt. Zum anderen konnte durch den dynamischen Dämpfungsparameter eine Reduzierung der rechenintensiven Newton Iterationsschleifen und damit die Verringerung der Berechnungszeit auf ca. 5-20% bei unveränderten Startwerten verglichen mit einen fixen Dämpfungsparameter erreicht werden.

4 Umsetzung innerhalb des Chassis Configuration Tools

Die vorgestellte numerische Methode mit der Kombination aus Hexapodansatz und dynamisch gedämpften Newton-Verfahren ist als »Kinematics Solver Application« mit dem Entwicklungswerkzeug MATLAB programmiert. Dabei ist für jedes Fahrwerksprinzip ein speziell angepasstes Gleichungssystem notwendig, welches einmalig zu erarbeiten und im Solver zu implementieren ist (siehe Abbildung 7). Der Lösungsalgorithmus ist dagegen allgemeingültig und somit für alle Fahrwerksprinzipien ohne Anpassung anwendbar, sofern die geometrischen Eigenschaften der Komponenten eine reale Lösung besitzen.

Für die Bestimmung der Fahrwerkskinematik im CAD-System wird der zugrundeliegende Programmcode zunächst zentral mit dem MATLAB Compiler zu einer »KinSolver.dll« kompiliert und auf dem Anwendersystem einmalig registriert. Der Start der Kinematikberechnung erfolgt über ein Visual Basic Script (VB Script) direkt aus dem CAD-System. Hierzu werden alle notwendigen geometrischen Eigenschaften der konfigurierten Fahrwerkskomponenten abgerufen, zu einer Parametermatrix zusammengestellt und über eine COM-Schnittstelle an den Algorithmus der KinSolver.dll übergeben. Die Berechnung wird anschließend innerhalb der lizenzunabhängigen MATLAB Compiler Runtime ausgeführt. Nach erfolgreichem Programmdurchlauf wird jeweils ein Ergebnisvektor mit den sechs unabhängigen Koordinaten eines Radträgers an das VB Script zurückgeliefert. Aufgrund der ermittelten Ergebnisse der Radträgerposition können anschließend die Transformationsmatrizen der restlichen Bauteile im VB Script bestimmt und alle Fahrwerkskomponenten im CAD-System positioniert werden.

5 Zusammenfassung

Virtuelle Entwicklungsmethoden und eine geeignete Baukastenstrategie sind wesentliche Stellgrößen für die Automobilindustrie zur Effizienzsteigerung im Produktentstehungsprozess, um den dynamischen Markt- und Kundenanforderungen mit individuellen Produkten zu entsprechen. Das Chassis Configuration Tool ist hierzu ein Ansatz, um in den frühen Entwicklungsphasen innerhalb kür-

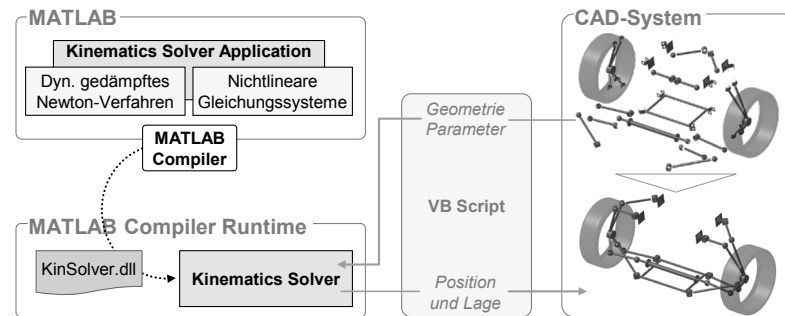


Abbildung 7: Umsetzung der Kinematikberechnung im CCT

zester Zeit geometrische und funktionale Aussagen bezüglich der Umsetzbarkeit der Konzeptideen treffen zu können.

Die in diesem Beitrag vorgestellte numerische Methode ist dabei ein zentraler Bestandteil zur Automatisierung von Konfigurationsprozessen für komplexe kinematische Systeme. Durch die Kombination aus Hexapodansatz und dem dynamisch gedämpften Newton-Verfahren können neue Fahrwerksfamilien mit dem Chassis Configuration Tool unter Verwendung von vorhandenen Bauteilen aus der Baukastendatenbank effizient innerhalb der virtuellen Entwicklungsumgebung konfiguriert werden. Zudem erlaubt diese Methode die Berechnung kinematischer Feder- und Lenkzustände. Durch den Einsatz des dynamischen Dämpfungsparameters werden eindeutige und kinematisch vollständige Fahrwerkskonfigurationen in wenigen Iterationsschritten mit einer ausreichenden Genauigkeit berechnet. Dabei ist dieses Berechnungsverfahren für verschiede-

ne Fahrwerkssysteme universell anwendbar, lediglich die Bindungsgleichungen sind entsprechend dem gezeigten Hexapodansatz für jedes Fahrwerksprinzip einmalig zu erstellen.

Die unkomplizierte Austauschbarkeit der Komponenten und die hohe Berechnungsgeschwindigkeit ermöglichen es, eine Vielzahl an Untersuchungsszenarien in kürzester Zeit zu erstellen und zu bewerten. Dadurch lassen sich konzeptkritische Punkte frühzeitig erkennen und optimieren, was zu einer Steigerung der Produktreife und Reduzierung von späten Änderungen führt. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um trotz der vielfältigen Randbedingungen und steigenden Produktvielfalt in der Automobilindustrie die Profitabilität des Unternehmens zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- Böttrich, M., Stelzer, R. & Berkan, D. 2010: Effiziente Generierung von virtuellen Produktfamilien in den frühen Entwicklungsphasen am Beispiel Fahrwerk. In: Brökel, K., Feldhusen, J., Grote, K., Rieg, F., Stelzer, R. (Hrsg.): Herausforderungen für die Produkt- und Prozessinnovation – Tagungsband, 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2010, S. 145–152, Barleben: Docupoint.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (Hrsg.) 2007: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Gekeler, E. W. 2006: Mathematische Methoden zur Mechanik: Ein Handbuch mit MATLAB-Experimenten. Berlin: Springer.
- Joswig, M. & Theobald, T. 2008: Algorithmische Geometrie. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Pott, A. 2007: Analyse und Synthese von Werkzeugmaschinen mit paralleler Kinematik, Universität Duisburg/Essen, Dissertation.
- Schwarz, H. R. 2009: Numerische Mathematik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Kontakt

Dipl.-Ing. Marcel Böttrich
Matthias Sieber, M. Sc.
BMW AG
Forschungs- und Innovationszentrum
Knorrstr. 147
80788 München
www.bmw.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
01062 Dresden
www.tu-dresden.de/mw/imm/ktc

Kevin Kuhlmann, Fabian Klink & Carsten Haugwitz

Optische Vermessung mit Streifenlichtscannern – aus Industrie und Forschung nicht mehr wegzudenken

1 Einleitung

Qualität nimmt als Wettbewerbsfaktor eine immer größere Rolle ein. Damit wächst auch der Bedarf an schneller Messtechnik zur präzisen geometrischen Erfassung unterschiedlicher Werkstücke. Ein weiterer Grund für diesen steigenden Bedarf sind der zunehmende Automatisierungsgrad und die Fertigungsgeschwindigkeit in der Produktion (Pfeifer 1998).

Der Vorteil der optischen 3D-Messung gegenüber konventioneller Koordinatenmesstechnik besteht vor allem in der höheren Erfassungsgeschwindigkeit. Taktile Messgeräte können im Vergleich nur sehr wenige Messpunkte in einer bestimmten Zeit digitalisieren, optische Messgeräte hingegen große Flächen in wenigen Sekunden (Berndt 2008). Des Weiteren ist die optische Messung im Gegensatz zur taktilen Messung berührungslos, wodurch Schäden am Werkstück oder direkte Einflüsse des Werkstücks (weiche Oberflächen) auf die Messergebnisse vermieden werden. In der Fertigungsmesstechnik kommen optische Verfahren vorwiegend zur Bestimmung geometrischer Kenngrößen wie Abstand, Form, Profil oder Oberflächenstruktur zum Einsatz (Pfeifer 1998). So können z. B. in der Automobilindustrie Blechbauteile auf Ihre Maßhaltigkeit hin untersucht werden.

Beim Reverse Engineering werden aus existierenden Körpern mithilfe von geeigneten 3D-Scannern CAD-Daten erstellt. So können z. B. alte Bauwerke oder Maschinen, für die keine Konstruktionszeichnungen verfügbar sind, ins CAD überführt und die Daten dort weiterverarbeitet werden. Genauso können für Designobjekt oder Prototypen CAD-Daten erstellt und draus Zeichnungen für die Fertigung erstellt werden (Beyer 2002).

Technisch gesehen arbeiten alle auf dem Markt verfügbaren optischen 3D Scanner nach demselben Prinzip. Der Hauptunterschied der Systeme liegt in der Software. Da die gesamte Technologie noch relativ jung ist und die Software hohe Entwicklungskosten verursacht, sind professionelle 3D-Scanner sehr teuer. Die Anschaffungskosten verschiedener Systeme reichen von 30.000 € bis hin zu 180.000 €. Um die Vorteile der 3D-Scannens für kleine und mittelständische Unternehmen sowie Hochschulen und Universitäten erschwinglich zu machen, wurde ein »low-cost-scanner« entwickelt. Dieser und die dazugehörige Software werden im Rahmen dieser Arbeit auf Bedienbarkeit und Korrektheit der Messergebnisse untersucht.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik zur optischen Vermessung mit strukturierter Beleuchtung erläutert. Es wird auf die Grundlagen, die Verfahren und die Berechnung der Punktwolke eingegangen.

2.1 Triangulation

Basis für die Erfassung geometrischer Oberflächen ist die Triangulation. Sie entstammt der Geodäsie, welche bereits lange v. Chr. bekannt war und heute Grundlage für die GPS- Navigation ist. Sie nutzt die trigonometrische Funktion zur optischen Abstandsmessung. Bei der für das 3D-Scannen verwendeten Triangulation werden Lichtmuster (Punkte, Linien oder Muster) von einer Beleuchtungseinheit auf das Objekt projiziert, welche dann von einer oder mehreren Kameras erfasst werden. Bei der 0D-Punktmessung wird ein Lichtpunkt auf das Objekt projiziert und mit einer Zeilenkamera oder einer Kamera mit Flächensensor erfasst. Bei der Linien- oder

Profilmessung, welche auch als Lichtschnittverfahren bekannt ist, wird eine schmale Linie, meist die eines Linienlasers, auf das Objekt projiziert. Der resultierende Linienvorlauf auf dem Objekt wird von der Kamera erkannt und das Profil daraus berechnet. Die gängigsten Systeme zur Datenerfassung verwenden das Prinzip der flächenhaften Vermessung. Mithilfe strukturierter Beleuchtung/Streifenprojektion nehmen eine oder mehrere Kameras ein räumliches und ggf. zeitlich moduliertes Lichtfeld, welches mittels eines Projektors auf das zu vermessende Objekt geworfen wird, auf (Gühning 2002).

2.2 Streifenprojektionsverfahren

Das Verfahren der Streifenprojektion wird seit Anfang der 90er Jahre eingesetzt zur flächenhaften 3D-Objekterfassung. Die hohe Messpunktdichte erlaubt präzise Aussagen über die Objektgeometrie. Das in Abbildung 1 dargestellte Messprinzip zeigt einen Projektor, der Streifenmuster auf ein Objekt projiziert, welche in Abhängigkeit von der Form des Objekts deformiert werden. Eine oder mehrere digitale Kameras zeichnen das deformierte Muster auf, als Grundlage für die Bestimmung der Oberflächenform des Objekts (Przybilla 2007).

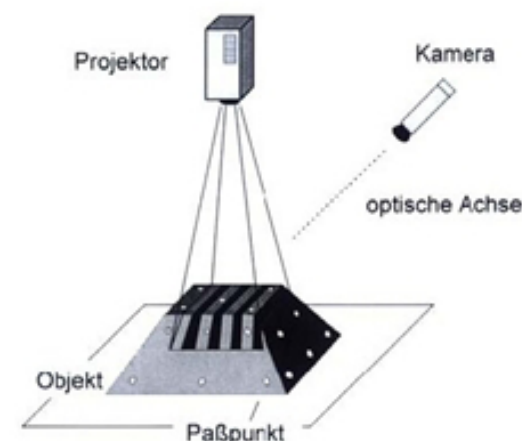


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines Streifenprojektionssystems nach Riechmann und Thielbeer 1997 (Przybilla 2007)

Im einfachsten Fall sind die Projektionseinheit und die Kamera(s) auf einem Messkopf fest montiert. So sind der Abstand (Basis) und der/die Winkel zum Bauteil immer gleich. Die Anordnung und Kalibrierung der Systemkomponenten (Triangulationswinkel, Länge der Basis, Zahl der Kameras etc.) bestimmt die Größe des Messfeldes und auch die Genauigkeit des Systems (Przybilla 2007). Die wünschenswerten Eigenschaften eines idealen Streifenprojektors sind nach Wiora (2001):

- große Schärfentiefe,
- hohe Leuchtdichte,
- exakte und reproduzierbare Positionierung der Muster,
- Projektion von kontinuierlichen und binären Mustern,
- große Mustervielfalt sowie
- schnelles Umschalten zwischen den Mustern.

Die letzten drei Anforderungen beziehen sich auf die Lösung des Korrespondenzproblems, auf das später eingegangen wird.

2.3 Gray-Code und Phase-Shift-Verfahren

Zur Auswertung komplexerer Flächen bzw. Körper wird ein zeitlich modulierte Projektionsmuster verwendet. Ein Binärcode wie die Abfolge von schwarzen und weißen Streifen (siehe Abbildung 1, Zebamuster) ist dazu besonders geeignet. Die Streifenordnung kann dabei zunächst nur relativ zueinander bestimmt werden, da ein absoluter Bezugspunkt fehlt. Auch ist dies nur bei zusammenhängenden, stetigen Oberflächen möglich. Erst durch Lösung dieses sog. Korrespondenzproblems ist es möglich einzelne Merkmale im Objektraum richtig zuzuordnen und dreidimensionale Objektkoordinaten zu berechnen. Um den realen Anforderungen gerecht zu werden, und damit Hinterschneidungen und Unstetigkeiten handhaben zu können, wird der Gray-Code angewandt, der eine einzigartige Beschreibung jedes projizierten Streifens ermöglicht. So kann für jeden Bildpunkt des Projektors eine Bildkoordinate bestimmt werden (Berndt 2008).

Jeder projizierte Streifen, dessen Breite von der Länge des Gray-Codes abhängt, ist durch seine eigene, einzigartige Abfolge von Nullen und Einsen identifizierbar. In der Praxis bedeutet dies, dass die Stel-

le, an der der Streifen liegt, vom Projektor entweder beleuchtet oder nicht beleuchtet wird. Bei einem imaginären Streifen mit dem Gray-Code 010 würde dies bedeuten, dass der Streifen erst schattiert bleibt, in der nächsten Aufnahme beleuchtet wird und in der letzten Aufnahme wieder schattiert bleibt. Auf diese Weise kann man 2^p Streifen (p = Stufe des Gray-Codes) eindeutig identifizieren. Um der Software eine eindeutige Unterscheidung zwischen »beleuchtet« (1) und »unbeleuchtet« (0) zu ermöglichen, ist es nötig, zu Beginn des Scanvorganges Referenzaufnahmen vom vollständig beleuchteten und unbeleuchteten Objekt zu erstellen. Danach wird für jeden Bildpunkt der Mittelwert beider Aufnahmen berechnet. Dieser dient später als Vergleichsschwelle für die Entscheidung, ob ein Punkt beleuchtet wurde oder nicht. Nach den Schwellwert-Aufnahmen erfolgen dann die Streifenprojektionen auf das Messobjekt. Die Anzahl der projizierten Streifen hängt dabei von der aktuellen Stufe des Gray-Codes ab.

Zur Steigerung der Genauigkeit wird das Objekt erst grob mit dem Gray-Code-Verfahren wie zuvor beschrieben vermessen. Danach wird die Oberfläche mit dem Phase-Shift-Verfahren erfasst um die Genauigkeit der Koordinaten zu steigern. D.h. das Bild der höchsten Gray-Code Stufe wird immer um ein halbe Periode verschoben. Eventuelle Mehrdeutigkeiten lösen sich durch die zuvor bestimmten Näherungskordinaten der Objektoberfläche auf (Gühling 2002).

2.4 Berechnung

Um die 3D-Koordinaten eines Punktes zu berechnen, ist sowohl die Information über seine Koordinaten auf dem Bildsensor der Kamera als auch die Nummer des Streifens auf dem Muster vonnöten. Außerdem müssen der Abstand (Basis) zwischen der Lichtquelle und Kamera sowie deren Winkel zueinander bekannt sein. In Abbildung 2 werden die Winkelbeziehungen im Triangulationsdreieck verdeutlicht (Wiora 2001).

Die Genauigkeit der Messung wird bei Triangulationsverfahren maßgeblich durch die Objektqualität der Kamera, durch die Oberflächentextur sowie durch den Triangulationswinkel festgelegt. Je größer der Winkel ist, desto höher ist die Messgenauigkeit am Ob-

jekt. Ein großer Winkel führt aber zur Problematik der Abschattung, d. h. je größer der Triangulationswinkel ist, desto höher ist die Gefahr, dass größere Bereiche der Oberfläche nicht für die Kamera sichtbar und damit nicht erfassbar sind. So sind Bohrungen nur bis zu einem bestimmten Durchmesser-Tiefe-Verhältnis messbar. Deswegen haben sich für dieses Aufnahmeverfahren Triangulationswinkel von ca. 25° bis 45° bewährt. Positiven Einfluss auf die Messunsicherheit nehmen theoretisch eine geringere Streifen-/Linienbreite und eine damit einhergehende feinere Abtastung der Oberfläche. Dem entgegen steht allerdings die begrenzte Auflösung der Kameras, die eine bestimmte Mindestbreite der Streifen/Linien erfordern (Berndt 2008).

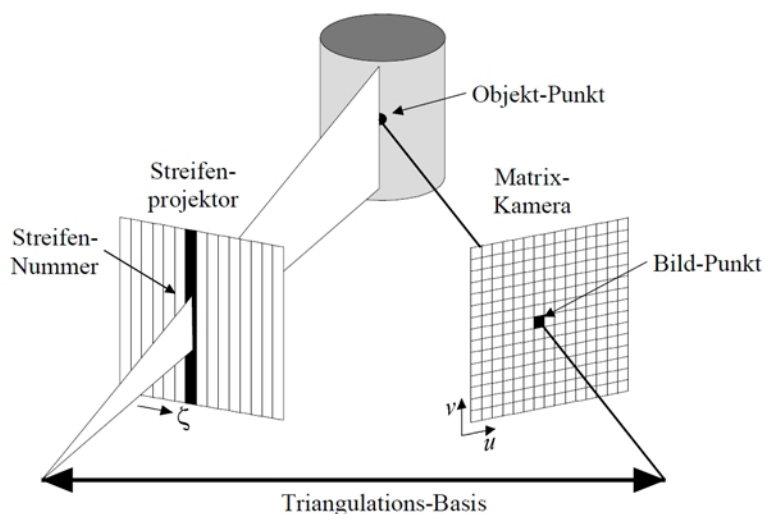


Abbildung 2: Schematische Darstellung der aktiven Triangulation mit strukturierter Beleuchtung (Wiora 2001).

3 Scanner und Messobjekt

3.1 Hard- und Software

Als Streifenlichtprojektor kommt der Epson EB-824H zum Einsatz. Er erreicht eine Auflösung von 1024×768 Bildpunkten bei 32 Bit Farbtiefe. Sein maximaler Lichtstrom beträgt 3000 ANSI-Lumen. Fokus und Zoom müssen manuell eingestellt werden. Projektionsverhältnisse sind im Bereich von 1,38:1 bis 2,24:1 möglich. Die eingesetzte E-TOR-Lampe («Epson-Twin Optimized Reflection Lamp») wird mit 200 Watt Leistungsaufnahme betrieben und erreicht im normalen Betrieb eine Lebensdauer von etwa 5.000 Stunden.

Als Sensoren dienen zwei uEye-Kameras des Herstellers IDS. Ausgestattet sind diese mit einer USB 2.0-Schnittstelle und den Objektiven »HF9HA-1B« von FUJINON. Die CMOS-Sensoren der Kameras arbeiten mit 1,3 Megapixeln bei 8 Bit Farbtiefe, was einer Auflösung von 1280×1024 Pixeln entspricht. Die maximale Bildaufnahmezeit liegt bei 25 Bildern pro Sekunde. Die Belichtungszeiten liegen im Bereich zwischen $35 \mu\text{s}$ und 980 ms. Aufgebaut sind die drei Teile auf einer eigens konstruierten und gefertigten Halterung, die es erlaubt die Abstände, Winkel und Neigungen der Kameras und des Beamers zueinander zu verändern. Bei der Konstruktion sowie der eingesetzten Software handelt es sich um Eigenentwicklungen.

Die Software, mit der die einzelnen Aufnahmen schrittweise erzeugt werden, heißt »M3DScan«. Nach dem Export der Punktwolken stehen diese für den Import in die Software »ICP3« zur Verfügung.

3.2 Messobjekt

Ein Messobjekt muss bestimmte Anforderungen erfüllen. Nach Dutschke (1993) werden die in der optischen Messtechnik zu ermittelnden geometrischen Maße in folgende Gruppen unterteilt:

- Längenmaß,
- Winkelmaß,
- Formmaß,
- Lagebeziehung und
- Oberflächenrauheit.

Als Messobjekt wird ein Körper gewählt, welcher bei Programmierübungen für Koordinatenmessmaschinen genutzt wird. Er erfüllt alle gestellten Anforderungen. Auch die optische Eigenschaft, einer matten Oberfläche, die für das Messverfahren notwendig ist, wird erfüllt. Das Messobjekt besitzt verschiedene Formelemente wie (Stufen-)Bohrungen, winkelige Flächen und parallele Flächen. Vorteilhaft ist die Tatsache, dass das Objekt bereits taktil vermessen wurde und diese Messdaten als Referenzwerte benutzt werden können.

4 Versuchsaufbau und -durchführung

Ziel der Versuchsdurchführung ist die vollständige Digitalisierung des Messobjekts mit anschließender Validierung der Messergebnisse. Für alle Scanvorgänge werden der Projektor und die Kameras nach den Vorgaben der Bedienungsanleitung angeordnet. Der zu vermessende Körper wird auf eine, mit zufällig angeordneten Positionsmarkern beklebte, Platte gelegt (siehe Abbildung 3). Die Platte ist horizontal drehbar, wodurch der zu vermessende Körper nicht relativ zum Markerfeld bewegt werden muss.

Nach Aufnahme der einzelnen Punktwolken werden diese exportiert und anschließend in ICP3 importiert, um dort weiter bearbeitet zu werden. Dazu gehören Arbeiten wie das Zusammensetzen der einzelnen Punktwolken zu einem geschlossenen Modell, dem Löschen überflüssiger Daten, die Glättung der Oberfläche sowie das Schließen von Löchern. Der Export des fertigen 3D-Modells erfolgt in das universelle STL-Format.

Das erstellte 3D-Modell wird mit der Software GOM Inspect, wie in Abbildung 4 dargestellt, inspiziert. Das Programm enthält alle Features, die nötig sind, um die mit ICP3 erstellten Modellnetze zu prüfen und die gewonnenen Daten zu protokollieren. So ist es möglich, die Punktwolke des Streifenlichtscanners über die taktil ermittelte Wolke (Referenz/Sollwerte) zu legen und beide miteinander zu vergleichen. Jedes Formelement wird untersucht. Bohrungen werden z.B. auf Rundheit, Konzentrität und Position untersucht, Ebenen auf Position und Parallelität, Winkeligkeit.

5 Auswertung der Ergebnisse

Zunächst lässt sich feststellen, dass die Hardware und die Konstruktion der Halterung einen soliden Eindruck erwecken. Die Bauteile sind scheinbar gut aufeinander abgestimmt. Die englischsprachige Bedienungsanleitung ist leicht verständlich und wird durch Abbildungen unterstützt. Das Einrichten des Scanners und die Aufnahme der Punktwolken mit dem Programm M3DScan funktioniert sehr gut. Jedoch scheint die Software ICP3 noch nicht ausgereift, so stellen sich bei der Arbeit mit ihr einige Probleme heraus. Zum Beispiel müssen die einzelnen Punktwolken einzeln in ICP3 importiert werden. Dies kostet enorm viel Zeit. Bei der anschließenden Zusammenfügung und Bearbeitung der Punktwolke gibt es keine Rückgängig-Funktion. D.h. sollte einmal ein Fehler unterlaufen sein, muss der Prozess wieder beim Importieren der Punktwolken begonnen werden. Alternativ ist es möglich die Arbeit nach jedem Schritt zu speichern, was aber aufgrund der Datenmenge bis zu mehrere Minuten dauern kann. Letztendlich lässt sich mit dem System, verbunden mit viel zeitlichem Aufwand, ein ansehnliches CAD-Modell erstellen.

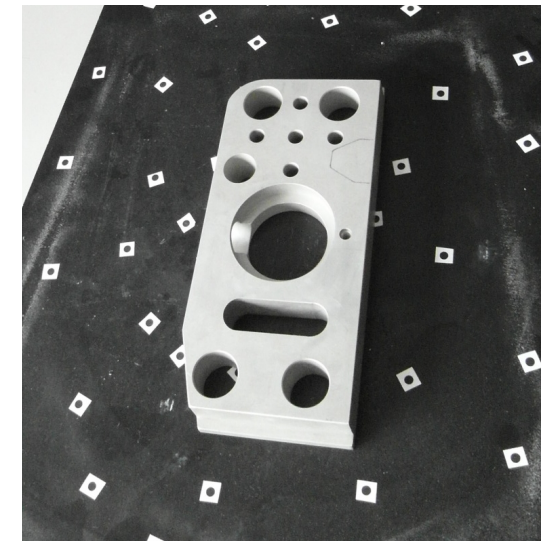


Abbildung 3:
Versuchskörper
auf mit Markern
beklebte Platte

Wie bereits im Stand der Technik erwähnt ist ein systematisch bedingtes Problem optischer Scanner, denen das Triangulationsprinzip zugrunde liegt, dass Bohrungen, ab einem bestimmten Verhältnis von Durchmesser zu Tiefe, nicht mehr vollständig erfasst werden können. Dieses Problem wird exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt. An den schwarz gefärbten Bereichen ist deutlich erkennbar, dass dort keine Oberflächenpunkte erfasst wurden und demzufolge Lücken im Oberflächennetz vorliegen. Im Vergleich die obere Bohrung mit großem Durchmesser ist vollständig erfasst.

Die weitere Auswertung der Messungen zeigt, dass die systematische Abweichung der ermittelten Bohrungsdurchmesser durchschnittlich 0,14 % kleiner als die der Koordinatenmessmaschine ausfallen. Des Weiteren weichen die Ebenheitswerte der einzelnen Ebenen mit 1480 % erheblich vom Referenzergebnis ab. Besonders sticht die Unebenheit der Ebene D2_D3 hervor. Dies ist auf die Wulstbildungen an Kanten, die für den Scanner ein Problem darstellen, zurückzuführen und wird exemplarisch in Abbildung 6 gezeigt.

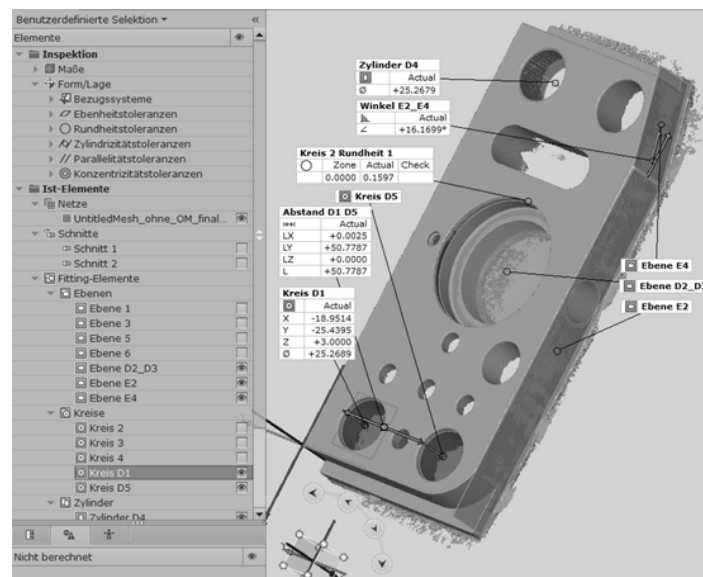


Abbildung 4: Inspektion mit GOM Inspect

Dabei liegen die Bereiche an der Kante weit über der Referenzebene und die dahinterliegenden weit darunter. Die gemessenen Abstände der Ebenen E1 und E2 sowie die Abstände D1/D4 und D1/D5 weisen eine systematische Maßabweichung von 0,03 %, -0,0068 % und -0,009 % zum Referenzwert auf. Diese vergleichsweise gute Maßhaltigkeit kann dadurch erklärt werden, dass die genutzten Ebenen aus großen Bereichen des Netzes gemittelt werden. D. h. die Ebenen werden geglättet, der Durchschnitt wird bewertet und daher Messfehler im Positiven bzw. Negativen durch den Fitting-Prozess ausgeglichen. Dies spiegelt sich auch beim Winkel zwischen Ebene E2 und E4 wieder, der eine durchschnittliche Abweichung von 0,0023 % bzw. 0,0004 ° aufweist. Allgemein zeichnet sich ab, dass die Lagemerkmale Abstand und Winkeligkeit, die aus Fitting-Elementen wie Ebenen und Kreisen bestimmt werden, eine relativ geringe Größtabweichung von höchstens 0,1 % bzw. eine absolute Größtabweichung von 0,077 mm in der Länge und 0,0081 ° beim Winkel aufweisen. Sie liegen damit in den Grenzen der vom Hersteller angegebenen 3D-Punktgenauigkeit von 0,05 mm bzw. 0,085 mm, je nach Messraum. Tendenziell ist festzustellen, dass bei größeren Bohrungen die Formhaltigkeit näher am Referenzwert liegt, bzw. die Größtabweichung abnimmt. Die Größtabweichung der Konzentrität liegt bei 107 %. Die Zylinderformabweichungen sind bei allen Messreihen ähnlich weit vom Referenzergebnis entfernt. Es ist nicht geklärt ob oder inwieweit diese mithilfe rechnerischer Korrektur ausgeglichen werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In den durchgeführten Untersuchungen wird die Eignung der gelieferten Hardware und Software für das Reverse Engineering und die Qualitätssicherung mit einem Prüfkörper bestimmt. Zunächst wird der Körper von allen Seiten erfasst und die Aufnahmen anschließend weiterverarbeitet. Dabei werden auch Praxisprobleme im Umgang mit dem ProtoScan aufgezeigt. So zum Beispiel fehlende Funktionen beim Programm und der hohe Zeitaufwand zum Erstellen einer geschlossenen Punktwolke. Mit einer Inspektionssoftware werden Form- und Lagemerkmale des Modells mit den bereits bekannten Ergebnissen einer Koordinatenmessmaschine verglichen. Die Er-

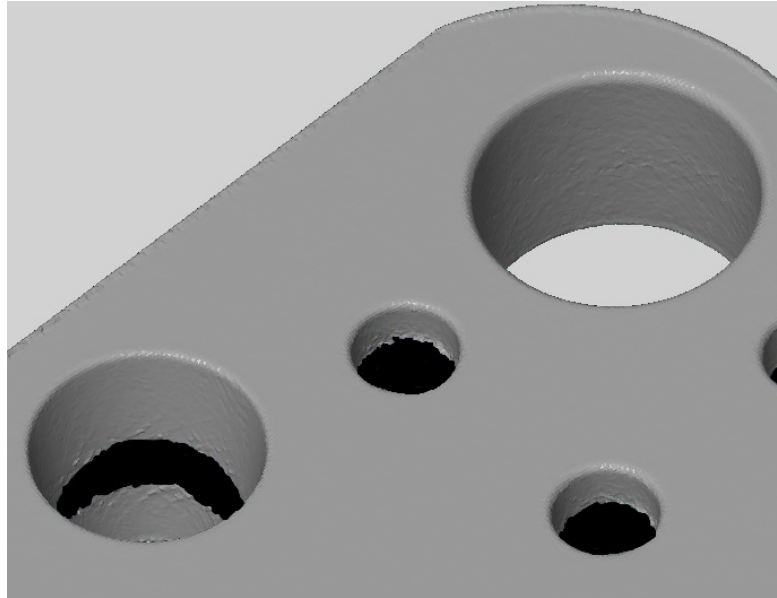


Abbildung 5: Nicht erfasste Bereiche innerhalb von Bohrungen

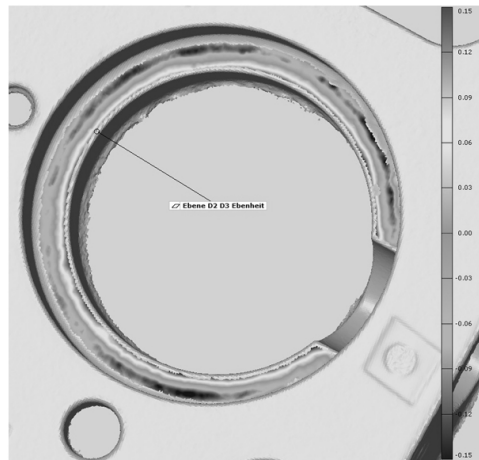


Abbildung 6:
Wulstbildung an Kanten

gebnisse zeigen, dass die Messreihen große Abweichungen im Bereich der Formhaltigkeit (Zylindrizität, Rundheit, Ebenheit) aufweisen. Hingegen wurden Lageabweichungen, wie die Abstände von Ebenen oder Bohrungen, sowie die ermittelten Winkel zwischen Ebenen wesentlich präziser bestimmt. Daher ist dem Scanner mit Einschränkungen eine wesentlich bessere Eignung zur Kontrolle von Lagemerkmalen als von Formmerkmalen zuzuschreiben. Beim Einsatz in der Qualitätssicherung ist so die Überprüfung der richtigen Positionierung einer Bohrung möglich, aber nur bedingt, ob die Bohrung den korrekten Durchmesser aufweist. Es ist zu klären, ob die hohen Abweichungen der Formhaltigkeit auf der Genauigkeitslimitierung durch die maximale 3D-Punktgenauigkeit beruhen. Dies ist aber ohne Modifikationen der Hardware (Beamer, Kameras) nicht durchführbar.

Für einen Einsatz im Reverse Engineering spricht, neben den niedrigen Anschaffungskosten, seine Flexibilität, die nur bei stark reflektierenden beziehungsweise sehr dunklen Oberflächen oder abrupten Farbübergängen an ihre Grenzen stößt. Der ProtoScan stellt somit eine preislich attraktive Alternative für den Einstieg in Reverse Engineering- und Qualitätssicherungsanwendungen im Vergleich zu wesentlich teureren Scannern dar.

Literaturverzeichnis

- Berndt, D. 2008: Optische 3-D-Messung in der industriellen Anwendung, Magdeburg: Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
- Beyer, C. 2002: Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten, Aachen: Shaker Verlag
- Dutschke, W. 1993: Fertigungsmesstechnik, Stuttgart: B. G. Teubner Verlag
- Güthing, J. 2002: 3D-Erfassung und Objektkonstruktion mittels Streifenprojektion, Stuttgart: Bayerische Akademie der Wissenschaften
- Pfeifer, T. 1998: Fertigungsmeßtechnik, München Wien: R. Oldenbourg Verlag
- Przybilla, H.-J. 2007: Streifenprojektion – Grundlagen, Systeme und Anwendungen, Bochum: Hochschule Bochum
- Wiora, G. 2001: Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren, Heidelberg: Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg

Kontakt

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kevin Kuhlmann
kuhlmann@ovgu.de
0391/ 67 12054
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
www.ovgu.de

Ute Dietrich, Marc Glauche & Jörg P. Müller

Produktstrukturbeeinflussende Gestaltungskriterien am Beispiel von Offshore-Windkraftanlagen

Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen beruht zunehmend auf der Fähigkeit der informationstechnischen Beherrschung und Optimierung des Produktlebenszyklus, wobei die Komplexitätsbeherrschung vermehrt als Kernkompetenz zur Erlangung eines strategischen Wettbewerbsvorteils begriffen wird. Im Mittelpunkt stehen die steigende Komplexität der Produkte und deren informationstechnische Abbildung. Die Produktstruktur gilt hier als der wichtigste Komplexitätstreiber in einem Unternehmen (Ghaffari 2007, Wüpping 2003). Damit werden in zunehmendem Maße die systematische Produktgestaltung und der transparente Aufbau bzw. die Abbildung der Produktstruktur der erste Schritt, um Komplexität zu verstehen und zu gestalten (Schuh & Schwenk 2007).

Da die Produktstruktur auch die gemeinsame verbindliche Datenbasis für alle Prozesse und Prozesspartner ist, gewinnt der Einfluss der Komplexität auf die informationstechnische Abbildung ebenfalls an Bedeutung. Die Innovationsfähigkeit und damit die schnelle Reaktion auf sich ändernde Märkte sind nur durch eine verstärkte informationstechnische Verzahnung der einzelnen Phasen möglich. Ohne eine funktionierende Produktstruktur sind Prozesse zur Leistungserstellung nicht mehr umsetzbar, eine handlungsfähige Struktur erhält Entscheidungscharakter (Pulm 2004).

Dies gilt in besonderem Maße für eine erfolgreiche Durchführung von Offshore-Windpark- Vorhaben, bei der hohe Anforderungen an alle Beteiligten in Bezug auf Planungen für Beschaffungen, Installation, Inbetriebnahme, Betrieb und letztlich Rückbau gestellt werden. Im Laufe dieser Phasen fallen erhebliche Datenmengen an, die einander bedingen bzw. entsprechende Abhängigkeiten beinhalten und letztlich durch eine arbeitsfähige Produktstrukturierung präsentiert werden müssen. Windparks besitzen zudem einen spezifischen Lebenszyklus. Auch in Offshore-Windpark-Produkten werden bereits in der Planungsphase die entscheidenden Kosten für alle folgenden Lebenszyklusphasen festgelegt, allerdings mit der Besonderheit, dass hier der Grundstein für ein auf 25 Jahre ausgerichtetes Projekt gelegt wird. Schwächen und Fehler in dieser Phase wirken sich im ungünstigsten Fall während der gesamten Betriebsdauer aus. Planungsentscheidungen haben zudem einen entscheidenden Einfluss auf den Rückbau- und die Recyclingmöglichkeiten von Anlagen. Die hier gefundenen Lösungsstrategien bestimmen einen enormen Teil der zu erwartenden Probleme und Kosten und sind mit ausschlaggebend für den Erfolg des Gesamtkonzeptes. Eine arbeitsfähige Struktur gilt hier als Garant für die Wettbewerbsfähigkeit.

Problemfelder der Produktstrukturierung

Kennzeichnend für die Produktstrukturierung ist deren unternehmens- und lebenszyklusübergreifende Funktion. Sie unterliegt damit auch den Einflüssen, die sich aus dieser Querschnittfunktion ergeben. So ist die Produktstruktur als informationstechnischer Backbone die Manifestation der auf ihr abgebildeten Prozesse sowie der produktimmanenten Komplexität und den kontinuierlichen Änderungen, also der Dynamik, die sich daraus ergibt. Im Mittelpunkt der Produktstrukturierung steht das Produkt (Schuh & Schwenk 2001) mit allen für die Produkterstellung notwendigen Informationen. Diese Informationen dienen dem Erreichen der Entwicklungsaufgabe und entscheiden durch Qualität und zeitnahe Bereitstellung über deren Erfolg.

Aus der systemtheoretischen Perspektive bedeutet die Gestaltung des Systems Produktstruktur die Gestaltung der Elemente und ihrer Beziehungen durch einen Systemgestalter (Göpfert 2009). Die

Schwierigkeit für den Systemgestalter liegt in unklaren Gestaltungssituationen, resultierend aus den Wechselwirkungen zwischen den Elementen der Produktstruktur und deren Beziehungen. Diese Unklarheit der Gestaltungssituation der Produktstruktur beschreibt (Göpfert 2009) anhand der Dimensionen Komplexität, Neuartigkeit, Dynamik und Zielunklarheit.

Diese Bestimmungsgrößen werden jedoch dem wachsenden Einfluss der Informationstechnologie nicht gerecht. Eine Produktstruktur muss nach (Schuh & Schwenk 2001) auf die Informationssysteme im Unternehmen abgestimmt sein und daher um die Dimension der semantischen Konsistenz erweitert werden (Fischer et al. 2011).

Das Spannungsfeld, worin sich die Produktstrukturierung bewegt kann demnach über die folgenden fünf Dimensionen beschrieben werden (siehe Abbildung 1).

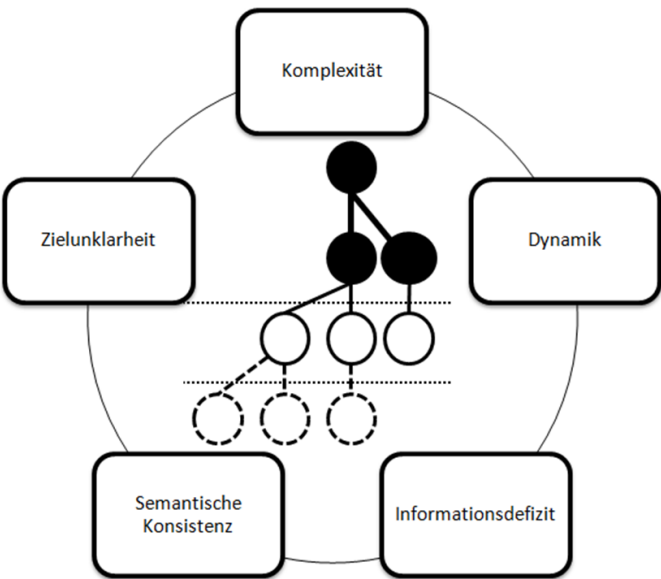


Abbildung 1: Problemfelder der Produktstrukturierung

- Informationsdefizite, also dem Fehlen von Lösungswissen;
- Zielunklarheit, die oftmals unpräzise, mehrdeutig, veränderliche oder gar widersprüchlich Zielformulierung (Göpfert 2009);
- Komplexität, die Produkt- bzw. technische Komplexität, wie auch in der Prozess- bzw. organisatorischen Komplexität (Jania 2004, Göpfert & Steinbrecher 2000);
- Dynamik, dem zeitlichen Verhalten eines Systems und damit die Veränderungen der Systemelemente im Zeitablauf;
- semantische Konsistenz, dem Zusammenspiel und den wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen zu realisierenden Anwendungsfällen einerseits und Authoring- und Datenmanagementsystemen andererseits (Fischer et al. 2011).

Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit durch die informationstechnische Beherrschung des Produktlebenszyklus sind arbeitsfähige Strukturen erforderlich, die einen multidisziplinären Entwicklungsprozess unterstützen. Um den vielfältigen Zielsetzungen aus allen Phasen des Produktlebens gerecht zu werden, insbesondere bei komplexen, variantenreichen Produkten mit einem langen Lebenszyklus, ist eine geeignete Strukturierung unumgänglich. An eine Struktur müssen daher allgemei gültige Anforderungen gestellt werden. So muss die Produktstruktur die Realisierung der fachlichen Anforderungen performant, stabil und in der Handhabung einfach über einen langen Zeitraum unterstützen. In diesem Zusammenhang kann man von der Arbeitsfähigkeit, also der Fähigkeit der Produktstruktur eine konkrete Aufgabe unter bestimmten Ausführungsbedingungen zu bewältigen, verstehen. Die Arbeitsfähigkeit kann auch als Effizienz übersetzt werden, mit der die o. g. Punkte auf der Struktur umgesetzt werden. Die über die Arbeitsfähigkeit definierte Struktur wird im Folgenden Produktdatenstruktur genannt.

Die aktuell diskutierten Ansätze haben die Beherrschung der Komplexität im Rahmen der Produktstrukturierung zum Ziel. So liefert

die Methode von Zagel (2006) bereits eine Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren, während bei Rapp (2010) auf eine Vorgehensweise zur Entwicklung von modularen Produktstrukturen als Erzeugnisgliederung für Entwicklung, Montage und Vertrieb eingegangen wird. Aspekte die bei den bestehenden Methoden zur Produktstrukturierung nicht ausreichend betrachtet werden sind:

- Identifikation und Analyse von strukturbeeinflussenden Faktoren über die Produktimmanente hinaus sowie die
- Ableitung von Maßnahmen zur Beherrschung der Auswirkungen auf die Strukturierung durch die Einflussfaktoren.

Eine Weiterentwicklung der bestehenden Ansätze ist daher erforderlich. Der hier vorgestellte Ansatz beinhaltet Bausteine, die dem Systemgestalter der Produktdatenstruktur in deren Gestaltung unterstützen. Diese Bausteine werden im Folgenden Lösungselemente genannt und setzen sich aus Einflussfaktoren, Gestaltungsrichtlinien und Strukturbausteinen zusammen.

Lösungselemente der Produktstrukturierung

Die zentralen Fragestellungen bei der Entwicklung der Produktdatenstruktur sind technischer wie auch organisatorischer Natur und richten sich u.a. an den Aufbau oder die Herstellung des Produktes wie auch an die Zerlegung des Prozesses zur Leistungserstellung auf Aufgabenträger.

Der hier vorgestellte Ansatz zur Entwicklung einer arbeitsfähigen Produktdatenstruktur fokussiert auf die Lösungselemente, bestehend aus Strukturbausteinen, Einflussfaktoren und Gestaltungsrichtlinien. Eingebettet in eine Methode liefert das hier im Folgenden vorgestellte Vorgehen eine Möglichkeit zur Überwindung der Probleme der Produktstrukturierung, indem die einzelnen Problemfelder durch Lösungselemente adressiert werden.

Die in diesem Beitrag skizzierte Methode definiert ein prinzipielles Vorgehen zur Entwicklung einer arbeitsfähigen Produktstruktur. Das

Ziel der Methode mit den einzelnen Lösungselementen ist eine auf die identifizierten Einflussfaktoren, Gestaltungsrichtlinien und Anforderungen abgestimmte Produktstruktur. Mittels dieser Methode werden Rahmenbedingungen für die zu entwickelnde Struktur festgelegt. Die Zieldefinition in Form der Festlegung des Geschäftsziels steht hier an oberster Stelle. Daraus werden auf der operativen Ebene die einzelnen zu erfüllenden Anwendungsfälle abgeleitet und u.a. Festlegungen für die einzusetzenden Systeme und einzubindenden Organisationseinheiten getroffen. Aus dem daraus adressierten Lösungsraum können anschließend die relevanten Einflussfaktoren identifiziert werden.

Einflussfaktoren haben Auswirkung auf die Komplexität der Produktdatenstruktur (Zagel 2006) und deren Arbeitsfähigkeit. Die Analyse der Einflussfaktoren bezogen auf die Komplexität und Arbeitsfähigkeit der Produktdatenstruktur ermöglicht die Festlegung der Auswirkung und unterstützt damit die Entscheidungsfindung. Sie erzwingen zu ihrer Beherrschung eine Analyse in einer frühen Phase der Produktentwicklung.

Zu den relevanten Einflussfaktoren gehören :

- Einflussfaktoren aus Sicht des zu erstellenden Produktes und damit der Funktionen die die einzelnen Elemente realisieren und aus dem Verständnis der Verbindung der Einzelteile und Baugruppen untereinander;
- Einflussfaktoren aus der zugrundeliegenden Organisation;
- Einflussfaktoren aus dem Prozess zur Leistungserstellung;
- Einflussfaktoren aus der zugrundeliegenden IT-Technologie und den Abbildungsunterschieden in diesen Systemen sowie
- Externe Einflussfaktoren, beispielsweise aus der Notwendigkeit der Rückverfolgbarkeit einzelner Bauteile und Baugruppen sowie der Ersatzteilproblematik.

Den zweiten Lösungsbaustein stellen die Gestaltungsrichtlinien. Sie bilden Richtlinien für die Entwicklung einer arbeitsfähigen

Produktdatenstruktur und resultieren zum einen aus den Anforderungen und dem Problemfeld der Produktstrukturierung und zum anderen aus den Einflussfaktoren. Zu den allgemeingültigen Gestaltungsrichtlinien gehören nach Reinecke (2010) u. a.:

- die Angleichung der externen Varianz an die vom Markt geforderte sowie
- die Reduzierung der internen Varianz unter Berücksichtigung der Externen.

Eine weitere Bestimmungsgröße für Gestaltungsrichtlinien sind die Einflussfaktoren. So erfordert beispielsweise die Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen die Trennung von Geometrie und Lage und liefert damit eine Gestaltungsrichtlinie. Die konkrete Ausgestaltung innerhalb einer Struktur lassen Gestaltungsrichtlinien offen. Sie bilden vielmehr eine Richtlinie für die zu entwickelnde Struktur. Für die konkrete Ausgestaltung innerhalb der Struktur dienen Strukturbausteine. Sie ergeben sich aus den Einflussfaktoren und den Gestaltungsrichtlinie und beschreiben den grundlegenden Aufbau eines bestimmten Ausschnitts der Struktur. So erfordert beispielsweise die Trennung von Geometrie und Lage eine bestimmte Ausgestaltung der Struktur, die in einem Strukturbaustein als Template beschrieben wird. Mithilfe der Strukturbausteine wird dem Gestalter der Produktstruktur ein Mittel an die Hand gegeben, dass ihn in die Lage versetzt, Strukturen auf Basis von erprobten Bausteinen zu entwickeln.

Aufgrund der Komplexität bei der Entwicklung von Produktdatenstrukturen ist deren Bewertung in einer frühen Phase von entscheidender Bedeutung. Für die Bewertung eignen sich Kennzahlen zur Operationalisierung der an die Struktur gestellten Anforderungen, sowie Testfälle zur Prüfung der fachlichen Anforderungen. An dieser Stelle sei auf die Arbeiten von Reinecke (2010) und Bles (2011) verwiesen.

Szenario Offshore Windkraft

Unabhängig von der Anwendung im Onshore- oder Offshore-Bereich, der Bauform oder dem konstruktivem Aufbau ist allen Wind-

energieanlagen die Wandlung der kinetischen Energie der bewegten Luftmasse in mechanische Rotationsenergie gemeinsam. Eine in der See aufgestellte Windenergieanlage muss dabei den schwierigen Betriebsbedingungen auf dem Meer gerecht werden, die in der Planung und Konstruktion sowohl der Anlage und Infrastruktur als auch bei der Planung des Transportes, der Montage und insbesondere der Instandhaltung einbezogen werden müssen. Im Offshore-Einsatz gilt es, die nachfolgenden, spezifischen produktstrukturbeeinflussenden Gestaltungskriterien zu berücksichtigen (Hau 2008, S. 681ff):

Die Turbulenzintensität über der offenen See ist geringer, allerdings muss je nach gewähltem Anlagenabstand mit einer höheren induzierten Turbulenz im Feld, bedingt durch den Strömungsnachlauf der Nachbaranlagen, gerechnet werden,

- Der Welleneinfluss des Wassers auf die Belastung der gesamten Anlage inklusive der Extremlastung durch eine sog. »Jahrhundertwelle«.
- Es kommt zu hohen Extremlasten durch Eisgang im Meer, insbesondere der Ostsee, und Eisansatz an der Anlage
- Der Einfluss auf das Belastungsspektrum durch die Veränderung der Meeresspiegelhöhe aufgrund der Gezeiten
- Berücksichtigung der Meeresströmungen sowie die dadurch verbundene »Ausolkung« des Seebodens auf das Lastspektrum, insbesondere auf die Fundamentstrukturen
- Der Einfluss des Meerwassers und des Salzgehaltes sowie der hohen Luftfeuchtigkeit in Bezug auf Korrosion und Dauerfestigkeit

Prinzipiell fördert und begünstigt das hohe Windaufkommen und die geringere Oberflächenrauheit auf See den Betrieb von Windenergieanlagen im Offshore-Bereich. Gleichzeitig muss man sich hier der problematischen und sensiblen Umweltbedingungen bewusst sein, die große Herausforderungen an eine technische Umsetzung mit sich bringen. Die wichtige Forderung, dass alle wesentlichen

Komponenten einer Windkraftanlage eine wirtschaftlich kalkulierbare Lebensdauer von mindestens zwanzig Jahren erreichen müssen, ist Offshore noch unverzichtbarer als Onshore. Ohne eine entsprechende Einrichtungs-, Wartungs-, und Instandhaltungsstrategie ist die Aufstellung von Windkraftanlagen in großem Stil hier wirtschaftlich nicht zu vertreten.

Die Erarbeitung einer Methodik zur Ermittlung der Auswirkungen von Einflussfaktoren auf die Strukturierung, und damit die Ausprägung einer Produktstruktur sowohl für die einzelnen Offshore-Windkraftanlagen als auch für das Gesamtprodukt Windpark ist hier deshalb so wichtig, da die aufzuwendenden Mittel stetig ansteigen und somit schnell über Erfolgsaussichten und damit über das eingebrachte Geld sowie die zu verantwortende Zeit entschieden werden muss. Die Art und der Grad der Beeinflussung legen bereits zu Beginn unterscheidbare Vorgaben für das Projekt fest, auf denen aufbauend Struktur-Gestaltungsrichtlinien ableitbar sind. Einflussfaktoren und Gestaltungsrichtlinien bestimmen so Grenzen, Umfang und Bestandteile des Projektablaufs auch in Hinblick auf die im Folgenden fokussierte Wartungs- und Instandhaltungsstrategie.

Im Offshore-Bereich erhält die Fehlerfrüherkennung und Zustandsüberwachung der Windenergieanlagen aufgrund ihres großen Einflusses auf die Wirtschaftlichkeit eine steigende Bedeutung. Der Zugang zu Offshore-Windparks ist durch die Wetter- und Seebedingungen erheblich eingeschränkt. Wartungsintervalle müssen somit frühzeitig geplant werden. Zur Ermittlung wichtiger Kostenindikatoren lassen sich, basierend auf der spezifischen WEA-Charakteristik, unterschiedliche Instandhaltungsstrategien für unterschiedlich gefährdete Komponenten ableiten. So lassen sich bei präventiver Instandhaltung die „normalen“ Stillstandszeiten während Flautephasen besser nutzen, um ohnehin fällige Instandhaltungstätigkeiten an den Anlagen auszuführen. Die ereignisbasierte Instandhaltung kann dagegen Kosten sparen, sofern die Möglichkeit schneller Reaktionen auf den Schadenszustand bestehen.

Der optimale Einsatz dieser Strategien wird durch die Klassifikation der Komponenten nach dem Gefährdungsgrad erleichtert

(Orosa et al. 2010). Um Kosten und Aufwand gering zu halten, müssen Wartungsintervalle aufbauend auf diesen Gefährdungsklassen und unter Berücksichtigung der begrenzten Zugangsmöglichkeiten der Anlagen frühzeitig geplant werden. Teile, die sehr wichtig für den störungsfreien Betrieb der Anlage sind und die Produktivität bestimmen, dürfen keinesfalls ausfallen (Krüder 2006). Hier müssen die Instandhaltungsmaßnahmen eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Bauteile sicherstellen. Komponenten dieser Gefährdungsklasse werden daher in der Regel eine vorbeugende Strategie fahren. Mit weniger kritischen Bauteilen kann man dagegen eine kostengünstigere Crash-Instandhaltung betreiben.

Zur Senkung der Betriebs- und Instandhaltungskosten von Offshore-Windkraftanlagen ist einer der wichtigsten Schritte die Schaffung und Verwaltung einer hinreichenden Datenbasis. Die Anforderungen an die Instandhaltung liegen nach Jung (2009) in:

- der Erhöhung der Prozesstransparenz,
- dem effizienten Management,
- einer abgesicherten Kostenplanung sowie der
- Nutzungsdaueroptimierung durch Baugruppentausch.

Der frühzeitigen Festlegung geeigneter Instandhaltungsstrategien und dem Management dieser Instandhaltungsprozesse kommt somit in Hinblick auf Ausfall und Rentabilität der Offshore-Windkraftanlagen eine gesonderte Bedeutung zu.

Wie oben beschrieben sind die relevanten Einflussfaktoren für die Abbildung der Instandhaltungsstrategie demnach

- der Aufwand der Wartung,
- ökonomische Faktoren sowie
- der Grad der Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen und Prozessen.

Aus den Anforderungen und den Einflussfaktoren der Instandhaltung für Offshore Anlagen können damit zwei Gestaltungsrichtlinien abgeleitet werden. Erstens sind vor dem Hintergrund ökonomischer Faktoren eine Erhöhung der Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen und Prozessen sowie die Schaffung

von Transparenz anzustreben. Zweitens erfordern ökonomische Faktoren sowie die Komplexität der Wartung die Abbildung der Wartungsstrategie in einer frühen Phase des Projektes Windpark. Für die Produktdatenstruktur leiten sich damit folgende Gestaltungsrichtlinien ab:

- Trennung von Geometrie und Lage zur Erhöhung der Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen
- Entkopplung von Zugriffsrechten und Lebenszyklus zwischen Konstruktionsergebnissen und Wartungsstrategie.

Die Abbildung der Instandhaltungsstrategie erfordert Elemente, auf denen vor dem Hintergrund der Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen, der Reifegrad und Lebenszyklus der Instandhaltung abgebildet werden kann. Die Trennung von Wartungsstrategie und Bauteilen erleichtert zudem eine getrennte Abbildung von Berechtigungsräumen und Lebenszyklen. Damit können Wartungsstrategien einmal definiert und beschreiben und für beliebig viele Bauteile einer Offshore Anlage verwendet werden. Der Unterschied zur reinen Attributierung und Klassifizierung liegt in der feineren Granularität und besseren Steuerbarkeit der Abbildung. Definierte Verantwortungsbereiche und Berechtigungsräume sind den einzelnen Ebenen und Ausschnitten der Produktdatenstruktur direkt zuordbar. Die Vorteile dieser Art der Abbildung sind:

- eindeutige Zuordnung von Verantwortungsbereichen,
- Erhöhung des Grads der Wiederverwendung durch die Entkopplung von Produkt- und Bauteillebenszyklus mit Wartungsstrategie und damit die Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen und Prozessen,
- Kostenersparnis durch Wiederverwendung von Konstruktionsergebnissen und Prozessen sowie
- frühzeitige Planungsmöglichkeit der Wartungsstrategie auf Basis des Gefährdungsgrades.

Durch die Einführung eines eigenen Wartungselementes in die Produktdatenstruktur ist die persistente Speicherung, die Wiederverwendung sowie Entkopplung von Zugriffsrechten und Lebenszyklus zwischen Bauteil und Wartungsstrategie möglich (siehe

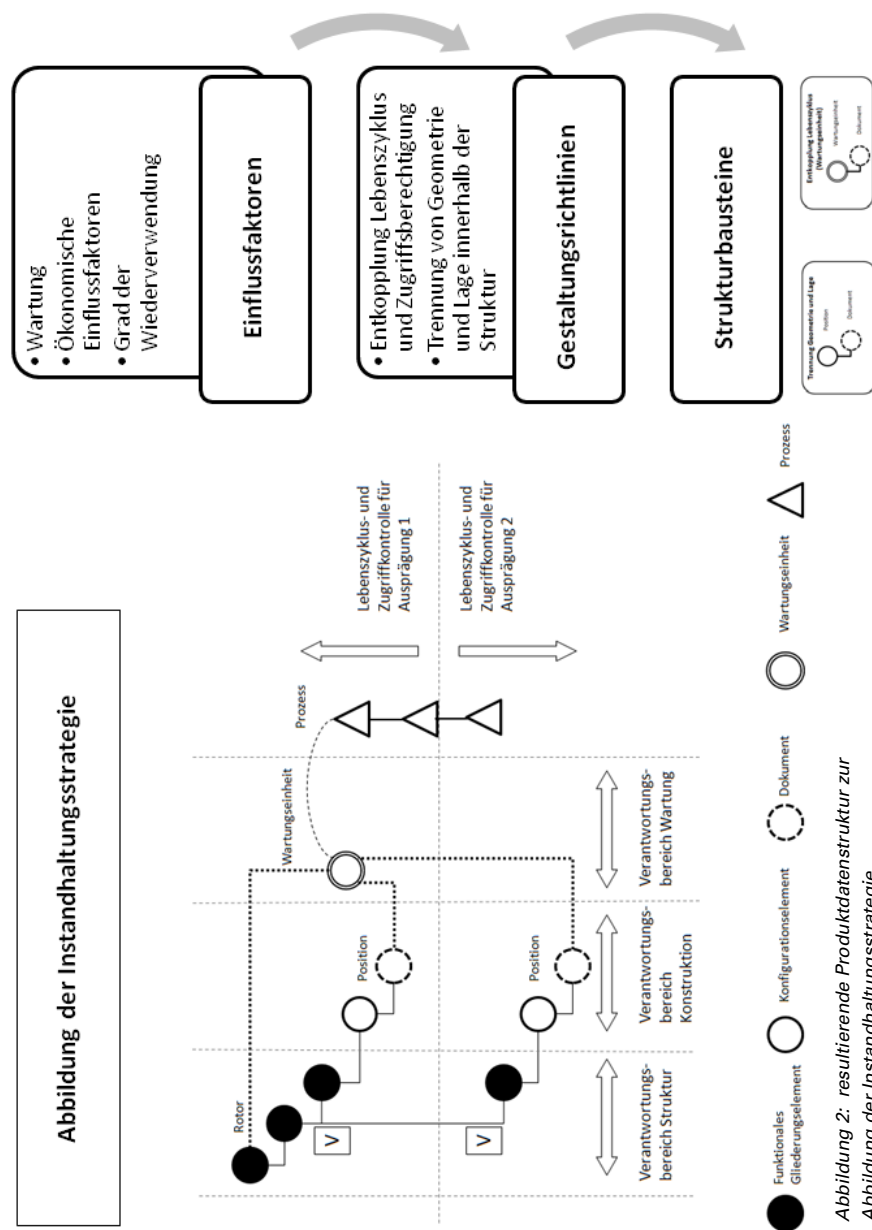


Abbildung 2: resultierende Produktdatenstruktur zur Abbildung der Instandhaltungsstrategie

Abbildung 2). Dieser Aufbau erhöht die Prozesstransparenz durch eine eindeutige Zuordnung von Instandhaltungsprozess zu Bauteil/Baugruppe und ermöglicht die Sichtenbildung nach Instandhaltungsstrategie und betroffenen Bauteilen und Baugruppen.

Für die Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien stehen Strukturbausteine zur Verfügung (siehe Abbildung 2). Sie liefern ein Template für den benötigten Ausschnitt der Struktur. Das sinnvolle Zusammenführen dieser Bausteine bildet dann das resultierende Template der Produktdatenstruktur, das als Basis für die Evaluierung der benötigten Funktionalitäten und Anwendungsfälle dient.

Das in Abbildung 2 vorgestellte Strukturtemplate enthält vier Elementtypen und lässt sich in drei Ebenen unterteilen. Auf der obersten Ebene befinden sich die funktionalen Gliederungselemente. Sie resultieren aus der Komplexität des Produktes, dessen funktionaler Untergliederung sowie der verfolgten Unternehmensstrategie, die sich in dieser Struktur wiederfindet. Die sich anschließende Konfigurationsebene dient der Konfiguration des Produktes sowie der Abbildung des Reifegrads und des Lebenszyklus. Unterste Ebene bildet die Komponentenschicht, in der sich die direkt das Produkt beschreibenden Daten befinden. Diese Teilung in drei Ebenen, sowie die Einführung von 4 Elementen ermöglicht die Definition von Verantwortungsbereichen, Berechtigungsräumen und Lebenszyklusräumen innerhalb der Struktur. Damit liefert die in diesem Beitrag vorgestellte Produktdatenstruktur eine Lösung für die Umsetzung der Anforderungen an die Abbildung der Instandhaltungsstrategie. Kernelemente der Lösung sind:

- die Wartungseinheit zur Erfüllung der Forderung nach der Erhöhung der Prozesstransparenz sowie dem effizienten Management durch die Wiederverwendbarkeit von Prozessen und der direkten Zuordnung von Bauteilen / Baugruppen zur Instandhaltungsstrategie
- die Trennung von Geometrie und Lage zur Erhöhung der Wiederverwendung und der frühzeitigen Planbarkeit des Baugruppentauschs.

Der hier vorgestellte Ansatz erweitert den Blick auf das Problemfeld der Produktstrukturierung über die produktimmanenten Fak-

toren hinaus. Er berücksichtigt zudem subjektive Probleme wie das Fehlen von Wissen des Systemgestalters, technische Restriktionen durch zugrundeliegende Systeme sowie Änderungen im Zeitablauf. Damit ist die Entwicklung und Erprobung der Produktdatenstruktur in einer frühen Phase möglich.

Zusammenfassung

Die Standortanpassungen und Leistungsoptimierungen sind eine heute unverzichtbare Aufgabe während der Betriebsdauer von Offshore-Windkraftanlagen. Dabei steht nicht nur das Ziel der Ertragssteigerung im Vordergrund. Zunehmend erlangen auch Maßnahmen an Bedeutung, die die Standdauer einzelner Bauteile erhöhen und somit die Verfügbarkeit der Anlage optimieren. Weitere Kosten können durch die Reparatur von defekten, kostenmäßig signifikanten Komponenten, erzielt werden. Diese können dem Markt mit erneuerter Garantie und entsprechenden Kostenvorteilen wieder zugeführt werden, oder zur schnellen Überbrückung einer Betriebsunterbrechung bei Ausfall teurer Komponenten dienen, die nicht standardmäßig vorgehalten werden können. Zur effizienten Planung dieser Maßnahmen bereits in den frühen Lebenszyklusphasen ist die Berücksichtigung der Einflussfaktoren und Gestaltungsrichtlinien eine zukünftig unverzichtbare Voraussetzung.

Literaturverzeichnis

- Blees, Christoph (2011): Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. Dissertation. Betreut von Prof. Dr.-Ing Dieter Krause. Hamburg. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Fischer, Jörg W. ; Lammel, Bernhard ; Hosenfeld, Dirk ; Brinkmeier, Bernd ; Glauche, Marc: Implementierung domänenintegrierender PLM-Lösungen: Do(PLM)Con – Ein Ansatz zur Konzeption und Realisierung domänenintegrierender PLM-Lösungen. In: Industrie Management Bd. 5/2011, S. 17–21
- Mehdi Ghoffrani (2007): Entwicklung und Einführung eines flexiblen Softwaresystems zur Konfigurierung virtueller Produkte. Dissertation. Bochum: Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau
- Göpfert, Jan; Steinbrecher, Michael (2000): Modulare Produktentwicklung leistet mehr: Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet

- werden müssen. In: Harvard Business Manager Bd. Heft 3/2000. 2000, S. 1 – 17
- Göpfert, Jan (2009): Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation ; Theorie, Methodik, Praxis. 2. Au. Norderstedt: Books on Demand, 2009.
- Hau, Erich (2008): Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4. vollständig neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Höring, Bernd (2011): Condition Monitoring für Offshore Windparks – Ein Baustein zur Sicherstellung der Anlagenverfügbarkeit und zur Risikominimierung. In Deutsche Montan Technologie GmbH, Februar 2011, www.conditioncontrol.de
- Jania, Thilo (2004): Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.
- Jung, Harald (2009): Verbundprojekt: Erhöhung der Verfügbarkeit von Windenergieanlagen. Entwicklung von zuverlässigkeitsbezogenen Betriebsund Instandhaltungsstrategien für Windenergieanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Offshore-Bedingungen. Herausgegeben von IZP Dresden.
- Krüder, Klaus (2006): Moderne Instandhaltungskonzepte für Windenergie. In: www.voithindustrialservices.de/media/vi_de_viws_overmoehle_dt.pdf
- LOG-OWEA 2010: Abschlussbericht AiF Otto von Guericke (2010): Verbesserung der Planungsgrundlagen für kampagnengeprägte Supply Chains (SC) am Beispiel von Offshore- Windenergieanlagen (OWEA). AiF-Vorhaben-Nr. GAG: 16053 BG
- Orosa 2010: Orosa, Jose Antonio; Oliveira, Armando C.; Costa, Angel Martin (2010): New procedure for wind farm maintenance. In: Industrial Management & Data Systems, Nr.. 110(6), 2010
- Pulm, Udo (2004): Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. Dissertation. München. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen.
- Rapp, Thomas (2010): Produktstrukturierung. Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen. München: Books on Demand
- Reinecke, Max (2010): Internationalisierungsgerechte Strukturierung variantenreicher Serienprodukte. Dissertation. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau.
- Schuh, G.; Arnoscht, J.; Nußbaum, C. (2007): Produktarchitekturen richtig gestalten. Ein Weg zum variantenoptimierten Produktprogramm. In: Industrie Management, 2007 (23), S. 29–32.
- Schuh, Günther ; Schwenk, Urs (2001): Produktkomplexität managen: Strategien – Methoden – Tools. München : Hanser, 2001.

Wüpping, Josef (2003): Praxiserfahrungen – Variantenmanagement und Produktkonfiguration. In: Industrie Management, 19 (2003), S. 49–52.
 Zagel, Mathias 2006: Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung. Dissertation. Kaiserslautern: technische Universität Kaiserslautern

Kontakt

Dipl.-Ing. Marc Glauche
 Siemens PLM
 Nonnendammallee 101
 13629 Berlin
 marc.glauche@siemens.com

Dipl.-Ing Ute Dietrich
 Siemens PLM
 Nonnendammallee 101
 13629 Berlin
 udietrich@web.de

Prof. Dr. Jörg P. Müller
 Direktor
 Institut für Informatik
 Technische Universität Clausthal
 Julius-Albert-Str. 4
 38678 Clausthal-Zellerfeld

Peter Köhler & Marcin Humpa

Geometrische Umsetzung von Designabsichten bei der Produktmodellierung

1 Ausgangsbasis

Mit dem Begriff »Produktdesign« werden in den verschiedenen Branchen häufig recht unterschiedliche Aufgaben verbunden. Nachfolgend sollen insbesondere Problemfelder des Maschinen- und Anlagenbaus beleuchtet werden. Dabei werden vor allem funktionale und fertigungstechnische Einflüsse auf die Formgebung diskutiert.

Zur Unterstützung des Design-Prozesses stehen in jeder Entwicklungsphase auch entsprechende Softwarewerkzeuge zur Verfügung. Dennoch ist es nicht immer möglich, formbestimmende Designabsichten exakt in einem rechnerinternen Geometriemodell abzubilden und die geometrische Stabilität auch für nachfolgende Prozessschritte abzusichern.

Die leistungsfähigsten CAD-Systeme haben sich inzwischen zu Plattformen für Produktentwicklungsprozesse entwickelt, so dass immer mehr auch Konzept- und Entwurfsmodelle in die Grob- und Feingestaltung integriert werden können. Dem entgegen stehen allerdings noch fehlende Implementierungen von branchenspezifischen konstruktiv-geometrischen bzw. differentialgeometrischen Modellierungsansätzen. So fehlen zum Beispiel in den meisten CAD-Systemen Modellierungsoptionen für die Erzeugung von Bezugskurven als kürzeste Verbindungen zweier Punkte auf be-

liebigen Flächen bzw. Flächenverbünden. Noch nicht durchgängig implementiert sind ebenso Methoden zur definierten Anpassung von Flächenkrümmungen. Auch elementarere Problemstellungen, wie die Absicherung von ebenen Durchdringungskurven, die für bestimmte Apparate- und Rohrleitungselemente sinnvoll sein kann, werden noch zu wenig unterstützt. Auch bei anderen Problemstellungen ist zu bemängeln, dass die entsprechenden Datenmodelle und Algorithmen der Geometriekerne noch zu wenig die Ausgangssituationen und Randbedingungen für ingenieurmäßige Designprozesse berücksichtigen.

Abbildung 1 zeigt eine solche Problemstellung. Wer ein entsprechendes Fachbuch (z. B. Köhler 1986) zur Hand hat, kann die Lage der erforderlichen Schnittebenen über mehrere Beziehungen im System definieren. Schöner wäre es allerdings, wenn die mathematisch-geometrischen Hintergründe im System verfügbar wären, denn aus der darstellenden bzw. konstruktiven Geometrie ist bekannt, dass sich bei der Durchdringung zweier Kreiskegel bzw. von Kreiskegel und Kreiszylinder genau dann ebene Durchdringungskurven ergeben, wenn die beiden sich durchdringenden Flächen die gleiche Hilfskugel tangieren. Vergleichbare Modellierungsstrategien

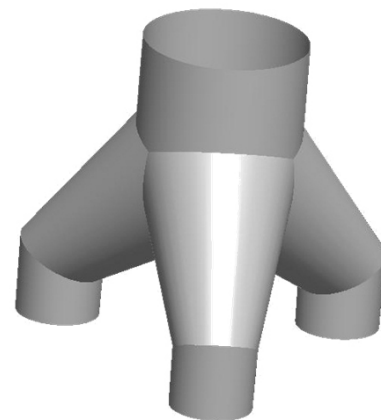


Abbildung 1: Mehrfachverzweigung

wurden schon vor einigen Jahren publiziert (Köhler 2002) und in einer speziellen Branchenlösung im System MegaCAD umgesetzt. In anderen Systemen muss dies durch den Anwender selbst über benutzerdefinierte Featureelemente, Geometrievererbungen bzw. spezielle Featuregruppierungen im System verankert werden. Das gilt auch für andere Problemstellungen.

Für Abbildung 2 wurde ein Teilproblem aus Abbildung 1 herausgegriffen. Sie zeigt die theoretisch möglichen Schnittoptionen für die Durchdringung einer Zylinder- mit einer Kegelfläche, die beide die gleiche Hilfskugel tangieren. Insbesondere die vier Gehrungsschnitte sind mit üblichen Durchdringungs- bzw. Trimmfunktionen der CAD-Systeme nicht direkt ableitbar.

Nachfolgend werden einige Problemfelder aus dem Maschinen- und Anlagenbau beleuchtet, die insbesondere für die Umsetzung funktionaler und fertigungstechnischer Randbedingungen, aber auch für die Berücksichtigung ästhetischer Aspekte Bedeutung haben. In diesem Zusammenhang werden auch Leistungsmerkmale einiger CAD-Systeme zur anforderungsgerechten Geometriemodellierung betrachtet und Möglichkeiten für problemspezifische Anpassungen aufgezeigt.

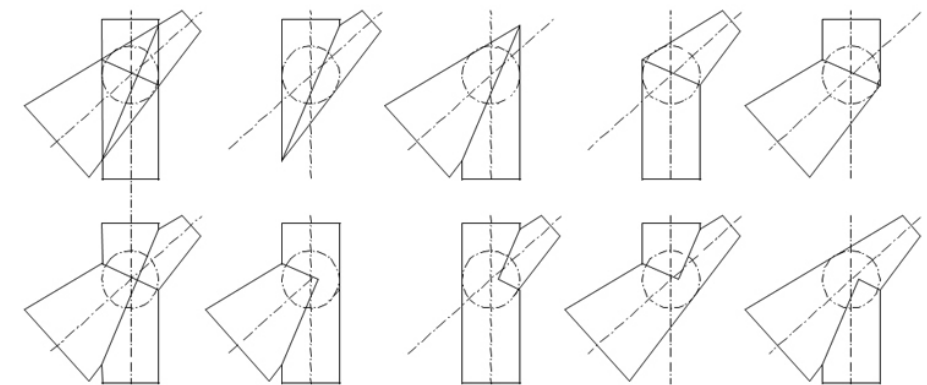


Abbildung 2: Schnittoptionen

Des Weiteren werden Lösungen vorgestellt, die unter Anderem der Absicherung unterschiedlichster Eigenschaften (Krümmung, Tangentialität, Stetigkeit, ...) bestimmter Bauteiloberflächen dienen. Anhand eines komplexen Strömungskanal wird gezeigt, wie funktionale und fertigungstechnische Forderungen bei der Modellgenerierung in Einklang gebracht werden können.

2 Qualifizierung von Modellreferenzen

Vor allem parametrisch-assoziative CAD-Systeme bieten Möglichkeiten zur intelligenten Verknüpfung von Modellkomponenten. Das gilt sowohl bauteilbezogen als auch komponentenübergreifend. In die Definition von modellinternen Referenzen können in einigen Systemen auch Modellanalysen und Geometrieoptimierungen einbezogen werden. Auch der automatisierte Zusammenbau von Komponenten ist über vordefinierte Einbaureferenzen möglich. Für weiterführende komponentenübergreifende Zusammenhänge können dem Modell Parameterbeziehungen, bedingte Anweisungen und andere Techniken zur Abbildung der Produktlogik hinzugefügt werden.

2.1 Bezugselemente mit besonderen Eigenschaften

In jedem CAD-System sind häufig vorkommende Kurven (Kreis, Ellipse, Splines, ...) bereits als Grundelemente verfügbar. In einzelnen Fällen besteht darüber hinaus für die CAD-Anwender auch die Möglichkeit, benötigte Kurven im System durch entsprechende analytische Beschreibungen zu verankern. In mathematischen Softwaresystemen ist dies dem Anwender auch für Flächen möglich, in CAD-Systemen derzeit nicht.

Für die bereits erwähnten kürzesten Verbindungen von zwei Punkten auf einer Fläche sind in besonderen Fällen auch analytische Kurvenbeschreibungen möglich. Auf Kreiszylinderflächen ergeben sich hier zum Beispiel Schraubenlinien. Auch für Kreiskegelflächen sind in der Literatur analytische Lösungsansätze verfügbar. Für alle abwickelbaren Flächen sind die kürzesten Verbindungen in der Abwicklung stets Geraden, auf Kugeloberflächen ergeben sich stets Kreisbögen. In ausgewählten speziellen Softwaresystemen zur Flächenmodellierung (z. B. Rhinoceros) können kürzeste Verbindungen auf Flächen

relativ einfach durch zwei Flächenpunkte definiert werden. In den CAD-Systemen ist dies mehrheitlich nicht oder nur über Umwege möglich bzw. nur für Oberflächen, die aus exakt abwickelbaren Flächenelementen bestehen. In den CAD-Systemen, in denen diese Abwicklungen ermittelt werden können und zugleich auch »Rückbiegungen« möglich sind, kann diese geodätische Kurve zwischen zwei Flächenpunkten zunächst in der Abwicklung als Gerade definiert werden, so dass sich nach der Rückbiegung die gewünschte Kurve ergibt. Abbildung 3 zeigt einen solchen Flächenverbund.

Auch das nächste Beispiel zeigt, dass es weitere Potentiale gibt, um innerhalb von CAD-Prozessen den Anwendern eine noch bessere Unterstützung bei der Definition von Bezugselementen zu bieten. Am Kegel in Abbildung 4 sollen die Leitbleche so angebracht werden, dass die sich ergebende Berührungskurve eine konstante Steigung hat. Die Abwicklung dieses senkrechten Leitbleches ist dann ein Parallelogramm. Kurven mit konstanten Steigungen werden häufig als Böschungslinien bezeichnet. Auf Zylinderflächen sind diese einfach ebenfalls über eine Schraubenlinie zu definieren. Für die Erzeugung von »Böschungslinien« auf Kegelflächen muss dazu eine logarithmische Spirale genutzt werden, die zunächst in einer geeigneten Ebene über die bekannten analytischen Gleichungen definiert und dann auf die Kegelfläche projiziert wird. Für andere Flächen und Flächenverbünde sind in CAD-Systemen nur selten Lösungsansätze integriert.

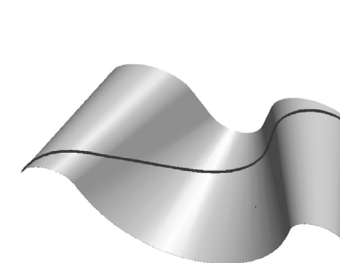


Abbildung 3: Kürzeste Verbindung zweier Punkte auf einem Flächenverbund

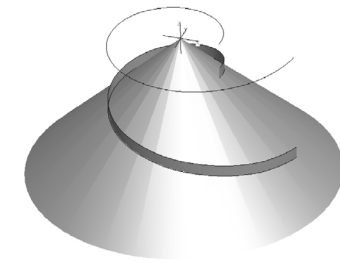


Abbildung 4: Leitbleche am Kegel mit konstanter Steigung

2.2 Einbeziehung von Geometrieanalysen und Optimierungsstudien

Die Ermittlung von Flächen- und Körperschwerpunkten gehört ebenso wie die Längen- und Winkelmessungen zu den Standardanalysefunktionen eines CAD-Systems. In den leistungstärksten Systemen können die Analyseergebnisse im Modell verankert und weiter verarbeitet werden, so dass zum Beispiel gesichert werden kann, dass der Schwerpunkt eines Bauteiles stets auf einer vordefinierten Achse liegt oder vorgegebene Flächeninhalte stets mit minimalem Umfang realisiert werden (Köhler 2010).

Zur Generierung »intelligenter« Bezugselemente müssen weiterreichende Geometrieanalysen genutzt werden. Abbildung 5 zeigt eine Bohrung für die stets gesichert ist, dass die Achse durch den Flächenpunkt geht, der den größten Abstand zu einer definierten Ebene hat. Ebenfalls in der Abbildung enthalten ist eine ebene Bezugskurve, für die stets gesichert ist, dass sie die Umriss der Basisfläche verkörpert, die sich aus der rechtwinkligen Projektion auf die Kurvenebene ergeben. Leider wird in aller Regel bei komplexeren Geometrien vom System nicht gesichert, dass die Umrisskontur lückenlos nur aus einer »Schleife« besteht, so dass manuelle Eingriffe zur Kurvenbereinigung nötig sind.

Abbildung 6 zeigt eine gute Annäherung an eine geodätische Kurve. Um die als Volllinie dargestellte optimierte Bezugskurve zwischen den zwei vorgegebenen Punkten auf der Freiformfläche zu erhalten, wurde zunächst eine Splinekurve aus mehreren Punkten in einer

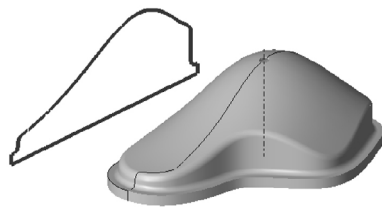


Abbildung 5:
Flächenprojektionen

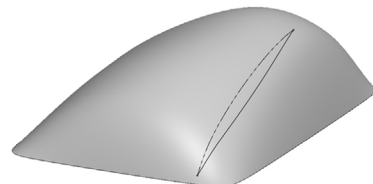


Abbildung 6: Geodätische Kurve
auf einer beliebigen Fläche

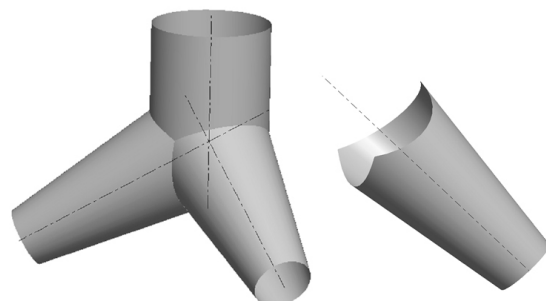
geeigneten Ebene definiert. Die Projektion des Splines auf die gekrümmte Fläche ist in der Abbildung 6 gestrichelt dargestellt. Für die projizierte Kurve wurde die Bogenlänge ermittelt. Über eine im System definierte Optimierungsstudie wurden die Punktkoordinaten des ebenen Ausgangssplines so verändert, dass die Kurvenlänge der projizierten Kurve minimiert wurde. In einigen Systemen kann statt der ebenen Splinekurve auch eine Splinekurve auf der Fläche erzeugt werden, die dann in gleicher Weise zu optimieren ist.

2.3 Intelligente Komponentenschnittstellen

Begriffe wie Skelettmodelle, Bauteilgerüste, Mating-Modelle, Adaptermodelle stehen für den gezielten Einsatz von Hilfsmodellen beim strukturierten Aufbau von Produktmodellen in CAD-Systemen. Derartige Modelle sind letztendlich abgestimmte Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Komponentenmodellen. Sie enthalten vor allem geometrische Referenzen, Parameter, Beziehungen und Regeln.

Auch für Problemstellungen wie die in Abbildung 1 ist der Einsatz entsprechender Adaptermodelle sinnvoll. Im Beispiel könnte dieses Modell eine Kugel enthalten, die einen definierten Durchmesser hat und später auch den Zusammenbau der Komponenten unterstützt. Alternativ dazu können hierfür auch Punkte genutzt werden, die sich auf ein geeignetes Kugelkoordinatensystem beziehen. In diesem Adaptermodell wird zugleich auch vordefiniert, über welche Referenzen und Parameterwerte das jeweilige Bauteilmodell in die Baugruppe eingebaut wird. Darüber hinaus werden für die gewählten Problemfelder durch die Adaptermodelle beim Zusammenbau auch die notwendigen Schnittoperationen mit den relevanten bereits eingebauten Komponenten initiiert. In Abbildung 7 sind ein Zwischenstand des Baugruppenmodells aus Abbildung 1 und das sich schrittweise ergebende Einbaumodell einer weiteren Komponente verdeutlicht. Für diese Komponenten waren im Beispiel drei einbaubedingte Schnittoperationen erforderlich. Die in CAD-System auch für Baugruppen bereits verfügbaren Schnittoperationen basieren in der Regel ausschließlich auf den bekannten mengentheoretischen Operationen, so dass die im Beispiel erforderlichen komponentenabhängigen Gehrungsschnitte (siehe auch Abbildung 2) dem System erst »beigebracht« werden mussten.

Abbildung 7:
Automatisierte Einbau-
anpassung für eine
Schweißbaugruppe



3 Absicherung von Krümmungseigenschaften

3.1 Abwickelbare Oberflächen

Im Maschinen- und Anlagenbau werden immer dann möglichst exakt abwickelbare Oberflächen benötigt, wenn die Teile über Biegeprozesse aus Blechen gefertigt werden sollen. Für diese Oberflächen muss bekanntlich gesichert werden, dass die Gauß'sche Flächenkrümmung gleich Null ist. Neben den klassischen Blechformstücken des Apparate- und Anlagenbaus lassen sich einige der dabei zu lösenden Problemfelder unter dem Begriff »Schraubregelflächen« zusammenfassen. Abbildung 8 zeigt entsprechende Flächen an zylindrischen und kegligen Komponenten. Nicht alle wurden allerdings so generiert, dass die Gauß'sche Krümmung gleich Null ist. Zur Generierung von Regelschraubflächen wird eine Gerade entlang einer Schraubenlinie bewegt. In den üblichen CAD-Modellierungsoptionen muss dabei gesichert werden, dass die Gerade senkrecht zur Leitkurve steht bzw. dass die erzeugende Gerade mit der Achse der Spirale eine Ebene aufspannt. So können aber keine exakt abwickelbaren Schraubflächen generiert werden. Bestenfalls ergibt sich eine Minimalfläche, also eine Fläche, deren mittlere Krümmung gleich Null ist. Das ist der Fall, wenn alle Geraden der Schraubfläche senkrecht zur Achse der Schraubenlinie stehen. Minimalschraubflächen (Wendelflächen) werden in der Praxis dennoch als Ausgangspunkt für eine näherungsweise Ab-

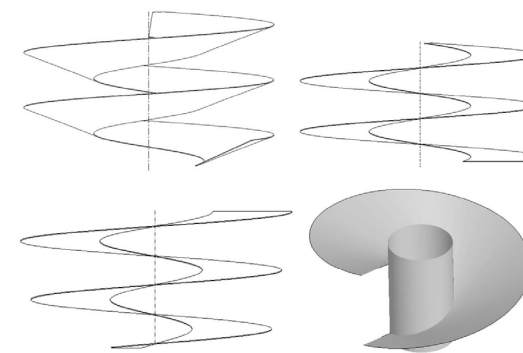


Abbildung 8:
Schraubflächen

wicklung gewählt. Für Schraubflächen am Zylinder ergeben sich in der Abwicklung geschnittene Kreissegmente. Die in der Abbildung 8 schattiert dargestellte exakt abwickelbare Schraubenfläche wurde im CAD-System als Verbundfläche zwischen zwei Schraubenlinien definiert. Für diese beiden Schraubenlinien musste allerdings gesichert werden, dass die Tangenten an der »inneren« Schraubenlinie die »äußere« schneiden, d. h. diese Schraubenfläche muss eine Tangentenfläche sein.

Das Beispiel in der Abbildung 9 zeigt einige elementare Verbundflächen, deren abwicklungsgerechte Erzeugung von einem leistungsfähigen CAD-System unterstützt werden sollte! Im Idealfall hat das CAD-System eine entsprechende Modellierungsoption. Ansonsten muss der Bearbeiter durch geschickte Modellierungsstrategien versuchen, das Problem auf Umwegen zu lösen, was allerdings nicht in jedem Fall gelingen wird, auch wenn dem Anwender die differentialgeometrischen Hintergründe bekannt sind. In einigen Systemen können zumindest zwischen zwei ebenen einelementigen Kurven abwickelbare Verbundflächen generiert werden. Gelegentlich auch nur, wenn die ebene Anschlusskurven in parallelen Ebenen liegen. In anderen Fällen wird gefordert, dass mehrteilige Anschlusskurven ausschließlich tangentielle Kurvenübergänge haben und nicht geschlossen sind. Häufig erfolgt die Generierung von abwickelbaren Oberflächen auch nur über eine geschickte Flächentriangulierung oder nur dann, wenn die Anschlusskonturen konvex sind.

Gerade bei konvexen, mehrteiligen Anschlusskurven könnte neben der Abwickelbarkeit die Konvexität einer Verbundfläche eine einzuhaltende Designanforderung sein. Diesen »Schalter« gibt es leider nicht bzw. nur in Ausnahmefällen. Abbildung 10 zeigt an einem einfachen Beispiel (dem Verbund zweier verdrehter abgerundeter Rechtecke), dass der Anwender daher das System geschickt führen muss, um einen konvexen exakt abwickelbaren Flächenverbund zu erhalten.

3.2 Zielorientierte Verformungen

Die bereits in Abbildung 9 enthaltene Verbundfläche zwischen einer Geraden und einem Ellipsenbogen kann auch für Kanalgeometrien von Interesse sein. Im Normalfall wird dieser Verbund systemseitig zwischen zwei Anschlussquerschnitten als Regelfläche generiert, wobei beide Querschnitte gleichmäßig »durchlaufen« werden. In leistungsfähigen Systemen werden auch diese Regelflächen in einer NURBS-Darstellungen verarbeitet, so dass weitreichende Geometrieadjustierungen möglich sind. Letztendlich werden dabei

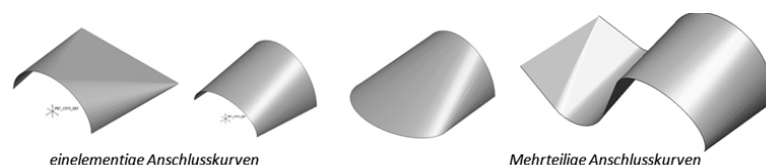


Abbildung 9: Elementare abwickelbare Verbundflächen

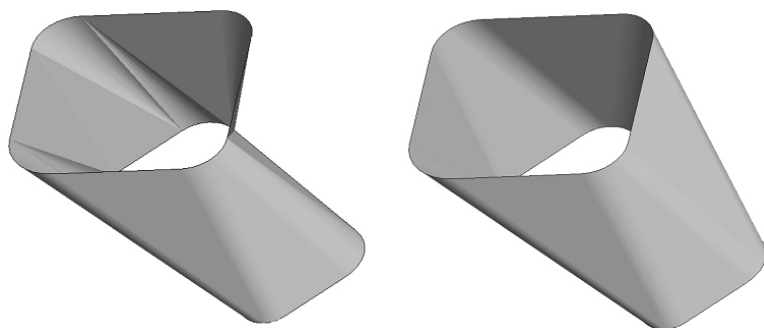


Abbildung 10: Absicherung konvexer Verbundflächen

die erzeugenden Geraden der Regelfläche zunächst als »gerader« Spline definiert, d. h. der Spline wird über zwei Punkte und zwei Tangentialitätsbedingungen beschrieben. Anschließend können an den beiden Endpunkten die Richtungen der Tangentenvektoren verändert werden. In Abbildung 11 wurde die Verbundfläche so erzeugt, dass tangentiale Flächenübergänge zu den beiden Anschlussflächen entstehen. Wenn diese Übergangsfläche die Mittenfläche eines Strömungskanals ist, könnte darüber hinaus die Anforderung bestehen, dass sich die Strömungslinien längenmäßig bei diesem Übergang möglichst wenig unterscheiden. Für das gewählte Beispiel in Abbildung 11 wurde dies über Analysefeature und eine systeminterne Geometrieoptimierung erreicht. Falls keine zufriedenstellende maximale Abweichung der Strömungslinienlängen erreicht werden kann, sind umfangreichere Anpassungen erforderlich, so dass die Übergangsfläche über ein Punktenetz manipuliert werden muss. Der Schwierigkeitsgrad dieses Problems vergrößert sich weiter, wenn auch angestrebt wird, dass sowohl die Strömungs-

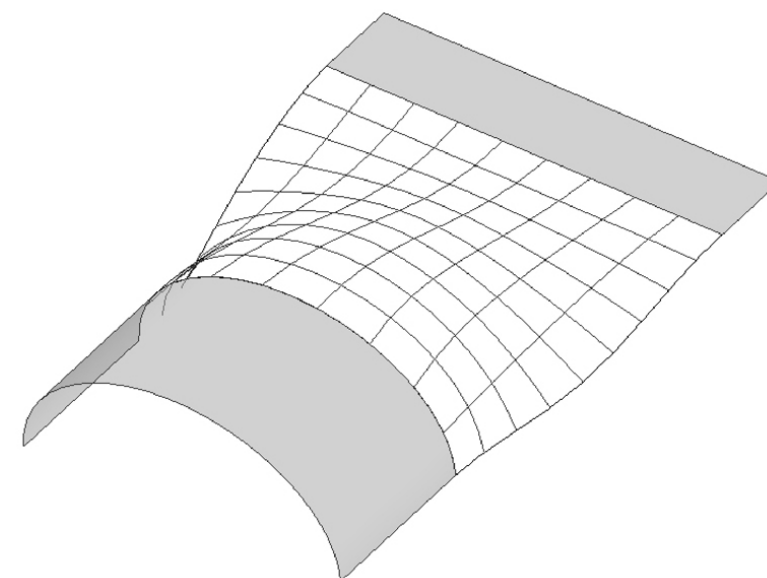


Abbildung 11: Mittenfläche einer Strömungskanals

als auch die Querschnittlinien möglichst jeweils gleich lang sind und die Krümmungsradien auf diesen Kurven einen vorgegeben Wert nicht unterschreiten. Damit ist eine Optimierungsaufgabe definiert, die mit herkömmlichen Modellierkernen nur durch sehr aufwändige manuelle Iterationen angegangen werden kann (Köhler 2009).

Da aus dieser Mittenfläche letztendlich ein Strömungskanal generiert werden soll, ergeben sich auch durch unterschiedliche Versatzparameter Möglichkeiten, um den strömungstechnischen Anforderungen gerecht zu werden.

In den CAD-Systemen ist es allerdings ein Problem, wenn ein Versatz der Flächenpunkte nicht konstant ausgeführt werden soll. Daher müssen beispielsweise die Querschnittlinien einzeln in Richtung der jeweiligen Normalen der Mittenfläche versetzt werden. Aus der sich ergebenden Kurvenschar kann dann die gesuchte Freiformfläche gebildet werden.

In den CAD-Systemen, die keinen Kurvenversatz in Richtung der Flächennormalen zulassen, muss wieder improvisiert werden. Nicht in jedem Fall ist jedoch einzusehen, dass der Nutzer dem System helfen muss, die Geometrie anforderungsgerecht zu modellieren. Hier können sicher auch die Anwender auf den Systemanbieter Einfluss nehmen, um solche Umwege überflüssig zu machen.

4 Fertigungsgerechte Schnittoperationen

Auch ohne CAD-Techniken war und ist es wichtig zu wissen, wie bestimmte Bearbeitungsoperationen in der Fertigung durchgeführt werden, um auch die geometrischen Ausprägungen der Bauteile funktions- und fertigungsgerecht festlegen zu können. Hierzu sind auch in der Fachliteratur zahlreiche Beiträge zu finden, zum Beispiel für Problemstellungen der Fertigung von Zahnrädern und anderen regelmäßig wiederkehrenden Formelementen, für die insbesondere mehrachsige Fräsmaschinen eingesetzt werden (Bär 2009). Bei genauerer Betrachtung ist festzustellen, dass CAD-Systeme den Anwender noch nicht in ausreichendem Maße bei der fertigungsgerechten Modellierung unterstützen. Abbildung 11 zeigt ein zylindri-

sches Bauteil mit spiralförmiger Nut. Derartige Problemstellungen treten zum Beispiel bei Verteilersystemen für Kunststoffschmelze auf. Eine gängige Praxis bei der Modellierung von Nuten ist es, den gestaltbestimmenden Querschnitt entlang einer Leitkurve zu »schieben«. Immer dann, wenn die Rotationsachse des Werkzeugs senkrecht zur Leitkurve der Nut steht, ist das auch fertigungstechnisch korrekt. Andernfalls werden so allerdings nicht in jedem Fall die späteren realen Schnittgeometrien abgebildet. In der Abbildung sind mehrere Positionen des Fräasers dargestellt, dessen Achse im gewählten Beispiel stets 45° zur Werkstückachse steht, nochmals als Rotationsschnitt aufgebracht worden, so dass erkennbar ist, dass »Schiebeflächen« keine korrekte Lösung des Problems liefern. Aus mathematischer Sicht ist dieses Problem klar und auch schon häufiger in der Fachliteratur diskutiert, denn es müssen Hüllflächen erzeugt werden, die letztendlich alle Positionen des Werkzeugs auf seiner Bahn tangential umschließen. Die Mehrheit der CAD-Systeme bietet aber nicht die Möglichkeit, Schnittoperationen entlang einer Bewegungsbahn eines (Werkzeug-)Körpers zu erzeugen, obwohl entsprechende Funktionen teilweise schon in CAM-Systemen bzw. Systemen der Mehrkörpersimulation verfügbar sind. Hier müsste also dringend seitens der Systemanbieter nachgebessert werden. Für einfache Werkzeuggeometrien kann sich allerdings auch der Anwender schon selbst helfen. Für ein zylindrisches Fräswerkzeug kann beispielsweise zunächst eine Mittenlinie des Werkzeugs entlang der Werkzeugbahn bewegt werden, so dass sich eine »Mittenfläche« ergibt, aus der dann zwei Versatzflächen abgeleitet werden. Der sich so ergebende Flächenverbund dient dann der Definition des »Materialschnittes«.

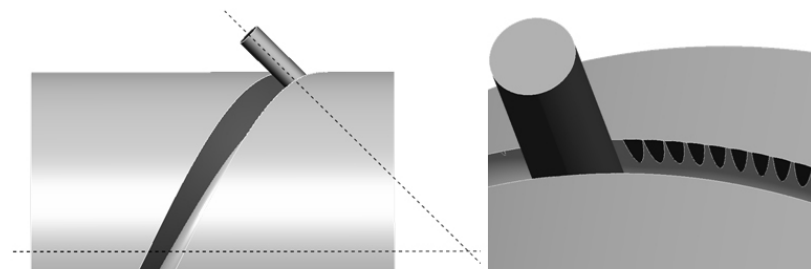


Abbildung 12: Wendelverteiler mit schrägem Werkzeugeingriff

5 Zusammenfassung

Im Beitrag wurde anhand ausgewählter Beispiele aufgezeigt, dass trotz leistungsfähiger CAD-Systemfunktionalität der funktions- und fertigungsgerechte Geometrieaufbau noch nicht so gut wie möglich unterstützt wird. Vergleichende Untersuchungen mehrerer CAD-Systeme haben gezeigt, dass vor allem differentialgeometrische Randbedingungen, die für die korrekte fertigungsgerechte Modellbildung Bedeutung haben, bisher nur unzureichend implementiert sind. Das trifft für die Absicherung bestimmter Kurven- und Flächenkrümmungen ebenso zu wie für den Aufbau fertigungsge-rechter Bearbeitungsfeature. Es muss daher zukünftig noch besser gelingen, Fertigungswissen in den CAD-Prozess zu integrieren bzw. die Fertigungsgerechtigkeit in Designprozessen abzusichern. Eine große Hilfe wären dabei erweiterte Möglichkeiten zur Verankerung besonderer geometrischer Eigenschaften im CAD-Modell. Die ersten volumenorientierten 3D-CAD-Systeme basierter auf rechnerinternen Geometriedatenmodellen, mit denen nur analytisch beschreibbare Kurven und Flächen verarbeitet werden konnten, für die dann allerdings bestimmte Verschneidungs- und Durchdringungsprobleme auch exakt analytisch gelöst wurden. Inzwischen sind nahezu in allen CAD-Systemen Geometriekerne integriert, die auf allgemeineren mathematischen / numerischen Methoden basieren und damit vielfältigere Möglichkeiten zur Umsetzung von Designabsichten bieten. Das brachte es aber auch mit sich, dass »einfache« Probleme nicht »einfach« rechnerintern beschrieben werden und damit besondere Eigenschaften nicht gleich erkennbar sind. Hier sollte seitens der Systemanbieter nachgebessert werden. Wünschenswert ist in jedem Fall, dass neben Kurven auch Flächen über Gleichungen im CAD-System definierbar sind. Dass dies keine große Herausforderung sein sollte, zeigen die bereits seit Jahren etablierten mathematischen Softwaresysteme. Darüber hinaus sollten in die Entwicklung von fertigungsorientierten CAD-Feature-Elementen auch Erfahrungen einfließen, die bereits bei der Entwicklung von CAM-Systemen, insbesondere bei der Simulation und Visualisierung spanender Fertigungsprozesse gesammelt wurden.

Literaturverzeichnis

- Bär, Gert F.: Geometrische Aufgaben im Maschinenbau. 5.Tagung der Deutschen Gesellschaft für Geometrie und Grafik (DGfGG) München 2009.
- Köhler, P.: Blechabwicklungen und Durchdringungen. Verlag Technik Berlin 1986.
- Köhler, P., Strohmeier, O.: Integrierte Produktmodellierung von Sonderformen im Behälter- und Rohrleitungsbau. Chemie Ingenieur Technik (74) 6/2002, S.835–838.
- Köhler, P., Humpa, M., Danjou, S.: Generierung von Bauteilgeometrien mit besonderen Krümmungs- und Kurveneigenschaften. In: Tagungsband des 12. Anwendungsbezogenen Workshops zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten (3D-NordOst), Berlin, 2009, S. 167–175.
- Köhler, P. (Hrsg.): Pro/Engineer-Praktikum. Einführende und fortgeschrittene Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire 5.0 bzw. CREO Elements/Pro. Springer Vieweg Verlag 2010.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler
 Dipl.-Ing. Marcin Humpa
 Institut für Produkt Engineering / CAE
 Universität Duisburg-Essen
 Lotharstr.1
 47057 Duisburg
www.uni-due.de/cae

Jan Brökel

Risikoabwägung im Rahmen einer Windkraftanlagenentwicklung

In Industrien mit schnell wachsenden Märkten und immer neu eintretenden Mitwettbewerbern sind alle Marktteilnehmer gezwungen, entweder durch Preisanpassungen oder durch Produktinnovationen zu reagieren. Aus diesen Rahmenbedingungen ergeben sich für die Produktplaner und -entwickler oft kurze Entwicklungszeiten. Weiter erschwerend sind der hohe Innovationsgrad bei allen Unternehmen, die damit einhergehende Patentdichte und regelmäßig nötige Neuausrichtungen der laufenden Entwicklungen. Es liegt in der Natur der Dinge, dass bei der Durchführung von Entwicklungsprojekten Probleme auftreten können. Diese sind bei rechtzeitiger Betrachtung oft sogar absehbar. Jedes potentielle noch nicht eingetretene Problem stellt ein Risiko dar, wobei die Erfahrung lehrt, dass Risiken leichter zu bekämpfen sind als eingetretene Probleme. Um trotzdem wettbewerbsfähig zu sein, müssen die Unternehmen auf allen Ebenen bewusst Risiken eingehen. Dies können sowohl finanzielle, technische oder auch zeitliche Risiken sein. Jedes einzelne Risiko kann sich zu einem Projektrisiko entwickeln, wenn es nicht bekannt ist und darauf reagiert wird.

Risikomanagement ist daher ein andauernder Vorgang und erstreckt sich über alle Phasen eines Projektes. Dabei ändern sich die Risiken fortlaufend und müssen immer wieder neu analysiert werden. Gerade bei Entwicklungsprojekten in der Windkraftbranche, wo es momentan einen Käufermarkt gibt und sich Unternehmen mit

innovativen Produkten durchsetzen, sind dazu ambitionierte Projektziele nötig. So ist das Projektumfeld gekennzeichnet durch enge Zeitpläne, begrenzte Ressourcen und ein hohes Maß an nötiger Flexibilität.

Risikoquellen für Entwicklungsprojekte

Potentielle Probleme und die damit verbundenen Risiken lassen sich den verschiedensten Quellen zu ordnen. Diese Klassifizierung verdeutlicht die Vielschichtigkeit der möglichen Probleme und Risiken und lässt erahnen, wie schwierig es dadurch ist prinzipielle Gegenmaßnahmen zu benennen. Wirsing nennt in seiner Abhandlung zum Projektmanagement (Wirsing 2006) folgende Risikoquellen:

Anforderungen:

Bedingt durch eine hohe Marktdynamik, regelmäßige Neuerungen in nationalen Gesetzgebungen, neue Märkte und ein starker Wettbewerb sind zahlreiche Änderungen (change of scope) der Entwicklungsanforderungen absehbar. Da in der Windkraftbranche die Emerging Markets eine große Rolle spielen, betrifft dies fast alle OEMs. Dazu zählt auch, dass die Produkthanforderungen ebenfalls unter Zeitdruck erstellt werden und daher das Risiko der Unvollständigkeit beinhalten.

Technik:

Gerade bei Windkraftanlagen ist die Leistung eins der wichtigsten Produktziele. Der Jahresenergieertrag, die Verfügbarkeit und die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen sind definierte Kundenziele. Das technische Risiko des Nichterreichens dieser Ziele gefährdet direkt das gesamte Projekt.

Anwendung:

Solange nur bewährte Technologie in der WKA zum Einsatz kommt, ist das Anwendungsrisiko relativ gering, trotzdem können neue Funktionen oder Subsysteme den erfolgreichen Betrieb der WKA gefährden. Auch die notwendige Schulung von Anwendern muss gewährleistet werden.

Kunde:

Da Windkraftanlagenhersteller mit ihren Produkten weltweit auf zahlreichen Märkten präsent sind, stellt auch die Vielfalt der Kunden, der Kulturen, der nationalen Gesetzgebungen ein schwer kalkulierbares Risiko dar. So hat sich gerade der indische Markt im letzten Jahr durch zahlreiche Markteintritte von Mitwettbewerbern, durch verschärfte Netzanforderungen und geänderte Finanzierungskonzepte kundenseitig sehr geändert.

Zulieferer/Organisation:

Interne und externe Lieferanten, für Subsysteme oder auch Personaldienstleistungen, stellen durch wenig transparente Entwicklungsprozesse, Technologien und Projektpläne eine hohe Abhängigkeit dar.

Projektrahmen und Unternehmensführung:

Trotz langfristiger Unternehmensstrategie und einem genauen Produktportfolio können unrealistische (zu knappe) Termine und unrealistische (zu kleine) Budgets systematische Risiken für ein technisches Projekt darstellen. In der Windkraft kann dies bedeuten, dass von den Prototypen sofort in die Serienproduktion übergegangen wird und die V&V Phase ausfällt.

Ressourcen und Prioritäten:

Innerhalb der Entwicklungsabteilung konkurrieren technische Projekte mit wechselnden Prioritäten um die vorhandenen Ressourcen, also Mitarbeiter und Budgets. Je nach Projektmanagement- und Ressourcenmanagementenerfahrung im Unternehmen, können Engpässe und Unzuverlässige Zusagen vermieden werden.

Personelle Mängel:

Neben technischen und organisatorischen Risiken können menschliche Risiken, wenn überhaupt, nur minimiert werden. So ist nicht nur die Erfahrung, Eignung und Stellung des Projektleiters wichtig, sondern natürlich erst recht die Qualifikation und Erfahrung der einzelnen Mitarbeiter. Auch Krankheiten und Kündigungen sind regelmäßig und industrieübergreifend Risikoquellen.

Facetten des Risikomanagements:

Während der Projektdurchführung gibt es phasentypische Hilfsmittel zur Unterstützung der Risikomanagementaktivitäten. In der Projektstartphase können übliche Checklisten und Kataloge, aber später während der Entwicklungsphase sollten umfangreiche Risikolisten geführt werden.

Risikoidentifikation

Die Identifizierung von Risiken ist die Basis für ein erfolgreiches Risikomanagement. Dies gelingt nur im direkten Kontakt mit den Entwicklern. Das Projektmanagement muss gezielte Risikorunden durchführen, entweder funktions- bzw. systemgetrieben oder auch mit Abteilungen und einzelnen Mitarbeitern.

In den etablierten Projektteamversammlungen müssen Risiken berichtet und besprochen werden. Die genannten neuen Risiken werden dann im Risikomanagementplan verfolgt, bewertet und die Wirksamkeit der Gegenmaßnahmen überwacht.

Konkrete Beispiele aus der Windkraftentwicklung sind:



Abbildung 1: Phasen des Risikomanagements nach Wallmüller (Wallmüller, 2004)

Risikoanalyse

Zur Bewertung des Impacts (I) und der Wahrscheinlichkeit (W) von Risiken sind die drei Stufen gering, mittel und hoch üblich. Die Gesamtbewertung (RF = Risikofaktor) ergibt sich damit aus dem Produkt von Impact und Wahrscheinlichkeit.

| Titel | Beschreibung | Quelle/Kategorie |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| 50°C Betriebs-temperatur | Produktanforderung „50°C Betriebstemperatur“ ist nicht umgesetzt zum Serienstart | Technik/ Technologisches Risiko |
| Mitarbeiter | Mitarbeiter in Schlüsselpositionen sind nicht verfügbar | Ressourcen/Organi-satorisches Risiko |
| Blattzertifikat | Blatttest und LoC Zertifikat nicht ver-fügbar zum Serienstart | Anwendung/ Zertifizierungsrisiko |
| Azimutantrieb | Neuer Azimutantrieb nicht verfügbar zum Serienstart | Projektrahmen/ Zulieferer Risiko |
| Betonturm | Zusätzliche Turmvariante aus Beton | Anforderungen/ Zeit- und Budgetrisiko |

Abbildung 2: beispielhafte Risiken mit Quelle und Kategorie in der Windkraft

Werden nun sowohl Impact als auch Wahrscheinlichkeit auf einer Skala von 0 (irrelevant/unmöglich) bis 5 (katastrophal/sicher) benotet, ergeben sich für schon genannten Risiken folgende Risikofaktoren. Prioritätenbildung bei mehreren Risiken, der Vergleich von Alternativen oder auch der Vergleich von Maßnahmen lassen sich mit dem Einsatz von Entscheidungsbäumen durchführen. Aus dem Entscheidungsbaum ergeben sich für die drei Varianten unter Betrachtung der Eintretenswahrscheinlichkeit folgende Kosten:

- Neuer Antrieb verfügbar: 1 Mio €
- Alten Antrieb verwenden: 1,62 Mio €
- Neuer Projektzeitplan: 1,9 Mio €

Daraus ergibt sich, dass es am günstigsten ist auf die Verfügbarkeit des neuen Azimutantriebes zu setzen, wobei der Risikofaktor mit 20 sehr hoch ist, was vorbeugende Maßnahmen impliziert, siehe Abb. 3.

Da 20% der Probleme bis zu 80% der zusätzlichen Kosten verursachen und jede Verzögerung die Kosten weiter in die Höhe treibt, ist eine frühzeitige und fundierte Fokussierung auf die Erkennung und Vermeidung der Risiken mit hohen Risikofaktoren nötig (Wirsing 2006).

Risikobewältigung

Für die identifizierten Probleme mit hohem Risiko müssen Gegenmaßnahmen entwickelt werden. Diese können

- Akzeptieren
- Vorbeugen
- Vermindern
- Übertragen
- Vermeiden
- Korrigieren

der Probleme sein. Das Akzeptieren von Risiken wird nur bei geringen Risiken umgesetzt, Risikofaktor 0 bis 8. Mittlere Risiken, Risikofaktor 9 bis 15, werden durch vorbeugende Maßnahmen minimiert. In der Windkraftbranche, wo OEMs viele Zukaufteile verbauen, ist die Übertragung von Risiken an den Auftraggeber (meist das Topmanagement) oder an Dritte, wie Lieferanten und Versicherungen, eine gute Option für das Projektmanagementteam.

Als weitere typische vorbeugende Maßnahmen sind in der Windkraft der Zertifizierungsprozess und die Prototypenvalidierung zu nennen. Die Zertifizierung durch unabhängige Dritte mit der Abnahme der technischen Lösungen, des Herstellungsprozesses und die Rückkontrolle durch umfangreiche Prototypenmessungen stellt im Hinblick auf die Serienproduktion ein probates Mittel zur Risikominimierung dar.

Auf das Risiko des nicht verfügbaren Azimutantriebes sollte, Risikofaktor 20 und Risikokosten von 1 Mio. €, muss vorbeugend reagiert werden. Zum einen kann das technische Risiko der Entwicklung an den Zulieferer übertragen werden, wobei das Risiko einer verspäteten Zertifizierung und des damit verbunden Serienstartes weiterhin besteht. Hier sollte durch das Projektteam das Risiko durch

| Titel | Impact | Wahrscheinlichkeit | Risikofaktor |
|-------------------------|--------|--------------------|--------------|
| 50°C Betriebstemperatur | 3 | 4 | 12 |
| Mitarbeiter | 4 | 3 | 12 |
| Blattzertifikat | 5 | 2 | 10 |
| Azimutantrieb | 5 | 4 | 20 |
| Betonturm | 1 | 5 | 5 |

Abbildung 3: beispielhafte Ermittlung des Risikofaktors

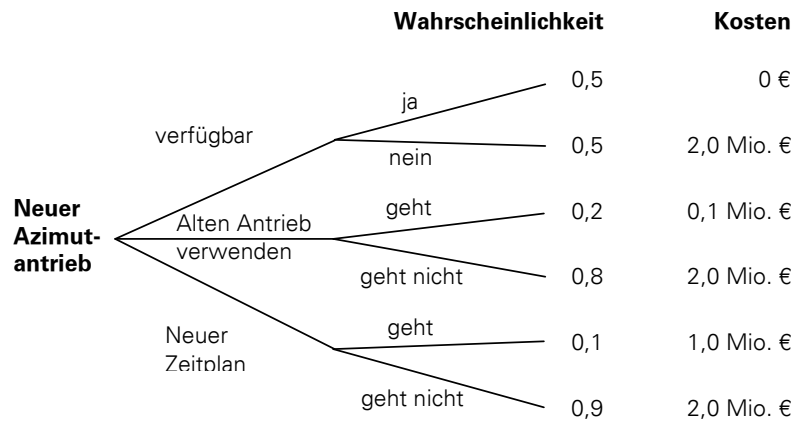


Abbildung 4: Entscheidungsbaum für das Risiko „neuer Azimutantrieb“

eine/mehrere Alternativstrategien vermindert werden. So muss mindestens ein Zweitlieferant in der Entwicklung sein. Auch der Einsatz etwas größerer Antriebe aus schon entwickelten Produkten ist zu prüfen, jedenfalls bis der optimierte Antrieb verfügbar ist. Korrektive Maßnahmen sind meist nur Notfalloptionen, da sie sehr kostenintensiv sind. Trotzdem kann durch die ambitionierten Zielsetzungen des Programm Managements in Bezug auf Zeitziele das bewusst eingegangene Risiko sehr hoch sein.

Risikokontrolle

Hauptziel der Risikokontrolle liegt in der Umsetzung und der Prüfung der Maßnahmen. Gängiger Weise sind die einzelnen Maßnahmen in Form von Subprojekten umgesetzt, das heißt mit Verantwortlichem, Zeit- und Budgetplänen. Dem entsprechend gibt es ein Reporting mit Meilensteinen und Zwischenreviews. Daneben muss regelmäßig geprüft werden, ob die Wirkung der durchgeführten Maßnahmen ausreichend ist oder angepasst werden muss.

Risiken können nur effektiv bearbeitet werden, wenn sie bekannt, eindeutig formuliert und systematisch dokumentiert sind. Diese Anforderungen lassen sich am besten mit Risikolisten oder, noch weiter gefasst, mit einem Risikomanagementdokument erfüllt werden. Diese Liste enthält:

- Die Beschreibung
- Die Bewertung
- Die Maßnahmen

der identifizierten Risiken.

| | |
|--------------------|---|
| Beschreibung | Neuer Azimutantrieb ist nicht verfügbar zum Serienstart |
| Konsequenz | Zertifizierung verzögert, Serienstart verzögert |
| Auswirkung | 5 |
| Wahrscheinlichkeit | 4 |
| Risikofaktor | 20 |
| Maßnahme | Zweiter Zulieferer |
| Verantwortlicher | J. Broekel |
| Termin | 01.09.2012 |
| Status | Im Plan |

Abbildung 5: Ausschnitt der Risikoliste mit dem Risiko „neuer Azimutantrieb nicht verfügbar“

Resümee

Bei Entwicklungen in der Windkraftindustrie sind sowohl die technischen Lösungen, als auch die Entwicklungsprojekte per se Risiko belastet, da die Termin- und Kostenanforderungen in der momentanen Marktsituation die Unternehmen und Mitarbeiter stark fordern.

Jedes Projektteam und die entsprechenden Kontrollgremien müssen ein gezieltes Risikomanagement durchführen, bzw. einfordern. Die zusätzlichen Kosten müssen von der Unternehmensführung bereitgestellt werden, da dieser Mehraufwand wesentlich kleiner ist als die Lösung der später aufgelaufenen Probleme. Diese Zusammenhänge hat Fiedler in seiner Unternehmensbefragung bestätigt gefunden (Fiedler 2005). Ist dieses Bewusstsein im Unternehmen verankert, wird sich auch die Erfolgsrate von Projekten erhöhen.

Literaturverzeichnis

Fiedler, R. 2005: Die Bedeutung des Risikomanagements für Projekte.
Würzburg: University of Applied Science Würzburg
Wallmüller, E. 2004: Projektrisikomanagement – Erfahrungen und Fallgruben.
<http://itq.ch>, abgerufen 05.02.2012
Wirsing, M. 2006: Projektmanagement: Risiko-, Änderungs- und Konfigurationsmanagement, München, Ludwig-Maximilians-Universität München

Kontakt

Dr.-Ing. Jan Brökel
Suzlon Energy GmbH
Kurt-Dunkelmann-Str. 5
18057 Rostock
www.suzlon.com

Reimund Neugebauer, Volker Wittstock,
René Heinig, Tino Riedel & Eckhart Wittstock

VR-basierte Serviceanwendungen als Produkt im Werkzeugmaschinenbau

Einführung

Dienstleistungen spielen in der Werkzeugmaschinenindustrie eine wichtige Rolle, da üblicherweise eine Maschine nicht allein sondern mit einem Bündel an Dienstleistungen verkauft wird. In der Wissenschaft werden solche Produkte als Produkt-Service Systeme oder hybride Leistungsbündel bezeichnet. Im aus Mitteln des Freistaates Sachsen im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Verbundprojekt »Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur adaptiven Unterstützung des Lebenszyklus produktionsnaher Dienstleistungen im Maschinenbau« wurden in einem Schwerpunkt die Möglichkeiten untersucht und Grundlagen geschaffen, um produktbegleitende Dienstleistungen mit Mitteln der Virtual Reality (VR) zu unterstützen.

Anwendungen der virtuellen Realität

Virtual Reality bindet den Nutzer in eine künstliche Welt ein, die er erkunden und mit der er interagieren kann. Diese Eigenschaften machen VR für alle diejenigen Anwendungen interessant, in denen Vorteile aus der Nutzung einer künstlichen Welt gegenüber einem realen Szenario entstehen. So existieren beispielsweise in der Medizin Anwendungen zur Ausbildung von Chirurgen (Hassan et al. 2005) oder im militärischen Bereich beispielsweise als Simulatoren für Piloten (Moshell 1993) oder U-Boote (Stone et al. 2008).

Im Bereich der Produktion technischer Produkte kann der Automobilbau als einer der Hauptanwender virtueller Techniken identifiziert werden (Stark et al. 2010). Typische Anwendungen sind Design-Review, Ein- und Ausbauuntersuchungen, Ergonomieuntersuchungen und Produktpräsentationen. Weitere mögliche Anwendungen in der »Digitalen Fabrik« sind Prozessplanung, Sicherheitstechnik und Anlagenprojektierung (Westkämper et al. 2006). Im Wesentlichen sind dies alles Anwendungen, die unternehmensintern zur Produktentwicklung genutzt jedoch vom Kunden nicht explizit monetär vergütet werden.

Auch in der im Projekt im Fokus stehenden Werkzeugmaschinenindustrie sind die Anwendungen ähnlich. So finden sich Beispiele für Design Review in der Entwicklung von Werkzeugmaschinen, die Nutzung als Werkzeug zur Anlagenplanung und für den Vertrieb (Neugebauer et al. 2006). Neuere Entwicklungen gehen dabei bis hin zur Kopplung einer realen Steuerung mit einem virtuellen Modell (Neugebauer et al. 2010).

Eine im Rahmen des Projektes unter Werkzeugmaschinenbauern durchgeführte Umfrage ergab eine noch geringe Nutzung von Techniken der VR in dieser Branche. Die Ergebnisse bestätigten die Annahme des vorwiegend internen Einsatzes für Belange der Produktentwicklung in Design Reviews, Ergonomiestudien und CAD-Visualisierungen (Neugebauer et al. 2011a).

Methoden für VR-unterstützte Dienstleistungen

Standardsoftwaresysteme für die VR-Darstellung, wie VDP von ICIDO, sind vorrangig auf eine reine Visualisierung von 3D-Informationen in einer immersiven Umgebung ausgelegt. Durch die stereoskopische 1:1 Darstellung kann so in einer größeren Gesprächsrunde leichter ein grundlegendes gleiches Verständnis für den Diskussionsgegenstand geschaffen und Probleme leichter identifiziert werden. Im Dienstleistungsbereich reicht jedoch ein grobes Verständnis nicht aus. Häufig ist es notwendig viele verschiedene miteinander zusammenhängende Detailspekte gleichzeitig zu betrachten. Die Informationen liegen jedoch in unterschiedlichen Systemen und Formaten vor. Insbesondere im Servicebereich müssen einzelne

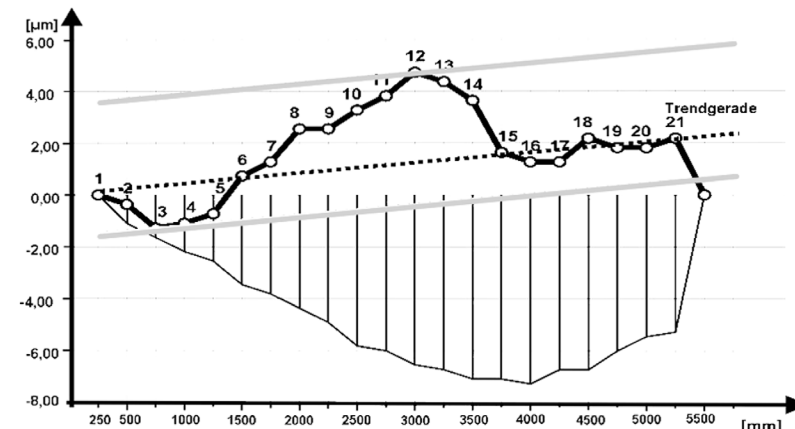


Abbildung 1: Zusatzinformationen – Bsp. Messwerte-Diagramm

Baugruppen, sowie Kraft- und Medienflüsse berücksichtigt werden. Bestenfalls geschieht dies bereits bei einer servicegerechten Konstruktion der Werkzeugmaschine von Beginn an.

Integration von Zusatzinformationen

Zusatzinformationen sind Informationen, welche über die 3D-Modell-Daten hinaus für eine VR-Präsentation wichtig und deshalb in einer VR-Anwendung zu integrieren sind. Häufig sind dies Beschreibungen in Textform oder Bilder bis hin zu komplexeren schematischen interaktiven Darstellungen, wie z.B. sich im Zeitverlauf ändernde Diagramminhalte (siehe Abbildung 1). Zur Integration von Zusatzinformationen, wurde innerhalb des Projektes ein Informationsträger konzipiert und zusammen mit ICIDO umgesetzt.

Bedienung

Bisherige VR-Präsentationen beschränken sich häufig auf eine reine Darstellung der 3D-Modelle. Es ist möglich sich in das Modell oder um das Modell herum zu navigieren, eventuell auch einzelne Teile farblich hervorzuheben, zu verschieben und entfernen oder auch Schnittebenen zu erzeugen. In solchen Anwendungen reicht ein Interaktionsgerät, wie ein »Standard-Flystick« noch aus (siehe Abbildung 2).

Will man jedoch eine komplexe VR-Präsentation durchführen, bei der es möglich ist im Zeitverlauf Präsentationsgegenstände zu wechseln oder ohne Menunavigation direkt einzelne Funktionen, wie einen Screenshot zu erstellen oder zusätzliche Informationen ein- und auszuschalten, wird ein komplexeres Interaktionsgerät mit einer höheren Anzahl individueller Freiheitsgrade benötigt. Aus Gründen der Ergonomie, Kosten und des Reifegrades wurde innerhalb des Projektes aus einem Vergleich von am Markt erhältlichen Interaktionsgeräten (Neugebauer et al. 2011b) die Wii-Remote ausgewählt und an die spezifischen Erfordernisse angepasst. So wurde im ersten Schritt ein Prototyp entworfen, indem an einen käuflich erwerb- baren Zusatzaufsatz für die Wii-Remote das Target Tree für das optische Tracking befestigt wurde. Nach einigen Tests und einer studentischen Arbeit, welche die Bedienung im Vergleich zum herkömmlichen Flystick untersuchte, wurde klar, dass die Lösung mit einem Zusatzaufsatz die Bedienbarkeit erheblich beeinflusst. Im zweiten Schritt wurde darauf verzichtet und eine modifizierte Wii-Remote konstruiert bei der die native Infrarot-Blende durch ein eigens angefertigtes Bauteil ersetzt wurde (siehe Abbildung 3).

VR-Presenter

Zur Nutzung des Informationsträgers und der Einbindung des neuen Interaktionsgerätes wurde innerhalb des Projektes eine Software erstellt, welche es ermöglicht VR Präsentationen ähnlich wie im Powerpoint zu erstellen. Der sogenannte VR-Presenter wurde mit der Software VDP von ICIDO und der Wii-Remote verknüpft. Er besitzt jedoch Schnittstellen, die es ermöglichen weitere VR-Anzeigesysteme und Interaktionsgeräte anzukoppeln. Umgesetzte Funktionen des VR-Presenter sind unter anderem:

- Einzelne Klicks vor- und zurückschalten,
- Kapitel vor- und zurückschalten,
- Sämtliche Informationsträger mit Zusatzinformationen ein- und ausblenden
- Screenshots erzeugen
- Die Präsentation steuern (Start/Stop, Play/Pause)
- Den Viewpoint und Animationen mit einem Klick ändern/ weiterschalten
- Klicks über einen Zeitverlauf automatisch weiterschalten

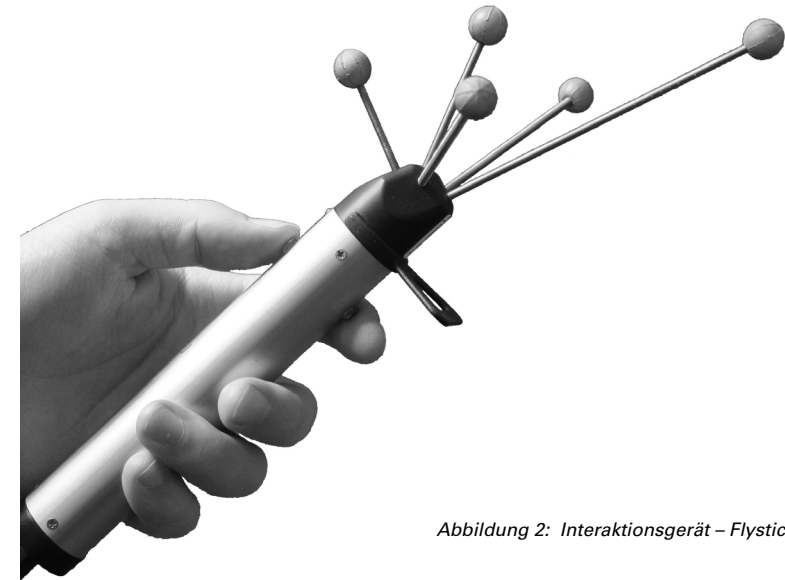


Abbildung 2: Interaktionsgerät – Flystick



Abbildung 3: Interaktionsgeräte – umgebaute Wii-Remote (links mit Zusatzaufsatz, rechts ohne)

Außerdem wurde eine grafische Desktopoberfläche geschaffen, um auch am Desktop PC die Präsentation steuern und die Wii-Remote konfigurieren zu können (siehe Abbildung 4).

Beispielanwendung „Schulung von Instandhaltungspersonal“

Der Projektpartner Niles Simmons (NSI), ein multinationaler Werkzeugmaschinenhersteller, bietet 3 Arten von Schulungen zur verkauften Maschine an, dies sind Instandhalterschulungen, Bedienschulungen und Programmierschulungen. Im Projekt wurden zwei Anwendungen für Instandhaltungsschulungen umgesetzt, da hier im konkreten Anwendungsfall das größte Potenzial für den Einsatz von VR gesehen wurde. Die erste Anwendung betraf die Hauptspindeleinheit eines typischen NSI Bearbeitungszentrums. Gerade in diesem Bereich kommen die Vorteile der VR-Visualisierung sehr gut zum Tragen, da die Arbeitsweise der Spindel während des Betriebes durch einen Ölfilm und der für das Auge zu hohen Geschwindigkeit nicht erkennbar ist.

Die zweite Anwendung betraf die Geometrieabnahme der Maschine an sich. Diese muss bei Inbetriebnahme einer Maschine und nach einer Kollision innerhalb der Maschine, durchgeführt werden. Die Geometrieabnahme besteht dabei aus einer Vielzahl von einzelnen Schritten, wie Geometrievermessungen an Maschinenbett, Hauptspindel, Reitstock und Fräsaggregat. Dabei werden Messungen durchgeführt und die Messwerte analysiert, ob sie im Toleranzbereich liegen. Falls Messwerte außerhalb des in der jeweiligen DIN-Vorschrift definierten Toleranzbereiches liegen, werden Maßnahmen durchgeführt, wie z.B. Justierungen an Verstelleinheiten oder Auswechslungen von Bauteilen.

Probleme

Ein grundlegendes Problem für die Nutzung von VR im Werkzeugmaschinenbau ist das Fehlen von Schnittstellen, um 3D-Daten direkt zu verwenden. Aus diesem Grund müssen teilweise aufwendig Daten erzeugt oder konvertiert werden. Bei einer Konvertierung gehen häufig bereits erstellte Animationen und Informationen zur Kinema-

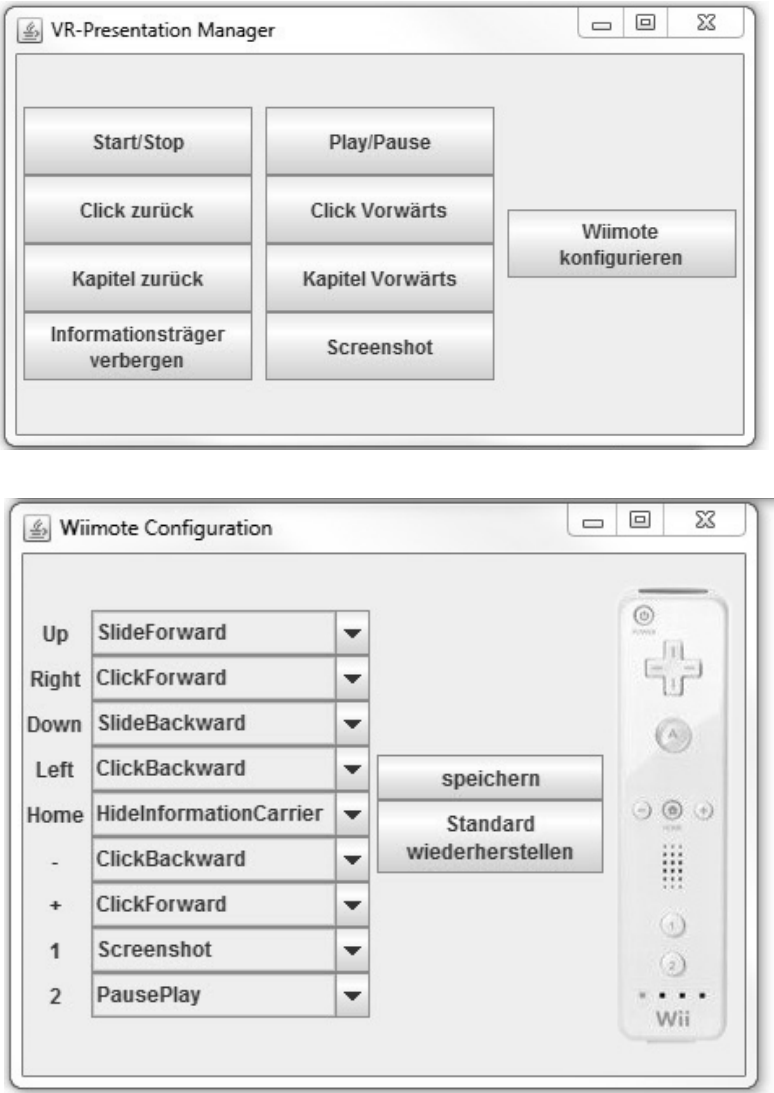


Abbildung 4: VR-Presenter



Abbildung 5: Schulungsanwendung

tik verloren. Über zusätzliche Systeme müssen diese Informationen wieder neu erzeugt werden. Um 3-Modelle echtzeitfähig zu machen müssen für die VR-Aufbereitung häufig Daten-Reduktionen vorgenommen werden. Durch die Reduktion gehen häufig Informationen zur Struktur verloren. Dies kann sich im späteren Verlauf, wenn sich diese Informationen als wichtig erweisen, als Problem herausstellen. CADSysteme bieten einen spezifischen Funktionsumfang, der sich speziell an die Bedürfnisse in der Konstruktion orientiert. Für eine Präsentation im Service-Bereich, in welchem häufig auch externe Personen Adressat sind, werden noch zusätzliche Funktionalitäten, wie erweiterte Materialeinstellungen oder Touch-Sensoren an speziellen Objekten, zur Interaktion benötigt. Diese müssen in dafür geeigneten Folge-Systemen erstellt werden. In Summe der Probleme, setzt die bisherige Nutzung durch den Endanwender, eine vorherige grundlegende Erstellung durch Experten voraus.

Zusammenfassung und Ausblick

Erfahrungen innerhalb des Projektes und Beobachtung der aktuellen Entwicklung zeigen, dass professionell einsetzbare Lösungen für VR im Dienstleistungsbereich schrittweise näher rücken. Größere Fortschritte durch die ständige Weiterentwicklung von Interaktionsmöglichkeiten verbessern die Bedienung und machen den stetig wachsenden Funktionsumfang leichter nutzbar.

Der Endanwender kann jedoch bisher ohne sich intensiv mit der Technik auseinanderzusetzen nur Details in einer fertigen Anwendung ändern. Dies zu verbessern durch die Schaffung von intuitiv bedienbaren Autorensystemen sind ein Schlüsselkriterium für die Durchsetzung und eine Vermarktung von VRSchulungen als neues Dienstleistungsangebot in einem hybriden Produkt zur Werkzeugmaschine.

Forschungspotentiale existieren in der Konzeptionierung von konkreten Vorlagen für spezifische Anwendungen und einem intuitiven Autorensystem insgesamt.



Gefördert aus Mitteln
der Europäischen Union

Europa fördert Sachsen.
EFRE
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



*Dieser Vorhaben wurde aus Mitteln
des Europäischen Fonds für
regionale Entwicklung (EFRE) und
des Freistaates Sachsen gefördert.*

Literaturverzeichnis

- Hassan I., Sitter H., Schlosser K., Zielke A., Rothmund M., Gerdes B. 2005: A virtual reality simulator for objective assessment of surgeons' laparoscopic skill. In: Der Chirurg; Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin, 76, 151–156
- Moshell M. 1993: Three views of virtual reality: virtual environments in the US military. In: Computer, 26, 81–82
- Stone R., Caird-Daley A., Bessell K. 2008: SubSafe: a games-based training system for submarine safety and spatial awareness (Part 1). In: Virtual Reality, 13, 3–12
- Stark R., Hayka H., Israel J.H., Kim M., Müller P., Völlinger U. 2010: Virtuelle Produktentstehung in der Automobilindustrie. In: Informatik-Spektrum, 34, 20–28.
- Westkämper E., Runde C. 2006: Anwendungen von Virtual Reality in der Digitalen Fabrik – eine Übersicht. In: wt Werkstattstechnik online, 96, 99–103.

- Neugebauer R., Weidlich D., Zickner H. 2006: Virtual Reality in der Werkzeugmaschinenindustrie - Praktische Anwendung und Forschung. In: ZWF-Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 9
- Neugebauer R., Klimant P., Wittstock V. 2010: Virtual-Reality-Based Simulation of NC Programs for Milling Machines. CIRP Design Conference 2010
- Neugebauer R., Heinig R., Wittstock E., Jentsch S. 2011a: Virtual Reality im konstruktiven Einsatz. In: IT & Production, 11, 7
- Neugebauer, R., Heinig, R., Wittstock, E., Junghans, T., Riedel, T., Richter, A. 2011b: Enhancing Technical Training with Virtual Reality (Case Study), Proceedings of Annual International Conference "Virtual and Augmented Reality in Education" (VARE 2011)

Kontakt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c.
Reimund Neugebauer
Dr.-Ing. Volker Wittstock
Dipl.-Wirt.-Inf. René Heinig
Dipl.-Ing. (FH) Tino Riedel
Dipl.-Wirt.-Ing. Eckhart Wittstock
Technische Universität Chemnitz
Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
09113 Chemnitz
<http://www.tu-chemnitz.de/mb/WerkzMasch/>

Christoph Kneschke & Martin Schmauder

Grundlagen zur methodischen Beurteilung der montagegerechten Produktgestaltung anhand virtueller Werkzeuge

1 Einleitung

Die frühzeitige Identifikation konstruktionsbedingter Produktionsprobleme ist wichtig, um Änderungskosten im Produktentwicklungsprozess (PEP) zu minimieren und die effiziente Produktion eines neuen Produktes zu gewährleisten. In der montagegerechten Gestaltung von Produkt und Prozess werden die mit viel Aufwand hergestellten Prototypen genutzt, um die Montierbarkeit der konstruierten Geometrie vor dem Start der Serienproduktion sicherzustellen. Die stetige Forderung nach einer Verkürzung des PEP bei gleichzeitiger Erhöhung der Variantenvielfalt macht eine Reduzierung dieser Hardwarebauphasen notwendig. Neue Simulationstechnologien, Methoden der Virtual Reality (VR) und das Rapid Prototyping haben das Potenzial, die Produktqualität auch in einem verkürzten PEP sicherzustellen und werden daher vermehrt eingesetzt. Eine vollständige Verlagerung der montagegerechten Produktgestaltung in den virtuellen Raum ist aber aufgrund vieler Bedenken hinsichtlich der Aussagekraft und Akzeptanzproblemen in der Anwendung derzeit jedoch nicht möglich.

Im Beitrag finden die Einteilung des Themas im PEP und die Abgrenzung hinsichtlich der Absicherung der montagegerechten Produktgestaltung statt. Anschließend wird der Begriff der Montage und die zu beachtenden Einflüsse beschrieben. Im Absatz 2.4 werden aktuelle Methoden und Fragenkataloge zur Bewertung der montage-

gerechten Produktgestaltung aufgezeigt. Kapitel 3 stellt Ansätze dar, aktuell verfügbare virtuelle Beurteilungswerkzeuge zu gliedern. Im Kapitel 4 werden die Handlungsbedarfe von Bewertungsmethodik (2.4) und Beurteilungswerkzeugen (3.2) zusammengefasst. Es werden drei Hypothesen und eine Schlussfolgerung formuliert. Kapitel 5 stellt den daraus erarbeiteten Fragenkatalog und Abhängigkeiten bei der Auswahl der Werkzeuge vor. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick zur weiteren Vorgehensweise.

2 Methoden zum Bewerten der montagegerechten Produktgestaltung

2.1 Grundlagen Produktentwicklungsprozess und Abgrenzung

Die Sicherstellung der Montierbarkeit ist ein Teilprozess im PEP der Automobilindustrie. An der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung werden die montagegerechte Produktgestaltung und die produktionsbezogene Produktabsicherung angewendet, um die fehlerfreie Interaktion von Produkt und Produktionssystem (Prozess) sicherzustellen (Müller 2007, S. 53).

Die Absicherung der fertigungsgerechten Produktgestaltung lässt sich mit dem Vorgehensmodell zum Lösen von Problemen in der VDI 2221 beschreiben. Dabei lassen sich die Phasen »Problemanalyse«, »Problemformulierung« und »Systemsynthese« der fertigungsgerechten Produktgestaltung zuordnen. Der Fokus des Beitrags liegt auf der produktionsbezogenen Produktabsicherung mit den Phasen »Systemanalyse«, »Beurteilung« und »Entscheidung«.

Bei der Konstruktion neuer technischer Lösungen sind die Grundregeln »eindeutig«, »einfach« und »sicher« zu beachten (Pahl et al. 2007). Zudem sind Gestaltungsrichtlinien erarbeitet worden, welche die Zielerreichung des methodischen Entwerfens bezüglich der Anforderungen »Erfüllung der technischen Funktion«, »wirtschaftliche Realisierung« und »Sicherheit für Mensch und Umgebung« sicherstellen (Abbildung 2). Im Beitrag wird die Gestaltungsrichtlinie »montagegerecht« näher untersucht.

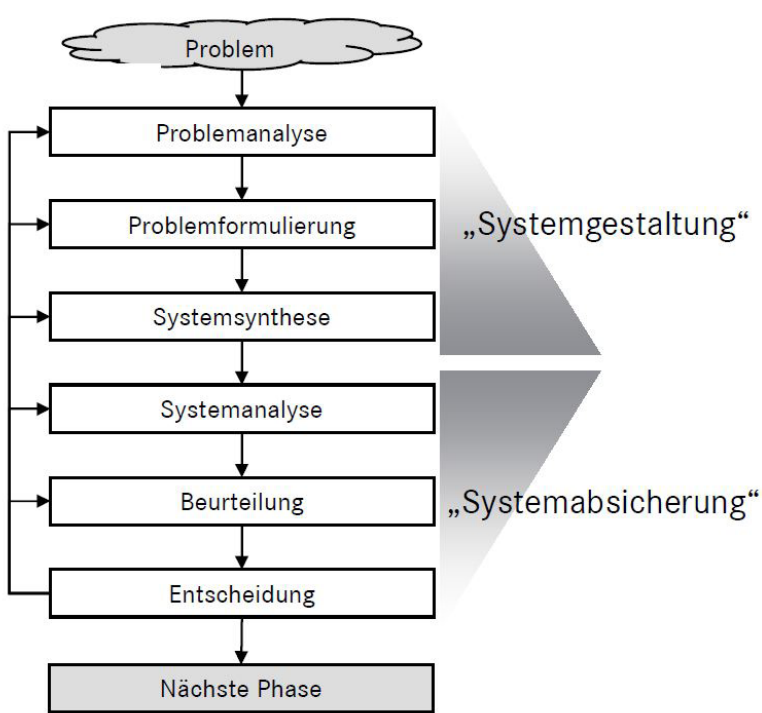


Abbildung 1: Vorgehensweise und Problemlösungszyklen (VDI 2221, Müller 2007, S.32)

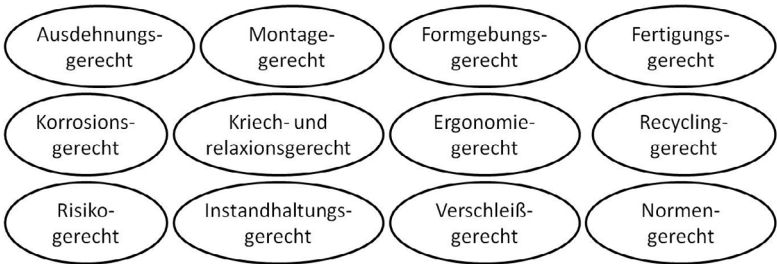


Abbildung 2: Gestaltungsrichtlinien nach (Pahl et al. 2007, S. 406–513)

2.2 Montagedefinition

Unter Montage wird der planmäßige Zusammenbau von Bauteilen und/oder Baugruppen (Modulen) zu Erzeugnissen (Produkten) bzw. zu Baugruppen höherer Erzeugnisebenen verstanden. Dabei wird prinzipiell in Primärmontage (Fügen) und Sekundärmontage (Handhaben, Kontrollieren, Justieren, Sonderoperationen) unterschieden (VDI 2860).

Der Montageprozess wird von Pahl et al. in Anlehnung an die VDI Richtlinie 3239 in folgende Teiloperationen unterteilt:

- Bauteile speichern
- Werkstücke handhaben (Erkennen, Ergreifen, Bewegen)
- Bauteile positionieren (Orientieren, Ausrichten)
- Bauteile fügen (beispielsweise Einlegen, Einpressen)
- Einstellen, um Toleranzen auszugleichen
- Sichern (Befestigen)
- Kontrollieren (Pahl et al. 2007)

Es wird zwischen automatischer (AM) und Handmontage (auch manuelle Montage MM) unterschieden. Die Bewertungskriterien und die Einflüsse sind bei beiden Montageformen ähnlich. Eine Verbesserung hinsichtlich automatisierter Montage hat auch einen Einfluss auf eine mögliche Handmontage und umgekehrt (Pahl et al. 2007, S. 469–470). Daraus lässt sich folgern, dass die Bewertungsmethodik einer automatisierten Montage potenziell auch auf die manuelle Montage angewendet werden kann.

Untersuchungsgegenstand des Beitrags ist die manuelle Montage innerhalb der Automobilindustrie, daher werden vor allem die Teiloperationen »Handhaben«, »Positionieren« und »Fügen« betrachtet. Die Vorgänge Einstellen und Sichern spielen nur bei der Nutzung von zusätzlichen Montagewerkzeugen eine Rolle.

2.3 Einflusskriterien der Montage

Verschiedene Einflüsse entscheiden darüber, ob eine Montageaufgabe durchführbar ist oder nicht. Aus einer Expertenbefragung und allgemeinen Erfahrungen zur Montageabsicherung wurden im Rahmen von eigenen Voruntersuchungen Einflüsse auf die Montierbarkeit zusammengestellt und hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit im PEP nach Produkt und Produktionsprozess unterschieden.

Produktseitig sind vor allem Eigenschaften, wie Größe, Gewicht, Schwerpunkt, Materialeigenschaften und Verformbarkeit des zu montierenden Bauteils und des konstruierten Bauraumes, für die Montierbarkeit verantwortlich. Desweiteren sind fertigungsbedingte Toleranzen und Grenzlagen zu beachten.

Prozessseitig gibt die geplante Montagereihenfolge den prinzipiellen Bauraum vor. Das zu überprüfende Montagekonzept liefert weitere Prozessinformationen, wie die geplante Montagehöhe und Position des Fahrzeugs während der Montage, genutzte Serienbetriebsmittel (SBM) und Werkzeuge. Bei der manuellen Montage müssen die anthropometrischen Grundlagen des Menschen (Greifpositionen der menschlichen Hand, Bewegungs- und Kraftrestriktionen) sowie ergonomische Rahmenbedingungen Beachtung finden. Weitere Arbeitsbedingungen im Werk, wie Lautstärke, Beleuchtung, Taktzeit und Häufigkeit der Montageaufgabe, können zusätzlich die Entscheidung der Montierbarkeit beeinflussen.

Neben dieser Einteilung beschreibt auch Ross in seiner Arbeit die Einflusskriterien auf die Teilprozesse Handhaben und Fügen (Ross 2002). Dabei findet keine Unterscheidung in Produkt und Prozess statt. Die Kriterien sind detaillierter mit Fokus auf automatische Montageprozesse, beinhalten aber die gleichen Einflussbereiche wie die vorher genannten.

2.4 Bewertungsmethoden

Um die vorgestellten Konstruktionsprinzipien und die Einflüsse auf den Montageprozess umzusetzen sowie konstruierte Produkte danach zu bewerten, wurden nachfolgend aufgeführte Methoden entwickelt. Grundlegende Bewertungsmethoden (Pahl et al. 2007) und an die montagegerechte Produktgestaltung angepasste Methoden werden beschrieben (Meyer et al. 2009, Ross 2002).

Nach Pahl et al. ist der erste Schritt zur Beurteilung einer Lösung das Erkennen von Bewertungskriterien. Drei Einzelschritte werden aufgeführt:

- Aufstellen von Zielvorstellungen
 - Ableiten von Bewertungskriterien
 - Beurteilung der Lösungsvarianten
- (Pahl et al. 2007, S. 314)

Zur Bewertung eines Entwurfs empfiehlt sich die Zusammenarbeit von Konstruktion und Montageplanung. Um einen Überblick über die Montageaufgabe zu bekommen, ist das gedankliche Zerlegen des Produktes (Demontage) hilfreich (Pahl et al. 2007, S. 478).

Eine an die Herstellung von Leistungselektronik angepasste DfMA-Methode (Design for Manufacture and Assembly) wurde von Meyer et al. (2009) vorgestellt. Die Vorgehensweise lässt sich in Stufen einteilen. Stufe 1 befasst sich vor allem mit der Beurteilung der montagegerechten Produktgestaltung durch Abstimmung zwischen Produktentwicklern und Produktspezialisten und gliedert sich in 3 Phasen. In der Produktanalyse (Phase 1) wird eine Stückliste erstellt und den Einzelbauteilen werden die geplante Anzahl an Varianten, Verwechslungsgefahr und weitere Eigenschaften zugeordnet. Ziel der letzten Phase ist es, Schwächen einzelner Prozesse und Verbesserungsalternativen aufzuzeigen. Dabei werden die Einzelschritte mit einer Checkliste und Bewertungskriterien in einer Ampelsystematik (rot, gelb, grün) bewertet.

Bei der Bewertung wird die Prozessreihenfolge gespiegelt. Dieses rückwertige Vorgehen spart eine Iterationsschleife, da Schnittstellen von Baugruppen und Bauteilen rechtzeitig erkannt werden.

Die Qualität der Bewertung hängt stark von der Erfahrung und der Produkt-/Prozesskenntnis der Teilnehmer ab. Mit Musterteilen und Visualisierungsobjekten können die Einzelschritte des Handlings demonstriert werden. So werden Probleme schneller ersichtlich (Meyer et al. 2009).

Ross (2002) beschreibt eine Methode zur Bewertung der Automatisierbarkeit von Montageprozessen. Dabei wurden Kriterien entwickelt, welche helfen, die Einflüsse auf die Montage zu untersuchen und mit einer quantifizierbaren Bewertungssystematik einzuschätzen. Beispielhaft werden einige Bewertungskriterien aufgezählt, welche auch später im Konzept berücksichtigt werden:

- Bauteil formstabil
- Greifflächen vorhanden
- Hüllvolumen
- Freiraum beim Fügen

3 Werkzeuge zum Beurteilen der montagegerechten Produktgestaltung

3.1 Einteilung nach Art des genutzten Fahrzeugmodells (digital – real)

Die Werkzeuge lassen sich nach Art des untersuchten Produktmodells unterteilen. Sogenannte Hardware Werkzeuge sind reale Prototypen, Vorgänger- oder Vergleichsfahrzeuge und Ersatzwerkzeuge wie Rapid Prototyping (Real Environment - RE). Werden zunehmend virtuelle Produktmodelle untersucht, so spricht man von Augmented Reality (AR), Augmented Virtuality (AV) oder bei vollständiger virtueller Untersuchung von Virtual Environment (VE) (Milgram & Kishino 1994).

Um die Montagegerechtigkeit anhand des realen Prototypenbaus einzuschätzen, werden die einzelnen Bauteile im Vorfeld, je nach Anspruch, mit verschiedenen Fertigungsverfahren und Materialien gefertigt. Im Versuchsfahrzeugbau werden die Einzelteile dann zum Gesamtfahrzeug, als Funktionscubings oder als Teilaufbau montiert (Müller 2007, S. 51). Beim Aufbau muss jeder einzelne Schritt selbst durchgeführt werden. Können Bauteile

nicht montiert werden, ist dies sofort wahrnehmbar. Stehen noch nicht alle Prozessinformationen zur Verfügung, so wird auf Erfahrungen von vorhergehenden Baureihen zurückgegriffen (Müller 2007, S. 52). Die Hardware beantwortet hier Fragestellungen der montagegerechten Produktgestaltung, die vorher nicht explizit untersucht werden sollten. Auf das reale Modell wirken ähnliche Einflüsse (siehe 2.3) wie später im Produktionswerk:

- Materialeigenschaften der Bauteile (flexible Bauteile, Gewicht, Schwerpunkt)
- Fertigungstoleranzen der Bauteile
- Reale Bauteilbewegung (Bewegung, Halten und Sichern mit Hand und/oder Montagewerkzeugen)
- Physikalische Einflüsse, wie beispielsweise der Schwerkraft (nicht befestigte Bauteile fallen nach unten und schweben nicht, wie im virtuellen Modell)

Im virtuellen Modell ist das Fahrzeug bereits vollständig aufgebaut. Die unter 2.3 genannten Einflüsse sind im einfachen, virtuellen Fahrzeugmodell nicht integriert, können aber teilweise einzeln simuliert werden (siehe 3.2). Bei der Beurteilung der Montagegerechtigkeit besteht daher die Gefahr, Handlungsbedarfe zu übersehen, weil einige Einflüsse keine Beachtung finden. Zudem sind Aussagen über die Aussagekraft virtueller Untersuchungen schwierig. Derzeit ist viel Erfahrung aus dem realen Versuchsfahrzeugbau notwendig, um virtuelle Einbauversuche richtig durchzuführen und die Ergebnisse sicher zu deuten (siehe Müller 2007 S. 48).

3.2 Einteilung nach Art der Informationsaufnahme/ Wahrnehmung bei der Beurteilung

Eine weitere Möglichkeit die Beurteilungswerkzeuge einzuteilen, ist die Unterscheidung hinsichtlich der Art der Informationsaufnahme. Auf der einen Seite gibt es Werkzeuge, die die Möglichkeit bieten, das Produkt oder einzelne Zustände nach verschiedenen Einflusskriterien (2.3) getrennt zu beurteilen. Die Informationen werden dabei nur indirekt wahrgenommen. Teilweise reichen einfache Aussagen, wie »Bauteil ist kollisionsfrei positionierbar« oder »Bauteil X kollidiert mit Bauteil Y«. Komplexere Ergebnisse werden mit Mess-

werten, Zustandsbildern oder simulierten Montagepfaden (Tracks, Videos) dargestellt, die durch Erfahrungswissen gedeutet werden müssen. Beispiele sind hier:

- DMU Untersuchungen (Digital Mock UP), wie Messungen, Schnitte, verschiedenen Ansichten und Durchdringungsvolumen bei Kollision (Krause et al. 2007)
- die automatische Simulation kollisionsfreier Montagepfade (Wittmann 2011)
- die statische Positionierung virtueller Menschmodelle zur Einschätzung von Sichtbarkeit, Erreichbarkeit und Ergonomie (Alexander & Paul 2012), (Kamusella 2010)
- Simulation flexibler Bauteile (Völlinger 2011)
- Simulation von Toleranzen und Grenzlagen (Bechthold 2007)

Auf der anderen Seite gibt es Werkzeuge, welche eine direkte Wahrnehmung des Montageszenarios mit den eigenen Sinnen ermöglichen. Hier sind reale Einbauversuche mit Hardwareprototypen zu benennen, aber auch Untersuchungsmöglichkeiten der VR (Kunz 2004). Zu den virtuellen Werkzeugen zählen:

- 3D Stereo Visualisierung auf Projektionswänden, mit Head Mounted Display (HMD) oder in einer Cave (Cave automatic virtual environment) (Stork 2000)
- Interaktive Steuerung virtueller Menschmodelle (Härtel et al., 2012)
- 3D Interaktionsgeräte zur virtuellen Bauteilbewegung (Stork 2000), teilweise mit taktilen oder haptischem Feedback (Kern et al. 2009)
- Zusätzliche akustische Rückmeldung (Lecuyer 2002)

Perret beschreibt die Vorgehensweise der Pfadsimulation eines Montageszenarios mit einem haptischen Eingabegerät. Aufgrund der hohen benötigten Rechenkapazität bei Echtzeitvisualisierung und der hohen benötigten Frequenz bei haptischem Feedback müssen starke Einschränkungen bei der Genauigkeit der Kollisionsberechnung hingenommen werden. Die Simulation von Fügevor-

gängen mit engen Passungen erfordern daher einen von der Kollisionsberechnung entkoppelten Verbau, beispielsweise mit definierten Einschränkungen der axialen Bewegung (Perret 2010).

Forschungen zur Wahrnehmung eines virtuellen Montageszenarios wurden von Stork (2000), Kersten (2003) und Voß (2010) unternommen. Voß kommt zu dem Ergebnis, dass die Wahrnehmungsschwellen von visuellem und haptischem Feedback in realer und virtueller Umgebung gleich sind (Voß 2010). Dass heißt, virtuell durchgeführte Untersuchungen hinsichtlich Wahrnehmung von Größen und Positionen kommen zum gleichen Ergebnis, wie real durchgeführte.

4 Handlungsbedarfe und Hypothesen

Zur Beschreibung der Handlungsbedarfe werden nachfolgend drei Hypothesen (H) aufgestellt.

H1: Virtuelle Werkzeuge sind in der Lage einzelne Einflüsse zu simulieren und klar definierte Zustände realitätsnah darzustellen.

Es sind umfangreiche Simulationsmethoden entwickelt worden. Sind alle Restriktionen und Eigenschaften des Montageszenarios im Vorfeld bekannt, so kann die Wirkung einzelner Einflüsse auf Produkt und Prozess simuliert werden. Die Simulation ist meist nicht echtzeitfähig und kann nur indirekt wahrgenommen werden.

H2: Die Aussagekraft der Werkzeuge ist für die Beurteilung eines kompletten Montageprozesses im virtuellen Einbauversuch (VR) nicht nachgewiesen.

Derzeit ist es nicht möglich, einen realitätsnahen und direkt wahrnehmbaren Einbauversuch in der virtuellen Welt komplett darzustellen. Teilweise mangelt es an der Echtzeitfähigkeit der Simulationen. Haptische Eingabegeräte können nicht alle Kollisionen (zum Beispiel des Oberarms) wiedergeben und zeigen teilweise eine ungenügende Genauigkeit bei der Kollisionsberechnung. Zudem ist die Verknüpfung der unter 3.2 genannten Werkzeuge sehr aufwendig,

teilweise nicht möglich. Es können immer nur bestimmte Einflüsse und Zustände gleichzeitig simuliert werden. Die Rolle der Wahrnehmung bei der Beurteilung der montagegerechten Produktgestaltung wurde noch nicht hinreichend genau untersucht.

H3: Die virtuelle Welt beantwortet nur Fragen, die zuvor gestellt wurden.

Es hat sich noch keine virtuelle Beurteilungsmethodik etabliert, welche auf die Aussagekraft der virtuellen Werkzeuge angepasst ist und eine umfassende Prozessbeurteilung ermöglicht. Die unter 2.4 vorgestellten Bewertungsverfahren definieren zwar allgemeingültige Kriterien zur montagegerechten Produktgestaltung, es wird jedoch kein konkreter werkzeugabhängiger Beurteilungsleitfaden genannt. Viele Fragestellungen, wie »Wann ist das Bauteil greifbar?« können in der Realität einfach im Versuch beantwortet werden. In der virtuellen Welt ist eine detailliertere Analyse nötig: »Sind die Greifflächen groß genug«, »Kann die richtige Greifposition wahrgenommen/gesehen werden«, »Ist das Gewicht/der Schwerpunkt handhabbar?«.

Aus den Hypothesen lässt sich die Schlussfolgerung (S) ableiten: *S: Eine an die Aussagekraft der Werkzeuge angepasste Methodik mit Fragenkatalog hilft bei der virtuellen Beurteilung eines Montageszenarios. Da keine vollumfassende Prozesssimulation möglich ist, ist es nötig, den Montageprozess in einzelnen virtuell absicherbare Einzelzustände zu unterteilen.*

5 Methodik zur virtuellen Beurteilung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des erarbeiteten Fragenkatalogs vorgestellt. Die Beurteilung der Montageaufgabe ist, in Abbildung 3 für das Beispiel »handhabbar« ersichtlich, in verschiedene Teilziele untergliedert (Vorgehensweise nach Pahl et al. siehe 2.4).

Die im Folgenden unter 5.1 genannten Kriterien sollten im Vorfeld Beachtung finden. Sie stellen die realistische Ausgangssituation sicher. Die Kriterien werden entweder durch die Entwickler und Prozesspla-

ner vorgegeben oder werden mit im produktiven industriellen Einsatz befindlichen Werkzeugen definiert (Hypothese 1). Nur dadurch ist es möglich, die Zustände vor der Montage korrekt darzustellen. Die eigentlichen Handlungsbedarfe bei der Nutzung virtueller Werkzeuge bestehen hinsichtlich der Absicherung der Montierbarkeit, also eines komplexeren Montageprozesses (Hypothese 2). Gerade die Werkzeuge für die Beurteilung der Prozesskriterien Handhaben, Positionieren und Fügen unter 5.2 sollen daher in zukünftigen Untersuchungen näher analysiert werden.

Der Detaillierungsgrad der Beantwortung der Fragenstellungen und damit die Auswahl der Beurteilungswerkzeuge sind von verschiedenen Bedingungen abhängig. Diese werden unter 5.3 beschrieben.

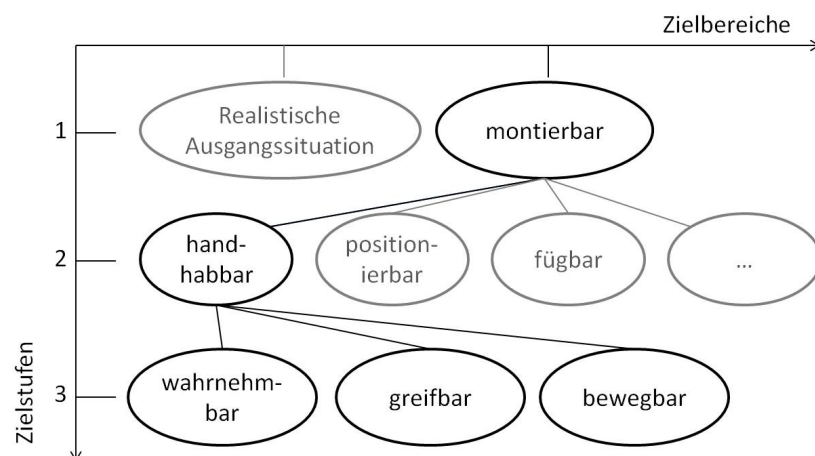


Abbildung 3: Zielstufenbaum Kriterium „handhabbar“ in Anlehnung an (Pahl et al., 2007)

5.1 Fragenkatalog: Definition und Voruntersuchungen

Definition der Ausgangssituation:

- Sind alle einzelnen Tätigkeiten beschrieben?
- Gibt es eine geplante Montagereihenfolge? Welche Bauteile sind zum Montagezeitpunkt vorhanden?
- Welche Bauteile und Befestigungselemente werden während der Montage hinzugefügt?
- Welche Bauteile werden bewegt, welche sind flexibel? Wie viele Montagemitarbeiter sind für die Montageaufgabe verantwortlich?
- Welches Menschmodell soll gewählt werden?
- Welche Tätigkeiten sollen mit welcher Hand durchgeführt werden (einhändig oder beidhändig)?
- Sind Werkzeuge oder SBM geplant?
- In welcher Höhe und Orientierung befindet sich das Fahrzeug?

Voruntersuchungen zur Überprüfung der Konstruktion

- Wie groß sind die zu erwartenden Bauteil-Toleranzen und Grenzlagen?
- Stimmen die konstruierten Längen der flexiblen Bauteile mit den technischen Zeichnungen überein? Reale Bauteile werden nach der Zeichnung gefertigt, nicht nach der CAD Konstruktion.
- Stimmt die konstruierte Lage der flexiblen Bauteile mit der Realität überein? (zwischen zwei Fixpunkten, bei losen Kabel-, Bowdenzug- und Schlauchenden vor Montage)
- Welche Bauteileigenschaften sind gegeben (Größe, Gewicht, Schwerpunkt)?

5.2 Fragenkatalog: Absicherung Montageprozess

Handhaben der Bauteile

- Sind die zu bewegenden Bauteile greifbar? (zu beachten: Größe, Richtung der Kraftausübung, Orientierung des Bauteils)
- Ist die richtige, gedachte Greifposition wahrnehmbar?

- Sind die gegriffenen Bauteile handhabbar/bewegbar?
(zu beachten: Größe, Gewicht, Schwerpunkt, Anthropometrie der Montagemitarbeiter)

Positionieren der Bauteile

- Gibt es einen kollisionsfreien Montagepfad der frei beweglichen Bauteile?
- Wie groß ist der zur Verfügung stehende Fügerraum?
- Gibt es einen kollisionsfreien Montagepfad der frei beweglichen Bauteile unter Berücksichtigung der Greifposition und der anthropometrischen Grundlagen?
- Wird die Beweglichkeit durch Kinematiken oder flexible Bauteile (vor, während und nach der Montage) beeinflusst?
- Besteht Kollisionsgefahr (Beschädigung, Verletzung)?
- Gibt es eine Beeinflussung der Bauteilbewegung bei der Montage mit zwei Mitarbeitern?
- Ist eine Fehlpositionierung möglich? Kann der richtige Bewegungspfad wahrgenommen werden?

Fügen der Bauteile

- Lässt sich der Fügevorgang mit der Greifposition durchführen (abhängig von Kraftrichtung und Wahrnehmung)?
- Kann der erfolgreiche Fügevorgang (die richtige Fügestelle) wahrgenommen werden (fester Anschlag, akustische Rückmeldung)?
- Wird die Beweglichkeit durch Kinematiken oder flexible Bauteile beeinflusst?
- Ist ein Verkanten möglich? Sind zur Behebung größere Kräfte, zum Beispiel durch eine andere Greifposition nötig?
- Worauf konzentriert sich der Montagemitarbeiter? Sind mehrere verschiedene Montagebereiche zu beachten?

5.3 Leitfaden zur Auswahl der Werkzeuge

Die Auswahl der Werkzeuge und damit die Beantwortung des Fragenkatalogs sind von drei Eigenschaften abhängig:

- Zeitpunkt der Absicherung im PEP (Anforderungen an das Absicherungsergebnis)
- Die Anforderungen an das Absicherungsergebnis sind abhängig von der Projektreife. Zu Beginn der Entwicklung werden Konzepte häufig bestätigt oder geändert. Werkzeuge zur Ermittlung von Zuständen helfen, Handlungsbedarfe zu ermitteln und deren Ursachen zu untersuchen. Oft reichen daher grobe Machbarkeitsanalysen, die die grundsätzliche Erreichbarkeit, Sichtbarkeit oder einen kollisionsfreien Montagepfad absichern. Erst später führt der fortgeschrittenem Datenstand zu erhöhten Anforderungen an das Absicherungsergebnis und macht eine komplexe Prozesssimulation notwendig.
- Komplexität des Montageszenarios

Es wird zwischen einfachen und komplexen Montageszenarien unterschieden. Die Einteilung wird im Wesentlichen von den Einflusskriterien bestimmt:

- Montageprozess
(einhändig, beidhändig, Anzahl Montagemitarbeiter)
- Anzahl gleichzeitig bewegter Bauteile
(mit oder ohne gegenseitige Beeinflussung)
- Materialeigenschaften (flexibel oder starr)
- Notwendigkeit der Beurteilung der Wahrnehmung des Montagemitarbeiters
(beispielsweise die Wahrnehmung bei Blindmontage)
- Aussagekraft der Werkzeuge

Die Werkzeuge unterscheiden sich hinsichtlich des subjektiven Anteils der Beurteilung (notwendiges Erfahrungswissen), der Genauigkeit und der Wahrnehmung der Ergebnisse. Zukünftige Untersuchungen sollen daher die Aussagekraft im Vergleich zum realen Einbauversuch mit Prototypen analysieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in der virtuellen Produktentwicklung sowie die zahlreichen Forschungsfelder in Wissenschaft und Industrie verdeutlichen die Potenziale von Simulationstechnologien und VR-Methoden. Sie helfen die Entwicklung neuer technischer Lösungen effizienter und vor allem schneller zu gestalten.

Im vorliegenden Beitrag wurden Handlungsbedarfe bei der virtuellen Absicherung der montagegerechten Produktgestaltung aufgezeigt und eine Methodik mit Fragenkatalog erarbeitet. Die Vorgehensweise wurde an Praxisbeispielen der Automobilindustrie angewendet und konnte die Aussagekraft der virtuellen Absicherung verbessern. In weiteren Untersuchungen sollen die Aussagekraft virtueller Werkzeuge und die Rolle der Wahrnehmung bei der Absicherung der montagegerechten Produktgestaltung genauer untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Alexander, T. & Paul, G. 2012: Beitrag in Sammelband. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Bericht zum 58. Arbeitswissenschaftlichen Kongress – Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme, Digitale Menschmodelle – Ein Werkzeug zur Systemsimulation in der Arbeitswissenschaft, S. 165–168, Dortmund, Gfa Press.
- Bechthold, J. 2007: Experimentelle Absicherung virtueller Produktoptimierungen, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Härtel, T., Keil, A., Busche, C. & Schmickartz, S. 2012. Beitrag in Sammelband. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Bericht zum 58. Arbeitswissenschaftlichen Kongress – Gestaltung nachhaltiger Arbeitssysteme, Eine Modellierungs- und Simulationsmethode zur automatisierten Bewertung von Arbeitsplätzen nach dem EAWS-Verfahren, S. 173–176, Dortmund, Gfa Press.
- Kamusella, C. 2010: Ergotyping als ergonomische Komponente des Digital Prototyping. Technische Universität Dresden.
- Kern, T. A. (Hrsg.), Matysek, M., Meckel, O., Rausch, J., Rettig, A., Röse, A. & Sindlinger, S., 2009: Entwicklung Haptischer Geräte, Einstieg für Ingenieure, Berlin-Heidelberg, Springer Verlag.
- Kersten, B. 2003, Beitrag für Buurman, G.: Visuelle Wahrnehmung und virtuelle Welten, Basel, Birkhäuser.

- Krause, F.-L., Franke, H.-J. & Gausemeier, J. (Hrsg.) 2007: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung, München Wien, Hanser Verlag.
- Kunz, A. 2004: Interaktion mit dem digitalen Produktmodell im virtuellen Raum, Habilitationsschrift, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Lécuyer, A., Megard, C., Burkhardt, J.-M., Ccr, E., Lim, T., Coiffet, P., Graux, L. & Coquillart, S. 2002. Beitrag in Sammelband. In: Proceedings of the Immersive Projection Technology (IPT) Symposium: The Effect of Haptic, Visual and Auditory Feedback on an Insertion Task on a 2-Screen Workbench.
- Meyer, A., Grauer, M., Rittner, M. & Feldmann, K. (Hrsg.) 2009: Montage in der Leitungselektronik für globale Märkte, Kapitel 2 Methodisches Vorgehen zur integralen Auslegung von Produkt und Prozess, Seiten 5–81, Berlin Heidelberg, Springer Verlag.
- Milgram, P. & Kishino, F. 1994: A taxonomy of mixed reality visual displays, IEICE (Institute of Electronics, Information and Communication Engineers), Vol E77-D
- Müller, M. 2007: Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen, Dissertation, Universität des Saarlandes.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. 2007: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung, 7. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Verlag.
- Perret, J. 2010: Tech Brief – Interactive simulation of insertion tasks, Haption SA.
- Ross, P. 2002: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung, Dissertation, Technische Universität München, München, Herbert Utz Verlag.
- Stork, A. 2000. Effiziente 3D-Interaktions- und Visualisierungstechniken für benutzerzentrierte Modellierungssysteme. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- VDI 2221, 1993: VDI-Richtlinie, Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf, VDI Verlag.
- VDI 2860,1990: VDI-Richtlinie, Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole, Düsseldorf, VDI Verlag.
- Völlinger, U. 2010: Adaptive physikalische Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der virtuellen Realität, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, Fraunhofer Verlag.
- Voß, T. 2008: Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen, Dissertation, Technische Universität München.
- Wittmann, S. 2011: Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg.

Kontakt

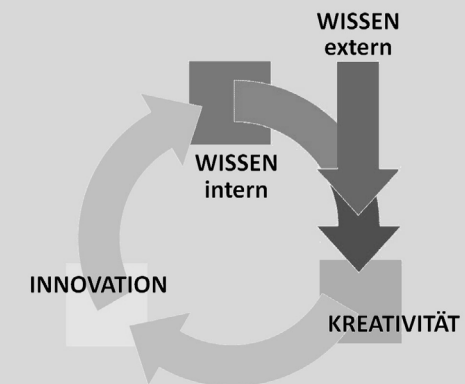
Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Christoph Kneschke
BMW AG
Knorrstraße 147
80788 München
www.bmwgroup.com

Prof. Dr. Martin Schmauder
Technische Universität Dresden
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Professur für Arbeitswissenschaft
Dürerstraße 26
01062 Dresden
www.tu-dresden.de

TEDATA

DIGITALES WISSEN FÜR
DIE PRODUKTENTWICKLUNG
IM MASCHINENBAU

Grundlagen
Konstruktionsregeln
Technische Datenbanken
Normen und Richtlinien
Formelsammlungen
Auslegungsprogramme
Getriebeentwicklung
Spezialwissen Antriebstechnik
Dokumentationssysteme
Elektronische Kataloge
Klassifizierungsservice
Schulungsangebote
Weiterbildungsstrategien



www.tedata.com
im Verbund mit
www.mdesign.de
www.inggo.com
www.driveconcepts.com

**Besser integrieren und . . .
. . . PLM besser nutzen!**

J2xPLM®

MCAD / ECAD / PLM / ERP Integrationen

xPLM Solution bietet PLM- und ERP Integrationen für Mechanik-, Elektrik-, Elektronik-, Softwareentwicklungs- und Office-Anwendungen an. Wir sind Solution Partner führender PLM-Anbieter wie Oracle, SAP, Siemens, Aras, Infor, Autodesk, PROCAD und SolidWorks.

Unser Service für Sie:

Beratung, Implementierung,
Entwicklung, Training und
Support von produktiven
PLM Umgebungen.



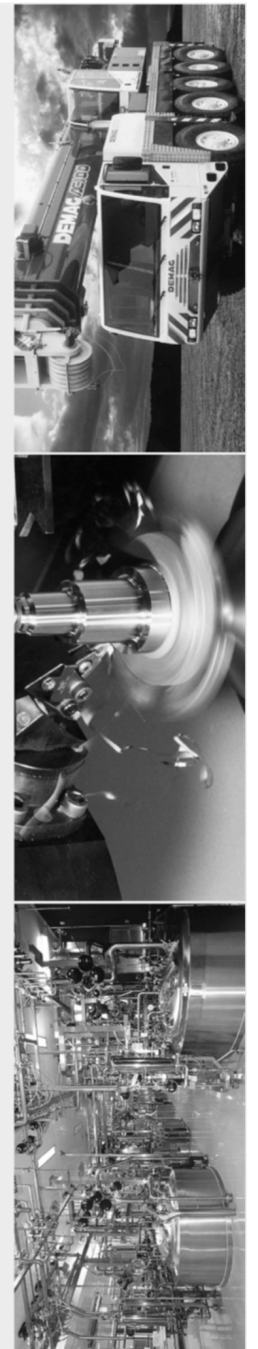
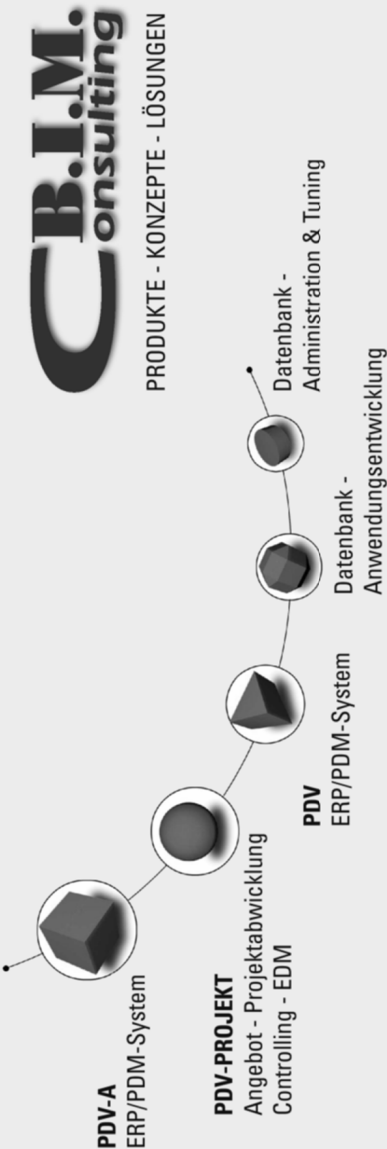
**xPLM
Solution**

xPLM Solution GmbH
Devrientstr. 5, 01067 Dresden
Tel.: 0351 / 82658 - 0, Fax: - 88
xplm@xplm.com, www.xplm.com

Namen, Marken- und Produktbezeichnungen unterliegen besonderen Schutzrechten und sind Herstellerzeichen bzw. eingetragene Marken der jeweiligen Inhaber.



Zukunft hat Zukunft – mit uns.



B.I.M.-Consulting mbH • Röntgenstr. 13, 39108 Magdeburg • www.bim-consulting.de

Das Prinzip Bewegung.



Vor über 100 Jahren entwickelte und produzierte Robert Reiss den ersten höhenverstellbaren Schreibtisch. Heute setzen die innovativen Sitz-Steh-Arbeitsplätze von REISS den Maßstab für Funktionalität und Flexibilität.

REISS Büromöbel GmbH
04924 Bad Liebenwerda
Südring 6

Telefon: +49 35341 48-360
info@reiss-bueroemoebel.de
www.reiss-bueroemoebel.de

REISS