KT2010

8. Gemeinsame Kolloquium
Konstruktionstechnik

7. und 8. Oktober in Magdeburg

Klaus Brökel
Jörg Feldhusen
Karl-Heinrich Grote
Frank Rieg
Ralph Stelzer

HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE
PRODUKT- UND PROZESSINNOVATION

Tagungsband

Klaus Brökel, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote,
Frank Rieg, Ralph Stelzer

8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2010

HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE PRODUKT- UND PROZESSINNOVATION

am 7. und 8. Oktober 2010
in Magdeburg

Copyright docupoint Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-86912-040-0

docupoint Verlag GmbH · Otto-von-Guericke-Allee14 · 39179 Barleben
Telefon: 039203 / 5107-0 · Telefax: 039203 / 5107-21
Internet: www.docupoint-md.de

Vorwort zum „8. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik" in Magdeburg

Forschungsarbeiten an Hochschulen müssen sich heute mehr denn je den Anforderungen aus der Industrie stellen. Der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens wird besonders an einer schnellen Produkt- und Prozessinnovation gemessen. Der internationale Wettbewerb ist dabei durch die umfassende Nutzung des technologischen Fortschritts gekennzeichnet. Unternehmen integrieren oft auch externe Potentiale und Ressourcen, um dem Kostendruck für Forschungs- und Entwicklungsleistungen zu begegnen. Aufstrebende Industrieunternehmen greifen die anwendungsorientierten Ergebnisse der Hochschulen als Technologietransfer auf. Dabei führen theoretische Ergebnisse zu effizienteren Vorgehensweisen in der Entwicklung und praktische Resultate zu einer Umsetzung bei neuen Produkten.

Um für diese Herausforderung weitere Impulse für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu erhalten, wird das *8. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik* am 7. und 8. Oktober 2010 in Magdeburg genutzt. Die im Jahr 2003 in Kühlungsborn mit drei Lehrstühlen eröffnete Veranstaltungsreihe wird ab 2007 durch die Beteiligung der entsprechenden Lehrstühle an der RWTH Aachen und der Universität Bayreuth fortgesetzt. Vorträge aus den organisierenden Lehrstühlen und von weiteren sich mit der Produktentwicklung befassenden Instituten und Firmen berichteten von laufenden Forschungsarbeiten aus den Gebieten der Konstruktionstechnik komplexer Produkte, Werkzeugen der Konstruktion sowie industriellen Anwendungen in unterschiedlichen Branchen. Die Seminaratmosphäre der *Gemeinsamen Kolloquien Konstruktionstechnik* sind für den Informations- und Gedankenaustausch und für die Veranstaltung sehr förderlich.

Ich danke allen Vortragenden und Gästen des *8. Gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik* in Magdeburg für ihre fachlichen Ausführungen, Diskussionsbeiträge und Anregungen und den Autoren für die sorgfältige Anfertigung der im vorliegenden Tagungsband abgedruckten Manuskripte.

Besondere Anerkennung verdienen meine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die während

der Vorbereitung und der Durchführung des Kolloquiums zusätzliche Aufgaben mit Freude und Verantwortung wahrgenommen haben und dadurch für unsere Besucher eine gelungene Veranstaltung in Magdeburg sicherten.

Das *9. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik* findet im Herbst 2011 an der Universität Rostock statt, organisiert vom Institut für Konstruktionstechnik unter Leitung von Herrn Professor Brökel, zu dem ich im Namen aller beteiligten Lehrstühle schon heute herzlich einlade.

Magdeburg, Oktober 2010

Karl-Heinrich Grote

Modellierung und Dimensionierung stationärer Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung in einem Methoden integrierenden Konstruktionssystem
Carsten Böhme, Klaus Brökel
Universität Rostock 1
Toolbox Vielfaltsreduktion - Methoden, Konzepte, Musterlösungen und Softwaretools zur Reduzierung der Internen Vielfalt
Erhard Leidich, Werner Grahl*
Technische Universität Chemnitz 7
Methodisch-wissenschaftliche Anforderungen für die Gestaltung von Entwicklungsprozessen in interdisziplinären Forscher- und Entwicklergruppen
Alexander Keller, Hansgeorg Binz,
Universität Stuttgart 13
Management von Kostenwissen im Rahmen der Integrierten Produktentwicklung – Konzeption und beispielhafte Umsetzung
Susann Köhler, Uwe Götze
Technische Universität Chemnitz 19
Selbstorganisierende Merkmalskarten basiertes Entscheidungsunterstützungssystem
Jörg Feldhusen, Arun Nagarajah
RWTH Aachen 27
Simulation von Beveloidrädern unter Last mithilfe der FEM
Matthias Beck, Matthias Bachmann, Hansgeorg Binz
Universität Stuttgart 35
Verwendung der FE-basierten Zahnkontaktanalyse zur Analyse asymmetrischer Verzahnungen
Christian Brecher, Christof Gorgels, Jan Ingeli
RWTH Aachen University 41
Kontaktberechnung von Maschinenelementen mit nicht konformen Netzen in der Finite Elemente Analyse
Florian Nützel, Martin Neidnicht, Bernd Roith, Christoph Wehmann, Frank Rieg
Universität Bayreuth 47

Finite Elemente Analysen zur Berechnung von Maschinenelementen mit nichtlinearem Verhalten
Christoph Wehmann, Martin Neidnicht, Florian Nützel, Bernd Roith, Frank Rieg
Universität Bayreuth 53

Simulative Methode zur Optimierung der Verzahnungstolerierung nach DIN 3961/ISO 1328
Christian Brecher, Fritz Klocke, Christof Gorgels, Ario Hardjosuwito, Christoph Löpenhaus
RWTH Aachen University 59

Verwendungsmöglichkeiten von Gelen als Druckübertragungsmedium in hydraulischen Spannbuchsen
Enrico Kloß
Universität Rostock 65

Entwicklung und Umsetzung eines flexiblen, IT-gestützten und technologieübergreifenden Kalkulationsmodells für die Angebotskalkulation im Werkzeug- und Formenbau
Michael Konarsky[1)], Erhard Leidich[1)], Uwe Götze[2)]
Technische Universität Chemnitz 71

VR-Entwicklungswerkzeuge zur Bewertung energieeffizienter Produkte und Prozesse
Volker Wittstock, Martin Pätzold, Marco Schumann, Janine Glänzel
Technische Universität Chemnitz 79

Festigkeits- und verformungsoptimierte Gestaltung konturidentischer Implantate für die Fertigung im Direct Manufacturing
Philipp Sembdner, Christine Schöne, Ralph Stelzer, Bernd Reitemeier*
Technische Universität Dresden 85

Anforderungen an die Wissensakquisitionskomponente eines selbstlernenden Assistenzsystems
Sebastian Röhner, Thilo Breitsprecher, Sandro Wartzack
Universität Erlangen-Nürnberg 91

Ein rechnerunterstützter Produktentwicklungsprozess für flächige Blechbauteile mit Verzweigungen
Anselm Schüle, Thomas Rollmann, Reiner Anderl
Technische Universität Darmstadt 97
Intelligent Engineering Templates in der innovativen Produktentwicklung
Ingo Schulz[1], Henning Kern[1], Christoph Warkotsch[2]
[2]RWTH Aachen 103
Joint Venture der Firmen MAN Nutzfahrzeuge AG und Rheinmetall AG im Bereich der militärischen Radfahrzeuge zu Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH Möglichkeiten und Schwierigkeiten in der Zusammenführung zweier Produktentstehungszyklen
Tobias Bläßing[1,2], Karl-Heinrich Grote[1], Marco Nöding[2], Dieter Oley[2]
[1] Otto-von-Guericke Universität Magdeburg 109
Produktinnovation am Beispiel der Suzlon 1.5MW LTV Windkraftanlage
Jan Brökel
Suzlon Energy GmbH 115
Beherrschung von Unsicherheit von lasttragenden Systemen im Maschinenbau durch Ontologie-basierte Informationsverarbeitung und Visualisierungstechnik.
Reiner Anderl, Kai Mecke, André Sprenger, Lucia Mosch
Technische Universität Darmstadt 121
Einbindung von Verifizierungsmethoden in frühe Entwicklungsphasen am Beispiel von Hausgeräten
Andreas Meyer-Eschenbach
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg 127
Methoden des Industrial Designs als Herausforderung für die Produkt- und Prozessinnovation im klassischen Maschinen- und Anlagenbau"
Henrik Schnegas
Hochschule Wismar 133
Auslegung & Optimierung von mehrstufigen Getrieben
Berthold Schlecht, Tobias Schulze, Christian Hartmann-Gerlach*
Technische Universität Dresden 139

Effiziente Generierung von virtuellen Produktfamilien in den frühen Entwicklungsphasen am Beispiel Fahrwerk
Marcel Böttrich, Ralph H. Stelzer*, Dirk Berkan
* Technische Universität Dresden 145
Funktionsorientierte Produktmodellierung in frühen Phasen von Entwicklungsprozessen
Albert Albers, Eike Sadowski, Andreas Braun
Universität Karlsruhe 153
Prozesse und Unternehmenskooperationen in der Praxis - Von der Identifikation zur Integration
Christian Kubisch
Porsche Aktiengesellschaft 161
Fertigungsgerechtes Konstruieren im Automobilbau
Wolfgang Meyer
Volkswagen AG 169
Innovative 4-Wellen Umlaufgetriebe - ein industrielles Anwendungsbeispiel
Hans-Joachim Beyer
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg 177
Medizintechnik für minimalinvasive Interventionen, eine Herausforderung für kleine und mittelständische Unternehmen
Axel Boese
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 183
Technologien zur Herstellung von cutanen Mikrogewebspartikeln zur Behandlung großflächiger thermischer Verletzungen
Ines Barz[1], Karl-Heinrich Grote[2], Gunter Klohs[3], Frank Engelmann[1]
[1]Fachhochschule Jena 191
Aspects of design of variable coupled planetary gear drives
Levente Czégé
University of Miskolc 199
Mobile Flusswasserkraftanlagen zur Energieerzeugung aus Flüssen ohne Staustufen
Karl-Heinrich Grote, Reinhardt Fietz, Mario Spiewack
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 205

Wasserkraft für geringe Fallhöhen und ihr wirtschaftliches Potential
Jana Hadler, Klaus Brökel
Universität Rostock 211
Toleranzmanagement in der Produktentwicklung
Roland Leuschel, Bertram Hentschel[1)]
[1)]Technische Universität - Bergakademie Freiberg 217
Anforderungen an eine Methode zur Bewertung innovativer Produktideen aus wissenschaftlicher und unternehmerischer Sichtweise
Mathias Messerle, Hansgeorg Binz, Daniel Roth
Universität Stuttgart 223
Steigerung der Abbildungsgenauigkeit lokaler FE-Ergebnisse mittels Netzverfeinerung bestehender Tetraeder-Netze
Martin Neidnicht, Florian Nützel, Bernd Roith, Christoph Wehmann, Frank Rieg
Universität Bayreuth 231
Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe Materialien – Produkt- und Prozessinnovation durch den Einsatz der FEM
J.-H. Ohlendorf, D. H. Müller, K.-D. Thoben
Universität Bremen 237
Prognose des Entwicklungsaufwands – Adaption des COCOMO Modells auf die Produktentwicklung
Jörg Feldhusen, Judith Pollmanns, Jan Erik Heller
RWTH Aachen 243
Augment'able: A multimodal Mixed Reality Desktop Workbench
Ralph Stelzer, Erik Steindecker
Technische Universität Dresden 249
Untersuchungen an vakuumgegossenen Kunststoff-Prüfkörpern unter Berücksichtigung der Anforderungen des Explosionsschutzes
Ramona Träger[1], Julia Hornig[2], Karl-Heinrich-Grote[1], Uwe Klausmeyer[2]
[1]Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 255
Unterstützung des Konstrukteurs beim Re-Use von Produktionsanlagen
Waldemar Walla
Daimler AG 261

Absicherungsorientierte Klassifizierung von Eigenschaften in der Anforderungsklärung
Christoph Westphal, Christina Stöber, Hartmut Krehmer, Sandro Wartzack
Universität Erlangen-Nürnberg 269

Modellierung und Dimensionierung stationärer Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung in einem Methoden integrierenden Konstruktionssystem

Carsten Böhme, Klaus Brökel

Universität Rostock
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock
Email: Carsten.boehme@uni-rostock.de; Internet: http://kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Im ZIM-Projekt VESTA wird ein Anlagenkonzept für stationäre Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung zu einem praxistauglichen sowie modularen und skalierbaren Energiesystem entwickelt. Der Beitrag stellt die Konstruktion der stationären Wirbelschichtfeuerung am Beispiel der Teilaspekte 'Reaktoraufhängung' und 'Anbindung des Düsenbodens' vor. Danach werden Ansätze für eine konstruktionsbezogene Simulation der Wirbelschichtfeuerung und zur Entwicklung eines integrierten Entwurfssystems diskutiert.*

Abstract: *Using a concept for a small-scale bubbling fluidized bed combustion system, the VESTA project will develop a market-ready, modular and scalable energy system. The paper will discuss engineering details of the fluidized bed combustion, particularly regarding reactor suspension and nozzle box attachment. Furthermore, we will present the approach into a simulation of the combustion system and the development of an engineering system.*

Stichwörter: *Wirbelschicht, stationäre Wirbelschichtfeuerung, Entwurfssystem, VESTA, ZIM*

Keywords: *fluidized bed, bubbling fluidized bed combustion, engineering system, VESTA, ZIM*

1 Einleitung

1.1 Projektbeschreibung

An der Universität Rostock wurde ein Anlagenkonzept für stationäre Wirbelschichtfeuerungen mit kleineren Leistungen von 0,3 bis 25 MW_{th} entwickelt. Dieses ermöglicht die schadstoffarme thermische Verwertung zahlreicher Abfall- und Nebenstoffe in fester, flüssiger oder gasförmiger Form.
Im ZIM-Projekt VESTA wird das Anlagenkonzept für stationäre Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung zu einem praxistauglichen sowie modularen und skalierbaren Energiesystem weiterentwickelt. Das Energiesystem wird unterschiedliche Brennstoffe effizient und emissionsarm verarbeiten können und in der Lage sein, Elektroenergie in Stromnetze einzuspeisen. Ein entsprechendes Patent wird von der ES+S GmbH gehalten [1].
An der Universität Rostock wird eine Versuchsanlage mit 400 mm Brennraumdurchmesser und einer Leistung von ca. 200 kW_{th} betrieben. An dieser Anlage wurden und werden zahlreiche Versuche zur Erforschung der Wirbelschichtverbrennung durchgeführt. *Beu* hat Emissionsminderungskonzepte entwickelt [2], *Lange* und *Tung* haben Brennstoffe und ihre Charakterisierung untersucht und von *Betsch* und *Vincent* wurde die Anbindung einer Mikroturbine zur Stromerzeugung erforscht [3][4].
In Pilotanlagen auf den Deponien Camitz und Rönkendorf wird das anfallende Deponiegas durch Wirbelschichtfeuerungen mit 580 mm Durchmesser entsorgt.

1.2 Aufgaben KTC innerhalb VESTA

Ziel der Arbeit des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik/CAD am Projekt VESTA ist ein integriertes Entwurfssystem für stationäre Wirbelschichtfeuerungen kleiner Leistung. Hervorzuheben ist dabei die Fähigkeit zur Anpassung der Anlage an unterschiedliche Baugrößen und Einsatzgebiete anhand weniger Eckdaten.
Demgegenüber steht die Projektierung und Entwicklung der stationären Wirbelschichtfeuerung mit der Überarbeitung der Anlagenkonstruktion. Forderungen ergeben sich hierbei aus der Erschließung größerer, bisher nicht berücksichtigter Baugrößen sowie aus der Weiterentwicklung einzelner Komponenten.

2 Konstruktion der stationären Wirbelschichtfeuerung

2.1 Reaktoraufhängung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Auslegung der Aufhängung haben das Anlagengewicht, die hohe Prozesstemperatur mit daraus resultierend geringen Werkstofffestigkeiten und erheblicher Wärmeausdehnung sowie die durch die Bewegung des Wirbelbetts hervorgerufenen Schwingungen.
Die Aufhängung der Anlage DN580 wurde mit vier Pratzen am Umfang des Wirbelschichtgefäßes ausgeführt. Damit liegt die Aufhängung in einem Bereich sehr hoher Werkstofftemperatur mit ca. 860 °C im Betrieb. Zudem überschreitet die Länge der Pratzen deutlich die Empfehlungen der DIN 28083 [5]. In der Folge kam es an der Pilotanlage zu Einbeulungen des Wirbelschichtgefäßes an allen Pratzen und damit auch zu einer Absenkung des gesamten Reaktors. Nun werden neue Lösungsvarianten aus den im Apparatebau etablierten Tragelementen in Kombination mit verschiedenen Positionen am Reaktor erarbeitet, um die Aufhängung der heißen Wirbelschichtfeuerung mit zufriedenstellender Standzeit realisieren zu können.
Parallel wird diskutiert, Wärme über ein doppelwandiges, durchströmtes Freeboard auszukoppeln. Damit würde gleichzeitig eine kühlere Zone mit entsprechend höheren Werkstofffestigkeiten zu geschaffen, die neue Möglichkeiten der Aufhängung bietet.

2.2 Anbindung des Düsenbodens

An den bestehenden Anlagen mit maximal 580 mm Brennraumdurchmesser ist der Düsenboden mit einem Flanschring am Wirbelschichtgefäß befestigt. Die Handhabbarkeit der Schraubverbindungen ist hierbei nicht ideal. Auch hier werden Alternativen entwickelt und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Der gegenwärtige Stand dieser Untersuchungen deutet jedoch darauf hin, dass der verwendete Schraubflansch die günstigste Lösung bietet und somit nur eine geringfügige Überarbeitung der Dichtung und der Schraubenauslegung erfolgen wird.
Nach derzeitigem Kenntnisstand ist eine lösbare Anbindung des Düsenbodens bei Anlagen mit deutlich mehr als 1000 mm Brennraumdurchmesser nicht mehr sinnvoll zu realisieren. Gleichwohl muss die motorisch anspruchsvolle Wartung des Düsenbodens möglich sein. Es wird untersucht, ob dies durch ein Mannloch geleistet werden kann. Fällt

diese Beurteilung negativ aus, so muss auch für solche Baugrößen eine Lösung mit abnehmbarem Düsenboden gefunden werden.

3 Entwurfssystem

Unter einem Entwurfssystem wird eine vollständig parametrische, konstruktiv-generische Abbildung der Gesamtanlage in Pro/ENGINEER mit den nachfolgend beschriebenen Eigenschaften verstanden. Durch Eingabe weniger Verfahrensparameter (z.B. Brennstofftyp und -volumenstrom, thermische Leistung) können ein an die jeweiligen Anforderungen angepasstes Modell bereitgestellt und Konstruktionsunterlagen abgeleitet werden. Dazu wird auf hinterlegte Berechnungen zur Baugröße zurückgegriffen. Einsatzspezifische Module können an- oder abgewählt werden. Dazu gehören die verschiedenen Brennstoffeintragssysteme oder Wärmeauskopplungswege. Neben der Leistungsabstufung im Sinne einer Baureihe werden auch Elemente eines Baukastens mit unabhängigen Komponenten berücksichtigt.
Gegebenenfalls ist es erforderlich, die beschriebene Funktionalität mehrstufig umzusetzen, so dass die Konstruktionsparameter aus den Verfahrensparametern in einem externen Berechnungsprogramm ermittelt und an Pro/ENGINEER übergeben werden.
In der praktischen Umsetzung werden sich zwangsläufig eine Abstufung der möglichen Baugrößen und eine Einschränkung der Minimal- und Maximalgrößen ergeben.
Das beschriebene Entwurfssystem bedingt zweifellos einen zunächst höheren Entwicklungsaufwand verglichen mit der Festlegung auf einige wenige Baugrößen. Für den Industriepartner ist es aber wichtig, gerade in der Einführungsphase immer an den jeweiligen Kunden angepasste und damit kostenoptimale Anlagen anbieten zu können.

4 Konstruktionsbezogene Simulation der Wirbelschichtverbrennung

Neben der unmittelbaren Bearbeitung der zuvor beschriebenen Aufgaben ist es wünschenswert, auch das theoretische Verständnis einer Wirbelschichtfeuerung hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Konstruktion zu erweitern. Um dazu eine Simulation erstellen zu können ist es erforderlich, zunächst die wesentlichen Einflüsse auf das Verhalten der Anlage zu identifizieren und zu quantifizieren. Zur Validierung der Simulation müssen geeignete Messwerte gewonnen werden.

Auf die Anlage wirken Gewichtskräfte aus ihrer Eigenmasse und der Masse des Bettmaterials sowie in geringem Umfang aus der Masse des eingebrachten Brennstoffs, sofern dieser nicht gasförmig vorliegt. Zusätzliche Kräfte wirken durch die Bewegung des Wirbelbetts, wenn Material aus zusammenbrechenden Blasen zurückfällt. Diese Bewegung erregt Schwingungen in der Anlage. Weitere Schwingungserreger sind das Brennstoffeintragssystem, der Eintrag der Wirbelluft über den Düsenboden und die Aktoren der Stelleinrichtungen.

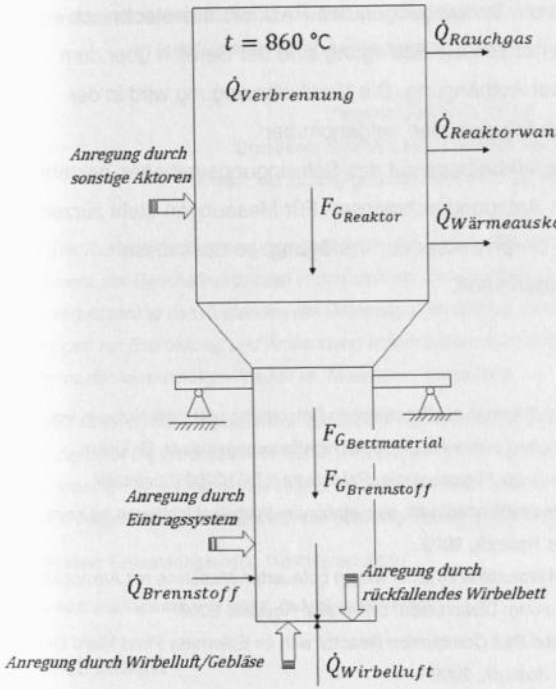


Bild 1: mechanisch-thermisches Modell des Wirbelschichtreaktors – Kräfte, Auflager, Wärmeströme und Anregungen

Wesentliche Wärmequellen und -senken sind der Verbrennungsprozess und die Wärmeauskopplung sowie die eingetragene Wirbelluft. Nachgeordnet sind die Wärmesenken durch den Brennstoffeintrag und die isolierte Reaktorwand.
Nicht unmittelbar mit einer Simulation erfassbar sind die Abrasion durch das Bettmaterial sowie die Korrosion durch Verbrennungsgase.

Das Temperaturprofil innerhalb des Reaktors steht mittels fest installierter Thermoelemente zeitlich fein aufgelöst zur Verfügung. Im Betrieb herrschen im Inneren nahezu einheitliche Temperaturen von ca. 860 °C. Einzelmessungen an der Außenhaut des Reaktors ergaben wie erwartet an allen Messpunkten gleichmäßige Werte, die nahe an den Innentemperaturen liegen. Lediglich im Bereich des Düsenbodens und unmittelbar darüber treten aufgrund der kühlenden Wirbelluft wesentlich niedrigere Temperaturen von 250 °C bis 450 °C auf.

In einem nächsten Schritt werden die Schwingungen des Reaktors messtechnisch erfasst. Vorgesehene Messpunkte für die horizontale Bewegung sind der Bereich über dem Düsenboden sowie der Bereich der Aufhängung. Die Vertikalbewegung wird in der Hauptachse der Anlage unter dem Düsenboden aufgenommen.

Insbesondere für den Einfluss des Wirbelbetts auf das Schwingungsverhalten besteht vermutlich eine Abhängigkeit vom Anlagendurchmesser. Für Messungen steht zurzeit nur eine einzelne Anlage mit 580 mm Durchmesser zur Verfügung, so dass diese Abhängigkeit nicht dargestellt werden kann.

Literatur

[1] Spiegelberg, Volker: Verfahren und Anlage zur thermischen Entsorgung und/oder Nutzung von unterschiedlichen Stoffen mittels einer stationärer Wirbelschichtfeuerungsanlage für kleine Leistungen mit integrierter Nutzung der Abgasenergie. Patentschrift DE102005004082B4

[2] Beu, Johannes: Emissionsminderungskonzepte für eine stationäre Wirbelschichtfeuerung keiner Leistung. Dissertation. Universität Rostock, 2009

[3] Betsch, Matthias: Umbau einer Mikroturbine zu einer extern befeuerten Maschine mit Ankopplung an eine Stationäre-Wirbelschichtfeuerung. Dissertation, Universität Rostock, 2009

[4] Vincent, Tristan: Linking a Fluidized Bed Combustion Reactor with an Externally Fired Micro Gas Turbine. Dissertation, Universität Rostock, 2009

[5] DIN 28083-1. Pratzen. Maße, Maximale Gewichtskräfte

Toolbox Vielfaltsreduktion - Methoden, Konzepte, Musterlösungen und Softwaretools zur Reduzierung der Internen Vielfalt

Erhard Leidich, Werner Grahl*

Technische Universität Chemnitz
Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz
Email: e.leidich@mb.tu-chemnitz.de; Internet: http://www.ipe-lab.de

*Ingenieurbüro Dr. Grahl
Dresdener Straße 189A, D-09326 Geringswalde
Email: ibdr.grahl@gmx.de; Internet: http://www.ipe-lab.de

Inhalt: *Der Zustand der Stammdaten verbunden mit unnötiger Vielfalt im Teilespektrum belastet Effektivität und Effizienz der Geschäftsprozesse in den meisten Unternehmen. Es fehlt an methodischer Unterstützung für die Verbesserung des Zustandes der Datenbasis. Im Beitrag werden deshalb erste Ergebnisse und Erfahrungen zur Erarbeitung und Anwendung branchenneutraler Methoden für das Erkennen, Reduzieren und Vermeiden von unnötiger Vielfalt im Teilestamm vorgestellt.*

Abstract: *State of master data and unnecessary variety in range of master data diminish the effectiveness and efficiency of the processes in most of the companies. methodically assistance for improvement of master data is missing The contribution presents results and experiences in development and using ways of analytics, reduction and avoidance of unnecessary variety in the range of master data.*

Stichwörter: *Teilemanagement, Vielfaltsreduktion*

Keywords: *management of parts, reduction of variety*

5 Motivation

Die Kunden werden anspruchsvoller und fordern stärker individualisierte Produkte. Die Unternehmen sind gezwungen ihre Produkte an diese Anforderungen anzupassen und damit die Variantenvielfalt ihrer Produkte (externe Vielfalt) immer stärker zu erweitern. Der Zusammenhang von Produktvielfalt und Vielfalt der Bestandteile bewirkt in der Regel bei Zunahme der externen Vielfalt ein überproportionales Ansteigen der internen Vielfalt (Spektrum der Baugruppen und Einzelteile einschließlich der Dokumente und Daten). In Folge dessen wächst die Komplexität der Prozesse. Es werden immer umfangreichere

Ressourcen zu ihrer Bearbeitung erforderlich. Der Handlungsbedarf zur Minimierung der internen Vielfalt (Teilestammgröße und Teilestammwachstum) steigt ständig ([1], [2]).

6 IST-Situation - Zustand der Teilestämme

Die Qualität der Stammdaten beeinflusst erheblich die Effizienz der produktbezogenen Kommunikationsprozesse und damit die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens ([3]). Trotzdem sind Stammdaten durch Redundanzen und Inkonsistenzen geprägt (Bild 1).

Strukturierung/Klassifizierung	Terminologie	Aktualität/Gültigkeit
Kriterien: • **Teilecodierung** - TD-Code: 7.020 - Andere: 10.514 (mehrere Systeme) • **Herstellercode:** - Belegt - 7.538 - Leer - 9.996 • **Benennungscode:** - Belegt - 12.319 - Leer - 5.215	**Kriterien:** **Name, Parameter, Reihenfolge** **Beschreibung** SKT.SCHRAUBE MJ 1,5" VELLE M6X16-8.8BR DIN933 M8X20-8.8BR DIN933 M12X30-8.8BR DIN933 SKT.SCHRAUBE MB80/100/130 SKT.SCHRAUBE MB/MEM/MJ 8240 SKT.SCHRAUBE H-SCREW 5/8-11UNCX5,25-8 SKS DIN 931-M10X35-10.9 M10X35 DIN 933-10.9 5/8" -11UNC 1"10.9 (DIN931) M16X20 DIN 933-10.9 M12X25 DIN933-8.8 SKS DIN 931-M12X170-8.8	**Kriterien:** • **Aktualität der Artikeldaten** - **Artikelanzahl:** 17.534 - **davon obsolet:** 3.831 - **davon ersetzt:** 134 - **davon Sonstiges (z.B.: Nacharbeit):** 468 - **Nicht bewegte Teile:** 4.339 - **Aktive Teile:** 9.559 • **Aktualität der Normung** Bewertung / Werksnorm / Clusteranalyse Bearbeitungsstand / 04/2004 / 01/2008 Anzahl Normen / 1 / 3 Anzahl Baugrößen / 29 / 38 Materialien / 3 / 7 Artikelvielfalt Gesamt / 44 / 61
Schwachstellen: • fehlende/unvollständige Artikelklassifizierung • verschiedene Klassifizierungsarten • Klassifizierungssystem wenig ausbaufähig	**Schwachstellen:** • nicht reproduzierbare/ unvollständige Benennungen • fehlende/unvollständige Parameter • Unterschiedliche Parameterfolgen	**Schwachstellen:** • unzureichende Aktualisierung des Artikelbestandes • unzureichende Aktualisierung der Werksnormen • unzureichender Abgleich zwischen Marktanpassung und interner Normung

Bild 1: Beispiele für typische Schwachstellen in Teilestämmen

Für die Nutzer resultiert daraus, dass durch einen zu großen und zu schnell wachsenden Teilestamm und meist unzureichende methodische Hilfsmittel das Lösen der Arbeitsaufgaben behindert wird. Es wird immer schwieriger umfassende und vor allem einheitliche Sichten auf relevante Produktdaten zu erhalten und zu ermöglichen. Die Unternehmen leben derzeit mit dem Bewusstsein von Mängeln in der Datenlandschaft und der methodischen Unterstützung. Es wird aber immer zwingender erforderlich beim Schließen der Standardisierungs- und Integrationslücken in der IT-Landschaft und beim Harmonisieren von Prozessen und IT zu unterstützen. Der Beitrag stellt die im IPE-Labor erarbeiteten Methoden zur Analyse von Schwachstellen und zur Erarbeitung von Maßnahmen zur Vielfaltsreduktion und zur Vereinheitlichung in Komponentenspektren und -strukturen vor.

7 Lösungsprinzip

Ausgehend von unterschiedlichen Randbedingungen wie Unternehmensindividualität (Erfahrungen, Wissen, Produktspektrum, Kundenkreis, Organisation und Kooperationen), Zustand/Umfang des Datenbestandes (Historie und Gegenwart) und Unternehmenszielen wurden branchenunabhängige Methoden zur Analyse und Reduzierung der internen Vielfalt erarbeitet, erprobt und in Form von Demonstratoren, zusammengefasst (Bild 2).

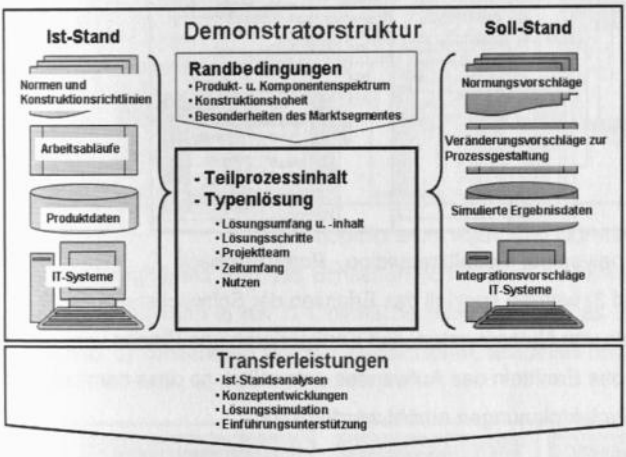


Bild 2: Demonstratoraufbau

Demonstratoren beinhalten die zur Lösung einer definierten Teilaufgabe notwendigen Arbeitsmittel wie Checklisten, Typenkonzepte, Musterlösungen, Handlungsrichtlinien oder Normenmuster und sind mit Softwaretools, Klassifizierungstools, Datenbanken oder Schnittstellentools gekoppelt oder in diese integriert. Die Anpassung an die konkreten Randbedingungen erfolgt im Rahmen von spezifischen Transferleistungen. Zur Bearbeitung unternehmensspezifischer Aufgabenstellungen wird das Gesamtlösungskonzept aus Demonstratoren entsprechend der Anforderungen und Zielstellungen und unter Beachtung von Aufwands-Nutzens-Relationen ([5]) und der momentanen personellen Ressourcen der Unternehmen konfiguriert. Zur Bearbeitung von Aufgabenstellungen mit hohem Wiederholgrad wie Potenzialanalyse (Abb. 3) oder Vielfaltsreduktion für Teileklassen wie Norm-/Kaufteile (Abb. 4), Fertigungsteile (Abb. 5) oder Ersatz-/Verschleißteile (Abb. 6) wurden Typenlösungen vorkonfiguriert.

8 Hilfsmittel zur Vielfaltsanalyse

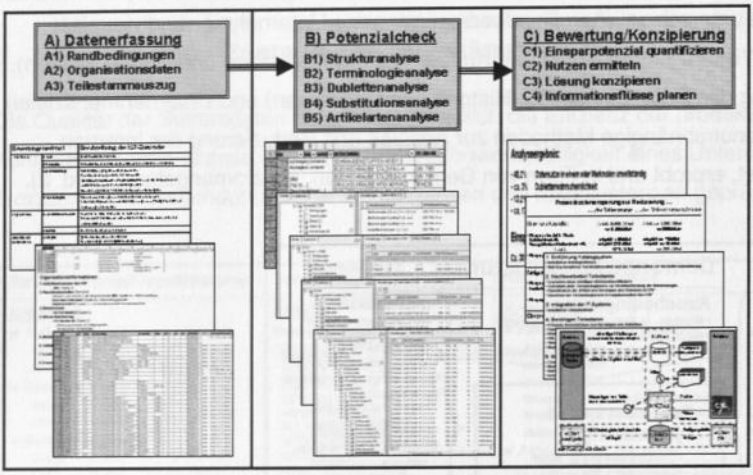


Bild 3: Analysetool Vielfaltsreduktion - Potenzialcheck

Durch das Analysetool (Bild 3) werden speziell das Erfassen der Schwachstellen in Teilestämmen, das Ermitteln von Nutzenwerten, das Konfigurieren und Planen von Lösungskonzepten sowie das Ermitteln des Aufwandes unterstützt, so dass damit die Investitionssicherheit von Projektplanungen erhöht werden kann.

9 Hilfsmittel zur Vielfaltsreduktion

Während bei Kauf- und Normteilen ein Auswerten textueller Angaben ausreichend ist, muss bei Fertigungsteilen aufgrund der hohen Benennungsungenauigkeiten auf die Teilegeometrie zurückgegriffen werden. Darüber hinaus differieren die strategischen Zielstellungen und die damit zu betrachtenden Prozesse. Kauf- und Normteile (Bild 4) sind beschaffungs- und Fertigungsteile (Bild 5) herstellungsorientiert. Bei Ersatz- und Verschleißteilen überlagern sich beide Aspekte. Daraus resultiert das Schaffen teileklassenspezifischer Toolboxen. Das Bearbeiten von Kauf- und Normteilen konzentriert sich auf ein Klassifizieren, textuelles Clustern und eine Recherche nach Gleich-/Ähnlichteilen. Ziele des Normens sind das Erhöhen der Transparenz, das Dublettenbereinigen, das Bilden von Vorzugsteilen und Auswahlreihen und eine Lieferantenbereinigung.

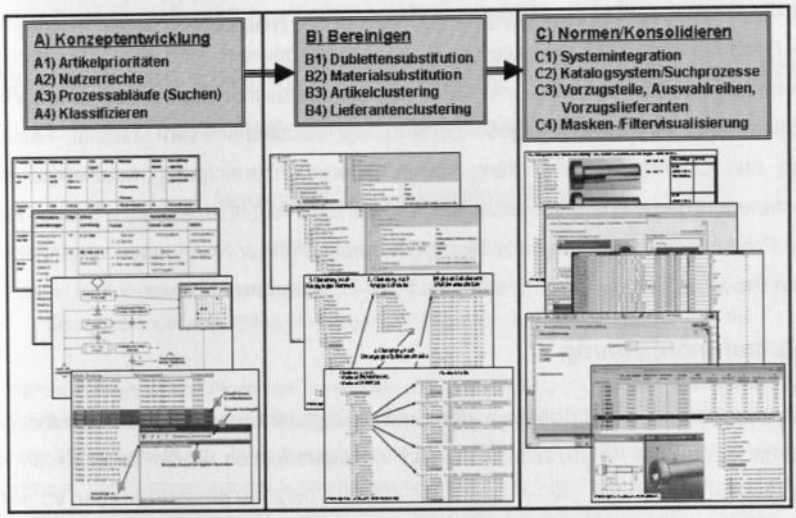


Bild 4: Reduktionstool Kauf- und Normteile

Ziele des Integrierens sind das Schließen von Lücken im Informationsfluss und das Visualisieren der Normen in der IT-Oberfläche beim Nutzer. Das Bearbeiten von Fertigungsteilen (Abb. 5) konzentriert sich auf Klassifizieren, textuelles und geometrisches Clustern.

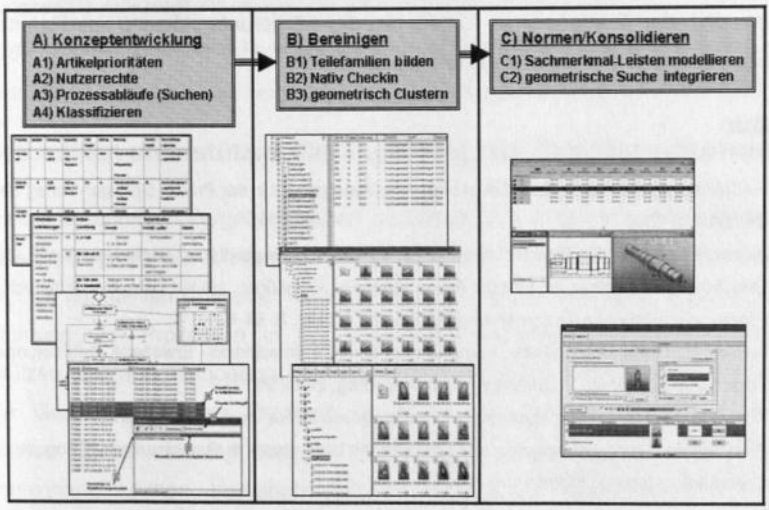


Bild 5: Reduktionstool Fertigungsteile

Ziele des Normens sind das Bilden von Teilefamilien und Baureihen sowie das Normen nach Sachmerkmal-Leistenkonzepten. Ziele des Integrierens sind das Modellieren der Sachmerkmal-Leisten und das Integrieren von geometrischer Suchfunktionalität. Vielfaltsreduktion wirkt sich durch Dublettenbereinigung, Substitution von Material, Festigkeitsklasse und Oberflächenbehandlung sowie Lieferantenbereinigung reduzierend auf die Teilestammgröße und dabei vereinheitlichend auf die Produktstruktur aus. Bei der Planung neuer Produkte wirkt das gesamte Spektrum durchgeführter Normungen vereinheitlichend auf die Produktstruktur und reduzierend auf das Teilestammwachstum.

6 Zusammenfassung

Im Beitrag wurden die Ergebnisse der Entwicklungsarbeiten und Transferaktivitäten zu Demonstratroren zur Potenzialanalyse und Vielfaltsreduktion für die Teileklassen Norm-, Kauf- und Fertigungsteile, die im Zeitraum 07/2009 - 06/2010 erbracht wurden vorgestellt. Im Zeitraum bis 06/2011 sind die Weiterentwicklung der Demonstratoren zu Fertigungsteilen und Baugruppenkonfiguratoren und ein Ausweitung der Transferaktivitäten geplant.

7 Danksagung

Die Mitarbeiter des Labors für integrierte Produktentwicklung danken dem Freistaat Sachsen und der Europäischen Union für die Förderunterstützung im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

Literatur

[1] Feldhusen, J.; Gebhardt, B.: Product Lifecycle Management in der Praxis; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

[2] Eigner, M.; Stelzer, R.; Product Lifecycle Management; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

[3] Oedekoven, D.; Schoth, A.; Erst die Arbeit, dann das Vergnügen: Mit konsistenten Daten schlanke Prozesse ermöglichen; Unternehmen der Zukunft 1/2010, S. 64-67

[4] Leidich, E,; Grahl, W.; Vielfalts-, Komplexitäts- und Kostenreduktion - Erweiterte Anforderungen an Forschung und Lehre; 11. Industry-Forum Augsburg, 24.02.2010

[5] Köhler, S.; Götze, U.; Management von Kostenwissen im Rahmen der Integrierten Produktentwicklung - Konzeption und beispielhafte Umsetzung; 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Magdeburg 2010

Methodisch-wissenschaftliche Anforderungen für die Gestaltung von Entwicklungsprozessen in interdisziplinären Forscher- und Entwicklergruppen

Alexander Keller, Hansgeorg Binz,

Universität Stuttgart
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Email: alexander.keller@iktd.uni-stuttgart.de; Internet: http://www.iktd.uni-stuttgart.de

Inhalt: *Für die Gestaltung von Prozessen in der Forschung, Entwicklung und Konstruktion wird ein System von theoretisch abgeleiteten, allgemeinen Anforderungen vorgeschlagen. Dieses Anforderungssystem soll die gezielte Prozessgestaltung, -bewertung und -auswahl unterstützen. Diese Anforderungen wurden in einer Befragung von Personen aus der akademischen Forschung, insbesondere aus ingenieurwissenschaftlichen Fachgebieten, auf ihre Relevanz in der Praxis überprüft. Im Ergebnis sind die Anforderungen auch in der Praxis bedeutsam.*

Abstract: *For devising research, development and design processes, a system of general requirements is proposed, which have been theoretically derived. This system aims at supporting the purposeful configuration, assessment and selection of processes. The requirements have been evaluated for practical relevance by means of a survey amongst persons occupied with academic research, especially within the field of engineering. As a result, the requirements are of relevance in practice.*

Stichwörter: *Entwicklungsprozesse, Konstruktionsprozesse, Methodik, interdisziplinäre Zusammenarbeit*

Keywords: *Development processes, design processes, methodology, interdisciplinary co-operation*

1 Methodiken unterstützen die Gestaltung von Entwicklungsprozessen

Methodiken beschreiben Vorgehensweisen zur Lösung von Aufgaben und Problemen. Sie verweisen auf geeignete Methoden, Werkzeuge und Hilfsmittel. Für den Anwender besitzen sie normativen Charakter. Methodiken sind prinzipiell geeignet, die Planung und Durchführung von Prozessen in der Forschung, Entwicklung und Konstruktion zu unterstützen. Die aus methodisch wissenschaftlicher Sicht bedeutsamen Anforderungen für die Gestaltung solcher Prozesse in einem interdisziplinären ingenieurwissenschaftlichen Zusammenhang werden nachfolgend dargestellt. In einem solchen Zusammenhang können Vorhaben selten eindeutig als ausschließlich Forschung, Entwicklung oder Konstruktion eingeteilt werden. Um den Sprachgebrauch in diesem Beitrag zu vereinfachen, wird daher verallgemeinernd von Entwicklungsprozessen

gesprochen. Die Anforderungen an Methodiken müssen ausdrücklich formuliert werden, um existierende oder zu entwickelnde Methodiken für eine spezifische Situation zu validieren. Im Folgenden werden strukturierte Anforderungen für die Methodikgestaltung und die Ergebnisse einer ersten Akzeptanzstudie vorgestellt.

2 Allgemeine Anforderungen an Methodiken

Probleme und Aufgaben werden durch drei Kriterien voneinander abgegrenzt (vgl. [1, 2]): Erstens die Ähnlichkeit einer Situation mit vorherigen Situationen, zweitens die Strukturierbarkeit der Situation und drittens die Verfügbarkeit einer Lösung. Ist für eine ähnliche Situation in der Vergangenheit bereits eine Lösung gefunden worden, handelt es sich bei der aktuellen Situation um eine Aufgabe. Sie kann durch Routine gelöst werden. In den anderen Fällen handelt es sich um ein Problem: Im Vergleich zu früheren Situationen muss die Vorgehensweise angepasst werden oder erst gefunden werden. Dies trifft in den Ingenieurwissenschaften in vergleichbarer Weise zu sowohl für Forschung, Entwicklung als auch Konstruktion. Im Bereich der Konstruktionswissenschaft existiert eine Vielzahl allgemeiner Methodiken (z. B. Pahl/Beitz, VDI 2221, V-Modell, VDI 2206, Axiomatic Design). Der Fülle allgemein-übergreifender und disziplin- oder aufgabenspezifischer Vorgehensweisen (z. B. VDI 2230) stehen jedoch nur wenige Aussagen der Methodenlehre zu Entwicklung, Vergleich und Validierung von Methodiken als Grundlage für die Gestaltung interdisziplinärer Entwicklungsprozesse gegenüber. Deshalb wurde durch eine Literaturrecherche ein System von Anforderungsgruppen (A bis H) an Methodiken erarbeitet [3, 4] (Bild 1). Eine Methodik weist fünf relevante definitorische Merkmalbereiche auf: **Normativität** (Überprüfbarkeit (A) und Wissenschaftliche Sinnhaftigkeit (B)), **Didaktik** (Nachvollziehbarkeit (C)), **Unsicherheit** (Strukturieren und Kompatibilität (D), Flexibilität (E)), **Konkurrenzfähigkeit** (Praktische Relevanz (F) und Nützlichkeit (G)) sowie **Anwendungsgrenzen** (Problemspezifität (H)). Den Merkmalen sind zunächst insgesamt 19 Anforderungsbereiche zugeordnet.

3 Relevanz und Akzeptanz der Anforderungen in der Realität

Das System der Anforderungen aus Bild 1 wurde theoretisch, d. h. aus der Literatur abgeleitet. Für die weitere Untersuchung muss es konkretisiert werden. Daher wurden 98 thesenartige Richtlinien aufgestellt, die aus der Beschreibung der Anforderungen folgen.

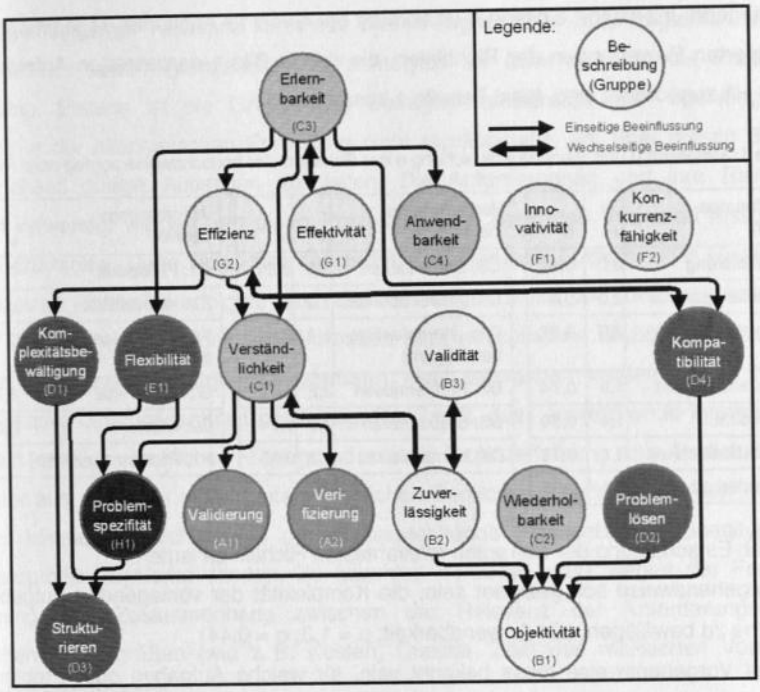


Bild 1: System der Anforderungsbereiche zur Gestaltung von Entwicklungsprozessen (nach [1], [4])

Die Forderung B1 nach „Objektivität" wird beispielsweise unter anderem durch die Richtlinie „*Eine Vorgehensweise soll für gleiche Situationen gleiche Handlungsanweisungen geben*" zur Gestaltung einer Vorgehensweise (eines Prozesses) erläutert. Es wurde nun empirisch untersucht, ob die theoretisch abgeleiteten Richtlinien zur Gestaltung von Entwicklungsprozessen aus Sicht der mittels eines Fragebogens Befragten (N = 41, Rücklauf n = 19; n/N = 46%) relevant sind. Zunächst wurden hierfür die Richtlinien zur Meinungsabfrage umformuliert, z. B.: „*Dass eine Vorgehensweise für gleiche Situationen gleiche Handlungsanweisungen geben soll, ist …*". Die Antworten konnten auf einer vorgegebenen Skala von „sehr wichtig = 1" bis „irrelevant = 4" gegeben werden. Der fachliche Hintergrund der Befragten lag im Bereich der akademischen Forschung in unterschiedlichen, insbesondere ingenieurwissenschaftlichen Fachgebieten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Richtlinien eine mittlere Relevanz zwischen 1,3 und 2,9 bei Standardabweichungen von 0,3 bis 1,1 aufweisen. Keine Richtlinie wurde als

überwiegend „irrelevant" eingestuft (Maximum bei 4 von 19 Antworten). Die gruppenweise aggregierten Bewertungen der Richtlinien, die den in Bild 1 dargestellten Anforderungen A1 bis H1 zugeordnet sind, fasst Tabelle 1 zusammen.

Tabelle 1: Mittelwert μ und Standardabweichung σ der Relevanz der bereichsweise aggregierten Richtlinien

Anforderungs-bereich	μ	σ
A1: Validierung	2,0	0,84
A2: Verifizierung	2,0	0,81
B1: Objektivität	2,0	0,82
B2: Zuverlässigkeit	1,9	0,74
B3: Validität	1,4	0,59
C1: Verständlichkeit	2,1	0,76
C2: Wiederholbarkeit	2,1	0,85

Anforderungs-bereich	μ	σ
C3: Erlernbarkeit	2,0	0,81
C4: Anwendbarkeit	1,8	0,75
D1: Komplexitäts-bewältigung	1,9	0,82
D2: Problemlösen	2,2	0,77
D3: Strukturieren	2,2	0,74
D4: Kompatibilität	2,2	0,95

Anforderungs-bereich	μ	σ
E1: Flexibilität	2,1	0,81
F1: Innovativität	2,4	0,96
F2: Konkurrenz-fähigkeit	2,1	0,69
G1: Effektivität	1,7	0,68
G2: Effizienz	2,0	0,83
H1: Problemspezifität	1,8	0,61

Die nach Einschätzung der Befragten relevantesten Richtlinien lauten:

Die Vorgehensweise soll geeignet sein, die Komplexität der vorliegenden Aufgabe oder Probleme zu bewältigen. (C4 Anwendbarkeit; $\mu = 1{,}3$; $\sigma = 0{,}44$)

Von der Vorgehensweise muss bekannt sein, für welche Aufgaben oder Probleme sie geeignet ist und für welche nicht. (B3 Validität; $\mu = 1{,}4$; $\sigma = 0{,}59$)

Die Schwierigkeit, die Vorgehensweise in der Praxis auch umsetzen zu können, muss bewältigbar sein. (C4 Anwendbarkeit; ; $\mu = 1{,}4$; $\sigma = 0{,}59$).

Die Vorgehensweise muss effizient sein. (G2 Effizienz; $\mu = 1{,}5$; $\sigma = 0{,}5$)

Die Vorgehensweise muss effektiv sein. (G1 Effektivität; $\mu = 1{,}5$; $\sigma = 0{,}75$)

Die Vorgehensweise muss zuverlässig sein. (B2 Zuverlässigkeit; $\mu = 1{,}5$; $\sigma = 0{,}6$)

Diese und die weiteren Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass das theoretisch abgeleitete Anforderungssystem auch in der Praxis als relevant beurteilt wird. Dieser Einschätzung gegenüber ist jedoch folgendes beachtenswert: Bei einer Vielzahl veröffentlichter allgemeiner oder spezieller Methodiken wird nicht explizit angegeben, welchen Anforderungen sie ursprünglich genügen sollten und welchen sie tatsächlich genügen. Ausgehend von den Umfrageergebnissen (trotz möglicher suggestiver Einflüsse durch die Befragung), überrascht das, da wenigstens implizit ein Anforderungsbewusstsein zu existieren scheint. Das vorgeschlagene Anforderungssystem könnte helfen, diese Unstimmigkeit zu überwinden und explizite Kriterien zu etablieren.

Eine allgemeingültige Relevanz kann aus diesen Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Dies erscheint sowohl grundsätzlich nicht möglich als auch nicht für die Praxis von Bedeutung. Erstens ist die Gruppe der Befragten hinsichtlich ihrer überwiegenden Tätigkeit in der akademischen Forschung nicht repräsentativ, um über diesen Bereich hinausgehend gültige Aussagen abzuleiten. Die Anforderungen und ihre Richtlinien können verwendet werden, um einen Prozess für ein konkretes Vorhaben festzulegen oder auszuwählen. Dann muss eine für diesen Fall sinnvolle Auswahl oder Gewichtung der einzelnen Richtlinien erfolgen. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung kann eine solche Gewichtung für verschiedene Vorhaben (und verschiedene Disziplinen), basierend auf den vorliegenden Befragungsergebnissen, nicht angegeben werden. Hierfür ist eine repräsentative Grundgesamtheit notwendig. Das heißt, dass ausreichende Informationen über den jeweiligen fachlichen Hintergrund und die Projekterfahrung oder ähnliches vieler Befragter aus möglichst vielen unterschiedlichen Bereichen gewonnen werden müssen. Hieraus könnten möglicherweise durch entsprechende Klassenbildung „idealtypische" Relevanzprofile abgeleitet werden. Zu beachten ist dabei, dass wegen der Form der Befragung kein Zusammenhang zwischen der Relevanz der Anforderungen und möglichen Erfolgsgrößen (wie z. B. Kosten, Qualität, Zeit) des realisierten Vorhabens hergestellt werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgeschlagene System von Anforderungen und zugeordneten Richtlinien ist für die Praxis der Gestaltung von Entwicklungsprozessen relevant. Um die Richtlinien für die Praxis nutzbar zu machen, müssen sie durch noch weiter konkretisierte, eventuell mit Beispielen verknüpfte Handlungsanweisungen oder Metriken ergänzt werden. Sie decken unterschiedliche Aspekte ab, die Gegenstand unter anderem der Teilgebiete der Konstruktionswissenschaft sind. Horvath [5] gibt eine systematische Aufstellung jener wissenschaftlicher Teilgebiete an, die (aus einer wissensorientierten Sicht heraus) zum Konstruktionsprozess beitragen oder sich mit diesem befassen (Tabelle 2). Aus der Gegenüberstellung der Systematik von Horvath und dem System der Anforderungen zur Gestaltung von Entwicklungsprozessen kann abgeleitet werden, welche wissenschaftlichen

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Anforderungsbereiche und der Forschungsgebiete nach Horvath [5]

Forschungsgebiete nach Horvath	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	F1	F2	G1	G2	H1
Psychologie										X	X	X	X	X					
Kognition													X						
Wissen			X	X	X			X				X							
Intelligenz	X								X	X	X			X	X	X	X	X	
Externalisierung						X	X	X											
Ausbildung								X	X										
Objektbeschreibung										X		X							
Prozesse		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
Abhängige Prozesse																		X	
Konstruktionswissenschaft	X	X												X					
Strategien									X					X					
Theorien						X	X					X							X
Semantik						X	X	X					X						
Systematisierung						X	X		X	X		X	X	X		X			X
Methodiken			X	X	X					X	X	X	X	X	X				
Innovativität											X		X	X					
Modellierung										X	X								
Modellierungstechniken								X											
Praxeologie (Menschliches Handeln)									X		X	X	X	X		X		X	X
Qualität																		X	
Standardisierung			X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	
Kapazitätsmanagement													X						
Konstruktionsmanagement						X	X		X				X		X	X	X	X	

Teilgebiete mit spezifischen Erkenntnissen zur künftigen Konkretisierung der Richtlinien beitragen können.

Danksagung

Das zu Grunde liegende Forschungsvorhaben FOR 981 A1 wird von der DFG gefördert.

Literatur

[1] Müller, Johannes: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Berlin: Springer, 1990. – ISBN 3-540516611

[2] Pahl, Gerhard; et al.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3540340607

[3] Keller, Alexander; Binz, Hansgeorg: Requirements on engineering design methodologies. In: Norell Bergendahl, Margaretha et al. (Hrsg.): Proceedings of ICED'09, Volume 2. Glasgow: Design Society, 2009. DS-58-2: S. 2-203 bis 2-214. ISBN 978-1904670056

[4] Keller, Alexander; Binz, Hansgeorg: Anforderungen an Konstruktionsmethodiken. In: Binz, Hansgeorg (Hrsg.): Zukunft der globalen Produktentwicklung. Universität Stuttgart, 2009. IKTD Bericht Nr. 572, S. 201-214. – ISBN 978-3922823728 www.berlinerkreis.de/fileadmin/download/20091123_Tagungsband_BKJT2009_final.pdf#page=204

[5] Horvath, Imre: A treatise on order in engineering design research. In: Research in Engineering Design 15(3), S.155-181. DOI 10.1007/s00163-004-0052-x

Management von Kostenwissen im Rahmen der Integrierten Produktentwicklung – Konzeption und beispielhafte Umsetzung

Susann Köhler, Uwe Götze

Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften,
Professur BWL III: Unternehmensrechnung und Controlling, Thüringer Weg 7, 09126 Chemnitz
E-Mail: susann.koehler@wirtschaft.tu-chemnitz.de; Internet: http://www.tu-chemnitz.de/wirtschaft/bwl3

Inhalt: *Es ist unbestritten, dass die frühzeitige Berücksichtigung von Kosten bei Produktinnovations- bzw. -entwicklungsprozessen deren Erfolg tendenziell verbessert. Diese stellt jedoch auch eine Herausforderung dar, da gerade in den frühen Phasen der Entwicklungsprozesse zumeist nur wenige gesicherte Erkenntnisse über die von Gestaltungsalternativen verursachten Kosten vorliegen. Daraus resultiert der Bedarf an einem systematischen Management von Kostenwissen in der Integrierten Produktentwicklung, für das im Rahmen des Beitrags ein – primär auf die Konstruktion als wesentliches Element von Entwicklungsprozessen bezogenes – Konzept vorgestellt und seine beispielhafte Umsetzung anhand von zwei Demonstratoren des „Labors für Integrierte Produktentwicklung" der Technischen Universität Chemnitz veranschaulicht wird.*

Abstract: *It is incontestable that the early consideration of costs tends to enhance the success of product innovation resp. development processes. However, this also constitutes a challenge since especially in the early phases of the development processes only few solid findings about the effected costs of design alternatives are available. That implies a need of a systematic management of cost knowledge in the integrated product development. For this purpose, a concept that primarily deals with designing as essential element of development processes is presented. The implementation of this concept is exemplified with two demonstrators of the "laboratory for integrated product development" at the Chemnitz University of Technology.*

Stichwörter: *Kostenwissen, Integrierte Produktentwicklung, Target Costing, Wissensmanagement*

Keywords: *cost knowledge, integrated product development, knowledge management, target costing*

1 Einleitung

Es ist keine neue Erkenntnis, dass ein Kostenmanagement, welches in der Produktentwicklung ansetzt, besonders effizient ist. Die hohe Kostenverantwortung eines Entwicklers resultiert aus der hohen Beeinflussbarkeit der Kosten in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses und der weitgehenden Kostenfestlegung auch im Hinblick auf die

Entscheidungsspielräume nachfolgender Bereiche [1, 2, 3]. Um dieser Verantwortung gerecht werden zu können, ist möglichst frühzeitig kostenbezogenes Wissen erforderlich, das aber gerade dann nur unsicher, unscharf und/oder unvollständig vorhanden ist.
Zum Umgang mit dieser Problematik sollte zum einen eine organisatorische und technische Integration aller für die Produktentwicklung relevanten Bereiche erfolgen, um auf das vorhandene Kostenwissen zugreifen und es zur kostengünstigen Entwicklung nutzen zu können. Zum anderen ist ein gezieltes Management von Kostenwissen anzustreben. Dazu bietet es sich an, auf das Instrumentarium des Wissensmanagements zurückzugreifen.
Im Rahmen dieses Beitrags werden demgemäß ein Konzept zum Management von Kostenwissen in der Integrierten Produktentwicklung (Abschnitt 3) und als Grundlage dafür ein Modell zur Strukturierung des Gesamtsystems der Integrierten Produktentwicklung vorgestellt (Abschnitt 2). Abschließend wird die Umsetzung des Konzeptes beispielhaft anhand von Demonstratoren des „Labors für Integrierte Produktentwicklung" an der Technischen Universität Chemnitz veranschaulicht (Abschnitt 4).

2 Ein Modell der Integrierten Produktentwicklung

Der Begriff „Integrierte Produktentwicklung" (IPE) wird in der Literatur zwar oft verwendet [1, 4, 5], ein einheitliches Verständnis davon existiert jedoch nicht. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird unter der IPE eine methodische Vorgehensweise zur Entwicklung wettbewerbsfähiger Produkte durch organisatorische und technische Integration aller Vorgänge der Produktentwicklung unter Beachtung des gesamten Produktlebenszyklus und des dazu nötigen Wissens verstanden [siehe auch 4, 5]. Ausgehend von diesem Verständnis kann eine Strukturierung des Gesamtsystems der Produktentwicklung vorgenommen werden, für die hier – in Anlehnung an VAJNA/BURCHARDT – ein verschiedene Sichten umfassendes Modell vorgeschlagen wird (siehe Bild 1).
Ein verbindendes Element zwischen den einzelnen Sichten sind die im Rahmen der IPE zu treffenden Entscheidungen. Aus diesen lassen sich in einem ersten Schritt die IPE-relevanten *Prozesse/Aufgaben* des Produktentstehungsprozesses ableiten. Diese Prozesse können – wie in Bild 1 mit den Phasen des klassischen Konstruktionsprozesses angedeutet – tiefergehend in Subprozesse sowie weiter in einzelne Arbeitsschritte untergliedert werden [1, 3]. Ausgehend von den zu unterstützenden Prozessen/Aufgaben sind in weiteren Sichten die relevanten Objekte und Methoden, das benötigte und entstehende Wissen, die genutzte Informations- und Kommunikationstechnologie sowie die (Aufbau-)Organisa-

tion zu differenzieren [2, 3]. Zwischen den einzelnen Elementen einer oder verschiedener Sichten bestehen vielfältige Beziehungen (siehe Bild 1).

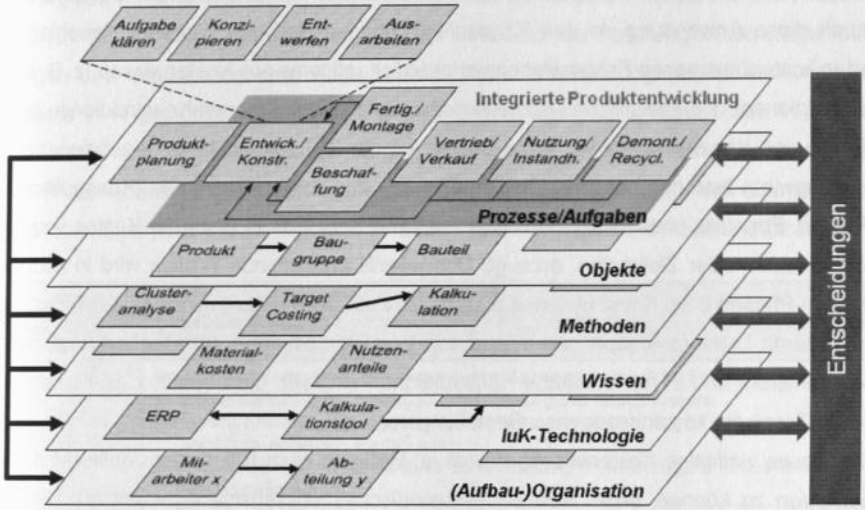


Bild 1: Modell der Integrierten Produktentwicklung (Quelle: in Anlehnung an [4], S. 48)

3 Kostenwissen und dessen Management

Im Rahmen der IPE ist entwicklungsbezogenes Wissen von besonderer Bedeutung. Zu diesem zählt das Kostenwissen, das Kenntnisse über die Grundlagen der Kostenentstehung und -berechnung allgemein, über konkrete nachkalkulierte Kosten bereits entwickelter und hergestellter Produkte bzw. Teile, über Kostenberechnungs- und Schätzmethoden sowie über die Beeinflussbarkeit von Kosten umfasst [6]. Das Kostenwissen ist im vorgestellten IPE-Modell primär in der Sicht „Wissen" zu finden, spiegelt sich aber auch in der „(Aufbau-)Organisation" (u. a. in Strukturen und Regeln sowie personellen Ressourcen) und in den „Methoden" (in Kostenberechnungs- und -schätzmethoden) wider. Verbindungen zu anderen Sichten bestehen dahingehend, dass das Kostenwissen bei bestimmten Prozessen/Aufgaben verwendet wird bzw. – durch Methoden- und/oder Wissensanwendung – entsteht, sich z. T. auf bestimmte Objekte (z. B. Kosten einzelner Teile) bezieht und mittels IuK-Technologie bewahrt, gefunden, entwickelt und verteilt wird.

In den Phasen des Konstruktionsprozesses – als wichtigem Teilprozess der IPE – kann zwischen benötigtem und entstehendem Kostenwissen unterschieden sowie weiter in kos-

tenbezogenes Methoden- und Faktenwissen detailliert werden. Kostenbezogenes Methodenwissen (z. B. Erfahrungen aus dem Einsatz von Kostenschätzmethoden) wird einerseits in jeder Phase für die Anwendung von Methoden benötigt und entsteht andererseits durch diese Anwendung. In den Konstruktionsphasen sind des Weiteren verschiedene Arten kostenbezogenen Faktenwissens erforderlich: allgemeines Kostenwissen (z. B. Kostenfunktionen) und spezifisches Kostenwissen aus abgeschlossenen Konstruktionen (z. B. Kosten von Konzeptvarianten), aus weiteren an der IPE beteiligten Unternehmensbereichen sowie – bezogen auf das jeweilige Objekt – aus vorangegangenen (Konstruktions-) Phasen. Ebenfalls phasenspezifisch wird Faktenwissen, z. B. in Form der Kosten von Gestaltvarianten oder Zielkosten, erzeugt. Das jeweils entstehende Wissen wird in nachfolgenden Phasen bzw. Konstruktionen eingesetzt. Zusätzlich dazu existiert Wissen, das erst in späteren Lebenszyklusphasen oder durch Verallgemeinerung spezifischen Kostenwissens entsteht und in nachfolgende Konstruktionen einfließt. Dies betrifft z. B. Kostenwissen in Form von kostenbezogenen Gestaltungsregeln [6].

Um dieses vielfältige Kostenwissen gezielt im Rahmen einer IPE nutzen, entwickeln und bewahren zu können, bietet sich ein systematisches Wissensmanagement an. Dies ist eine bewusste und zielgerichtete Vorgehensweise, um das vorhandene und relevante Wissen zu identifizieren, zu verteilen, effektiv zu nutzen, weiterzuentwickeln, zu bewahren und zu aktualisieren [7]. Eine populäre Strukturierung des Wissensmanagements geht auf PROBST/RAUB/ROMHARDT zurück, die zunächst die „operativen" Bausteine Identifikation, Entwicklung/Erwerb, (Ver-)Teilung, Nutzung und Bewahrung von Wissen als mehr oder weniger stark miteinander verbundene Kernprozesse des Wissensmanagements unterscheiden und diese dann durch die „strategischen" Bausteine Wissensziele und Wissensbewertung zu einem Managementregelkreis, d. h. zu einem übergeordneten Steuerungszyklus aus Zielsetzung, Umsetzung und Kontrolle, vervollständigen [6, 7].

Das hier vorgeschlagene Konzept für das Management von Kostenwissen im Konstruktionsprozess soll nun zum einen aus einem Gestaltungsrahmen mit differenzierten, nach den Phasen des Konstruktionsprozesses gebildeten Bausteinen bestehen (siehe Bild 2). Es umfasst zum anderen die literaturgestützte Zusammenstellung von Gestaltungsempfehlungen für diese Bausteine. Bei der entsprechenden Literaturauswertung ist aufgefallen, dass sich die Autoren kaum explizit mit der Thematik „Management von Kostenwissen im Konstruktionsbereich" beschäftigen. Es existieren aber einige Ansätze, die sich implizit mit einzelnen Bausteinen befassen. So wird zur informationstechnischen Unterstützung

zumeist der Einsatz von Kosteninformationssystemen empfohlen bzw. angestrebt, die mit der einheitlichen Speicherung sowie entscheidungsorientierten Aufbereitung und Bereitstellung des vorhandenen Kostenwissens eine Basis für dessen Transparenz und Nutzung schaffen. Bei der Wissensentwicklung liegt der Fokus auf der Ableitung neuen (allgemeingültigen und objektbezogenen) Kostenwissens durch Anwendung bereits vorhandenen Wissens in IT-gestützten Systemen. Für den Erwerb von Kostenwissen wird v. a. eine Lieferanten- und Kundenintegration vorgeschlagen [6, 8]. Die Bausteine „Wissensziele" und „Wissensbewertung" werden i. d. R. nicht untersucht, obwohl sie für den übergeordneten Steuerungszyklus enorm wichtig sind. Einige Aussagen zu ihrem Inhalt enthält Bild 2.

Konstruktionsphase / Wissensmanagementbausteine	Aufgabe klären	Konzipieren	Entwerfen	Ausarbeiten
Wissensziele festlegen	*normativ:* Schaffung einer wissensbewussten Unternehmenskultur, Entwicklung eines Wissensleitbildes mit Aussagen zur Bedeutung des Kostenwissens *strategisch:* Entscheidung, welches Kostenwissen zukünftig wichtig ist und deshalb bewahrt bzw. entwickelt werden soll *operativ:* Ableitung konkreter Teilziele zur Umsetzung kostenbezogener Wissensmanagementmaßnahmen			
Wissensidentifikation	Identifikation des intern und extern vorhandenen Wissens, z. B.			
	vom Markt erlaubte Zielkosten	Kostenwissen über bereits konstruierte Komponenten	Relativkosten-Informationssysteme	Kostenwissen über Zukauf- oder Wiederholteile
Wissensentwicklung/-erwerb	Erwerb/Entwicklung von Wissen, z. B.			
	Ableitung von Teilzielkosten aus Gesamtzielkosten	Erstellung erster Kostenschätzungen	Erwerb von Relativkosteninformationen	detaillierte Kostenkalkulationen
	Umwandlung von impliziten Wissen in explizites Wissen			
Wissens-(ver-)teilung	(Ver)Teilung von Wissen, z. B.			
	Zielkostenvorgaben aus der Marketingabteilung	Kosteneinflussgrößen	Wissen zur fertigungsgerechten Gestaltung	Preise für Zukauf- bzw. Wiederholteile
	Wissensmultiplikation; Fördern der Mitarbeiterkommunikation, um die Verfügbarkeit von Kostenwissen zu verbessern			
Wissensnutzung	Förderung der Nutzungsbereitschaft von vorhandenem Kostenwissen, z. B. durch Abbau psychologischer Nutzungsbarrieren			
Wissensbewahrung	Speicherung und Aktualisierung des internen Wissens, z. B.			
	Erfahrungen bzgl. der Kundenanforderungen	Kostenschätzungen von Produktkomponenten	Kostenwachstumsgesetze	detaillierte Kostenkalkulationen
Wissensbewertung	Messung der Veränderung der Wissensbasis und Bewertung (mit Hilfe von Wissensindikatoren bzw. Kennzahlen), ob die Wissensziele damit erreicht wurden			

Bild 2: Management von Kostenwissen in den Konstruktionsphasen (Quelle: modifiziert aus [6], S. 283)

4 Umsetzung anhand von Demonstratoren des „Labors für Integrierte Produktentwicklung" an der Technischen Universität Chemnitz

Die Umsetzung des auszugsweise beschriebenen Konzepts für das Management von Kostenwissen soll am Beispiel von zwei Demonstratoren des „Labors für Integrierte Produktentwicklung" (IPELAB) veranschaulicht werden. Dies ist ein von der Professur Konstruktionslehre geleitetes Projekt zur Unterstützung von KMUs bei der Produktentwicklung. Mit Hilfe von Demonstratoren wird gezeigt, wie die im Rahmen der IPE ablaufenden Prozesse und der Methodeneinsatz durch IT-Werkzeuge unterstützt und dabei Informationen aus verschiedenen Phasen des Lebenszyklus (bezüglich konstruktiver Parameter, Fertigungseigenschaften, Kosten etc.) einbezogen werden können. Bild 3 zeigt die Aufgabengebiete des IPELAB und deren Verbindungen zu ausgewählten IT-Systemen.

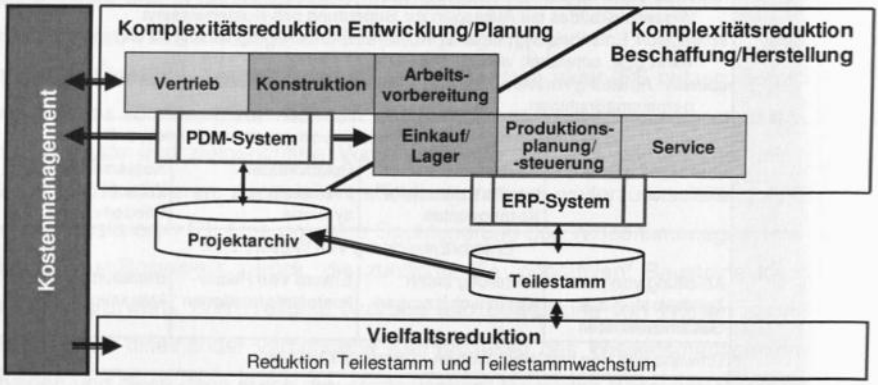


Bild 3: Aufgabengebiete und ausgewählte IT-Systeme im IPELAB (zum IPELAB: [9])

Ein Aufgabengebiet des IPELAB ist das Kostenmanagement, mit dem Maßnahmen zur Beeinflussung von Kostenstruktur, -verhalten und -niveau in die Produktentwicklung integriert werden sollen [10]. Dies betrifft u. a. die zielkostenorientierte Produktentwicklung.

Zur Veranschaulichung des Target Costing werden im IPELAB zwei Demonstratoren bereitgestellt: (1) „Target Costing-Prozess" sowie (2) „Wissensmanagement im Target Costing". Beim Demonstrator (1) wird in einem ersten Teil der Target Costing-Ablauf mit Hilfe von Schulungsunterlagen (auch IT-gestützt verfügbar) sowie zwei Fallbeispielen vermittelt: Target Costing für eine Kratzenraumaschine sowie für einen Tablet-PC. In einem

zweiten Teil des Demonstrators wird die informationstechnische Unterstützung im IPELAB veranschaulicht (vgl. Bild 4, das auch die Einsatzschwerpunkte andeutet):

- die Ausführung ausgewählter Schritte des Target Costing wie Zielkostenbestimmung, Zielkostenspaltung, Ermittlung von Zielkostenindizes und Kostenreduktionsbedarfen sowie Vergleich zwischen Zielkosten und Istkosten (aus dem *ERP-System*) mittels *Tabellenkalkulation* (andere existierende Systeme verfügen bisher nicht über die entsprechende Funktionalität),
- der Zugriff auf Kundenanforderungen sowie Informationen zu Funktionen, Komponenten bzw. Teilen und deren Kosten (entwicklungsbegleitende Prognosen aus dem Kalkulations-System, Istkosten aus dem *ERP-System*) über das *PDM-System* als zentrale Integrationsplattform,
- die Nutzung von *CAD-, Berechnungs-* und *Simulationssystemen* sowie *Katalogsoftware* für die Gestaltung des Produktes bzw. der Komponenten mit Blick auf die Zielkostenerreichung im Rahmen der Entwicklung,
- die Verwendung eines *Kalkulations-Systems* (wie das im IPELAB implementierte FACTON® [11]), um die Kosten der Konzept- bzw. Entwurfsvarianten zu schätzen (in der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase unter Einbeziehung von Informationen aus *CAD-Systemen* bzw. *Teilekatalogen* sowie dem *ERP-System*), die Auswirkungen von Kostensenkungsmaßnahmen zu prüfen sowie Kostenstrukturen zu analysieren.

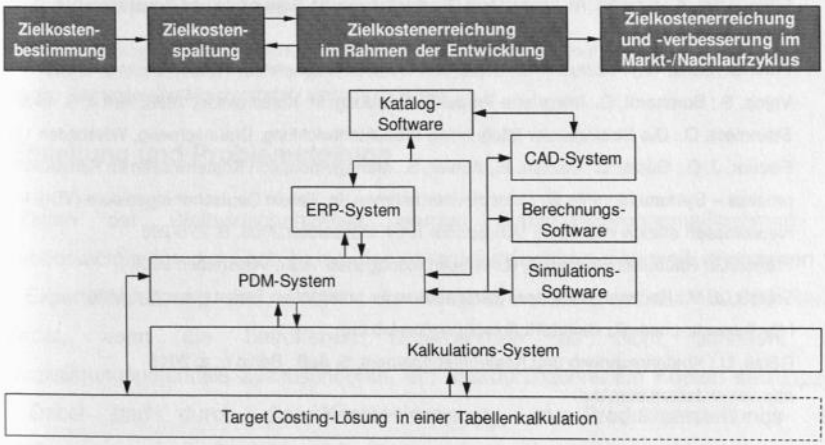


Bild 4: IT-Unterstützung des Target Costing-Ablauf im IPELAB

Der Demonstrator (2) bezieht sich auf das Wissensmanagement im Rahmen des Target Costing. Dazu wird zunächst mit Informationsflussdiagrammen und Schulungsunterlagen (auch fallbeispielbezogen) herausgestellt, welches Wissen – phasenspezifisch – benötigt wird: u. a. solches über Kundenanforderungen und die Zahlungsbereitschaft, die Beiträge von Funktionen bzw. Komponenten zur Erfüllung von Produktmerkmalen bzw. Funktionen, Kostenschätzmethoden, Kosteneinflussgrößen und deren Wirkung, Konstruktionsregeln, komponentenspezifische Standardkosten sowie bisher erreichte Istkosten [10]. Des Weiteren wird gezeigt, wie die *Identifikation* von (objektbezogenem) Kostenwissen durch Nutzung von Suchmechanismen im PDM-System, die *Entwicklung* von neuem Kostenwissen im Kalkulations-System (mit Informationen aus ERP- und CAD-Systemen), die *Wissensverteilung* über das PDM-System (als zentrale Integrationsplattform mit Zugriff auf konsistente (Kosten-)Informationen), die *Wissensnutzung* durch Informationsaufbereitung und Bereitstellung von Kostenschätz-/-berechnungsmethoden im Kalkulations-System sowie die *Wissensbewahrung* durch Speicherung von Kostenwissen im PDM-System und im Kalkulations-System erfolgen können. Die Vorgabe von *Wissenszielen* und die *Wissensbewertung* werden in einem Management-Cockpit (mit einer Vorlage für ein wissensbezogenes Ziel-/Kennzahlensystem, Vergleichsmöglichkeiten, Ampelfunktion etc.) ermöglicht.

Literatur

[1] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, 4. Aufl., München, Wien 2009

[2] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 6. Aufl., Berlin u. a. 2007

[3] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre, 7. Aufl., Berlin u. a. 2007

[4] Vajna, S.; Burchardt, C.: Integrierte Produktentwicklung, in: Konstruktion, 1998, Heft 4, S. 45-50

[5] Steinmetz, O.: Die Strategie der Integrierten Produktentwicklung, Braunschweig, Wiesbaden 1993

[6] Fischer, J. O.; Götze, U.; Leidich, E.; Köhler, S.: Management von Kostenwissen im Konstruktionsprozess – Systemelemente für Industrieunternehmen, in: Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Ingenieurswissen effektiv managen, VDI-Bericht 1964, Düsseldorf 2006, S. 275-296

[7] Probst, G.; Raub, St.; Romhardt, K.: Wissen managen, 5. Aufl., Wiesbaden 2006

[8] Steiner, J. M.: Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz, Aachen 1996

[9] http://www.tu-chemnitz.de/mb/KL/forschung/ipe-lab.php

[10] Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement, 5. Aufl., Berlin u. a. 2010

[11] http://www.facton.com/de/

Selbstorganisierende Merkmalskarten basiertes Entscheidungsunterstützungssystem

Jörg Feldhusen, Arun Nagarajah

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

Inhalt: *Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, wie die Vorteile eines Rechners mit denjenigen des Menschen für eine zweckdienliche Zusammenarbeit für das Treffen einer Entscheidung kombiniert werden müssen. Die Entscheidungsfindung sollte im aktuellen Stand dem Menschen vorbehalten sein, da er in der Lage ist, die Zusammenhänge besser als ein DV-System zu analysieren und zu interpretieren, vorausgesetzt, dass sie ihm in einer verständlichen Form aufbereitet werden. Eine gute Möglichkeit für die Aufbereitung stellt das Visualisieren der relevanten Daten dar. Hierfür sollen Data-Mining-Methoden angewendet werden, die in der Lage sind, die Strukturen und Zusammenhänge in den vorhandenen Daten automatisch zu erkennen.*

Abstract: *In this paper it is shown how the benefits of a computer have to be combined with those of humans for a useful collaboration to make decisions. In the current state of research the human should make the decisions, because he is able to analyse and interpret the relationships in the data better than a computer. Therefore the prerequisite is that the data are prepared in an intelligible for such as visualising those. For the visualization of the data, data mining methods are used, which are able to identify the structures and relationships in the existing data automatically.*

Stichwörter: *Selbstorganisierende Merkmalskarten, Produktvarianten, Entscheidung*

Keywords: *Selforganising Maps, product variants, decision*

1 Einleitung und Problemstellung

In Zeiten der Weltwirtschaftskrise werden Rationalisierungsmaßnahmen als überlebenswichtig für die Fortführung der unternehmerischen Tätigkeit angesehen [1]. Laut Expertenschätzung sind allein in der Automobilindustrie bis zu 100.000 Stellen gefährdet, wenn die betroffenen Unternehmen es nicht schaffen, ihre Rationalisierungspotentiale auszuschöpfen, um überdurchschnittlich Kosten einzusparen [1]. Dabei darf durch die Kosteneinsparung im Produktentstehungs- und Herstellungsprozess die Qualität des Produkts nicht beeinträchtigt werden, da sonst nicht

nur Kosten durch Schadenersatzansprüche, hervorgerufen durch Produktfehlfunktionen, sondern auch Umsatzrückgänge durch Imageverlust entstehen können [2].

Eine Lösung, diese konträren Ziele zu erreichen, ist die Konzentration auf die Weiterentwicklung bestehender Produktlösungen. Hierbei werden bestehende Produkte den neuen Kundenanforderungen angepasst, ohne die in der Praxis bewährten Lösungsprinzipien zu verändern [3]. Über 80 Prozent der heutigen Produkte werden über die Änderung bestehender Produkte entwickelt [4].

Die größte Herausforderung besteht bei der Variantenkonstruktion darin, aus den gegebenen Anforderungen zu erkennen, mit welcher bestehenden Produktvariante dieser neue Auftrag die höchste Ähnlichkeit aufweist oder gar identisch ist, um diese Variante als Entwicklungsgrundlage für die neue Anfrage zu verwenden. Die Auswahl einer geeigneten Produktvariante setzt voraus, dass ein Vergleich zwischen dem neuen Kundenauftrag und den bestehenden Produktvarianten möglich ist. Der kausale Zusammenhang zwischen den Produktanforderungen und den Produktmerkmalen besteht darin [5], dass letztendlich das Produkt mit seinen Merkmalen durch die Anforderungen festgelegt wird. Dennoch ist ein Vergleich auf diesen unterschiedlichen Abstraktionsebenen (Anforderungsebene bzw. Produktebene) nicht möglich.

Eine Produktvariantenauswahl, die allein auf der kognitiven Fähigkeit des Menschen aufbaut, kann nicht erfolgsversprechend sein, da es sich bei der Produktentwicklung um ein komplexes System handelt. Dies spiegelt sich in der aktuellen Vorgehensweise des Konstrukteurs bei der Produktvariantenauswahl wider. Somit ist das zielgerichtete Aufbereiten der Anforderungen aus einem Lastenheft durch den Konstrukteur allein nicht durchführbar und bedarf der Unterstützung durch ein Datenverarbeitungssystem (DV-System). Hierdurch soll der Konstrukteur bei dem Auswahlprozess zielgerichtet unterstützt werden.

Ein wichtiges Problem bei der Nutzung von DV-Systemen stellen die immer noch sprachlich dokumentierten Anforderungen dar [6], da diese aufgrund ihrer informellen Darstellung zwangsläufig Interpretationsspielräume mit sich bringen [7], wodurch sie nicht eindeutig erfasst werden können. Diese Nichteindeutigkeit wird in der Literatur als „Unschärfe" bezeichnet, da sie aus einem Mangel an begrifflicher Schärfe resultiert [8].

2 Analysieren der optimalen Aufgabenteilung zwischen Menschen und DV-Systemen für das Treffen einer Entscheidung

In der heutigen Zeit kommt nicht nur der Mensch, sondern zunehmend ein DV-System sowohl zur Aufbereitung der Daten als auch als Entscheidungsträger infrage. Das vermehrte Einsetzen von DV-Systemen in der konstruktiven Umgebung und das bewusste Erkennen der Information als eine allgemeine Größe, die auch durch Rechner verarbeitet werden kann, hat schon frühzeitig die Frage aufkommen lassen, ob es nicht möglich wäre, die Aufgaben in der Konstruktionstätigkeit weitestgehend dem Rechner zu übertragen [11]. Für diese Untersuchung ist es sinnvoll, zuerst eine allgemeine Systematik zu erarbeiten, um die verschiedenen Aspekte der Aufgabenteilung zwischen einem DV-System und dem Menschen besser analysieren zu können. Hierfür ist es zweckmäßig, alle möglichen Kombinationen zu ermitteln, die zwischen Mensch und DV-System im Hinblick auf die Aufgabenteilung zur Aufbereitung der Informationen und dem Treffen der Entscheidung existieren. Das Ergebnis ist in Bild 2 dargestellt.

		Entscheidungsträger	
		Mensch	DV-Systeme
Aufbereitung der Anforderungen	Mensch	Konventionelle I	Expertensysteme III
	DV-Systeme	Entscheidungs-unterstützungs-systeme II	Autonome DV-Systeme IV

Bild 2: Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Rechnern

Diese Systematik soll dabei helfen, die bestehenden Ansätze zur Produktauswahl einfacher analysieren zu können. Zudem soll hierbei der Bereich identifiziert werden, der erfolgversprechend für die Produktauswahl sein könnte.

Bereich I: Konventionelle Entscheidungsfindung

Bereich II: Entscheidungsunterstützungssysteme zur Entscheidungsfindung

Bereich III: Expertensysteme zur Entscheidungsfindung
Bereich IV: Autonome DV-Systeme zur Entscheidungsfindung
Es kann festgehalten werden, dass derzeit kein befriedigender Ansatz zur Lösung des Auswahlprozesses für die Variantenkonstruktion existiert. Bei der Entwicklung einer adäquaten Lösung für das Auswahlproblem stellt sich die Frage, welcher der Bereiche II und III für die zielgerichtete Entwicklung einer Vorgehensweise der erfolgversprechendste ist.
Die Aufgabenteilung bei einem Expertensystem ist nicht zielführend, da die bessere Entscheidungsfähigkeit des Menschen gegenüber einem DV-System nicht genutzt wird und zusätzlich der Mensch für die Aufbereitung der Information verantwortlich ist. Die Expertensysteme erheben zwar den Anspruch, auch schlecht strukturierte Probleme mit unscharfen Daten lösen zu können [12]. Aber vermutlich wird das Ergebnis aufgrund der schlechten Aufgabenteilung mit hoher Wahrscheinlichkeit schlechter ausfallen als bei der manuellen Entscheidung, da das Expertensystem nur so gut sein wie das von dem Experten zur Verfügung gestellte Wissen. In einem komplexen System mit unüberschaubaren Daten ist der Mensch mit seinen Fähigkeiten damit überfordert, aus den vorhandenen Daten Wissen zu extrahieren. Zudem kommt es in der Praxis häufig vor, dass der Mensch in der Lage ist, Informationen oder Wissen aus anderen Wissensgebieten für seine Entscheidungsfindung mitzuberücksichtigen [13]. Bei einem Expertensystem fällt die Leistungsfähigkeit rapide ab, wenn es sein Wissensgebiet verlässt [13]. Folglich werden in diesem Aufgabenbereich sowohl die Vorteile der menschlichen Fähigkeiten beim Umgang mit Wissensverarbeitung als auch die Vorteile eines Rechners beim Umgang mit hoher Anzahl an Daten nicht genutzt.
Somit bietet der EUS-Bereich durch die Kombination der Vorteile des Menschen und die des DV-Systems bei der Entscheidungsfindung eine vielversprechende Möglichkeit. Aber das Problem bei vielen EUS Systemen ist, dass der menschliche Einfluss bei der Informationsgewinnung sehr hoch ist. Eine vielversprechende Lösung ist nur gewährleistet, wenn die Aufbereitung der Daten zur Information überwiegend durch ein DV-System übernommen und der menschliche Einfluss so weit wie möglich minimiert wird. Eine geeignete Methode für die Produktvariantenauswahl ist die Selbstorganisierende Merkmalskarte (SOM).

3 Validierung am Beispiel des Motorhaubenschließsystems

Die Vorgehensweise für die Produktvariantenauswahl mit Hilfe der SOM soll am Beispiel des Motorhaubenschließsystems (MHSS) dargelegt werden. Der Ansatz wurde bei dem mittelständischen Automobilzulieferer BÖCO - Böddecker & Co. GmbH & Co.
Für die Durchführung der SOM wird das Tool SOMine von der Firma Viscovery® verwendet.

3.1 Entscheidungsphase

Absicherung der Ergebnisse
Für die erste Überprüfung der Produktvariante wird die Visualisierung der Häufigkeitsverteilung verwendet. Da keine der bestehenden Produktvarianten identisch mit einer anderen ist und auch der zu vergleichende neue Datensatz für den neuen Auftrag damit nicht identisch bzw. sehr ähnlich ist, kann erwartet werden, dass ein Neuron keine zwei bzw. mehrere Eingangsvektoren und damit Produktvarianten repräsentiert.

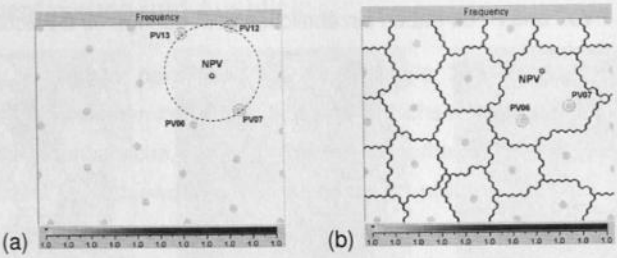


Bild 3: (a) Häufigkeitsverteilung, (b) Häufigkeitsverteilung mit Clustern

Der Farbleiste in Bild 3 (a) kann entnommen werden, dass keine Neuronen mehr als einen Eingangsvektor repräsentieren. Somit war gewährleistet, dass die Prognosequalität dieser SOM-Karte ausreichend für die Produktvariantenauswahl ist.

Treffen einer Entscheidung
Für die Produktvariantenauswahl wurden zuerst die Nachbarn der neuen Produktvariante (NPV) identifiziert (Bild 3a). Hierfür wurde nur der Abstand der Nachbarlösungen betrachtet. Diese Analyse ergab, dass die Produktvarianten PV07, PV12 und PV13 den geringsten Abstand zu der neuen Produktvariante (NPV) haben. Als Nächstes wurde die Karte geclustert, um zu überprüfen, welche Produktvarianten dem gleichen Cluster wie

demjenigen des neuen Auftrages zugeordnet werden können. Das Ergebnis kann Bild 3b entnommen werden. In einem gemeinsamen Workshop erfolgten eine Auswertung der Ergebnisse und die Erstellung einer Rangliste für die Überprüfung der Produktvarianten. Dabei wurde entschieden, das Clusterergebnis höher zu gewichten als die linearen Abstände auf der Karte. Für eine endgültige Absicherung dieses Ergebnisses wurden die Anforderungsmerkmale, die sich erfahrungsgemäß als wichtige Größen herausgestellt haben, visualisiert, um hieraus Erkenntnisse für die endgültige Auswahl der Produktvarianten zu treffen. Diese Vorgehensweise soll exemplarisch anhand der drei Merkmale „Zerreißfestigkeit-Z", „Gesamtgewicht" und „Gesamtbreite" veranschaulicht werden. Die Visualisierung dieser Merkmale kann Bild 4 entnommen werden.

Aus der Visualisierung des Merkmals „Zerreißfestigkeit -Z" kann abgeleitet werden, dass die Produktvarianten 12 und 13 sehr ähnliche Werte (ähnliche Farbbereiche) zum neuen Auftrag aufweisen und somit diese vor den anderen beiden Produktvarianten ausgewählt werden müssen. Der Vergleich mit dem Merkmal „Gesamtgewicht" verdeutlicht jedoch, dass das Gewicht der Variante PV13 sehr viel höher ist als bei der neuen Produktvariante. Die Varianten PV07 und PV06 haben ein ähnliches bzw. geringeres Gewicht als gefordert.

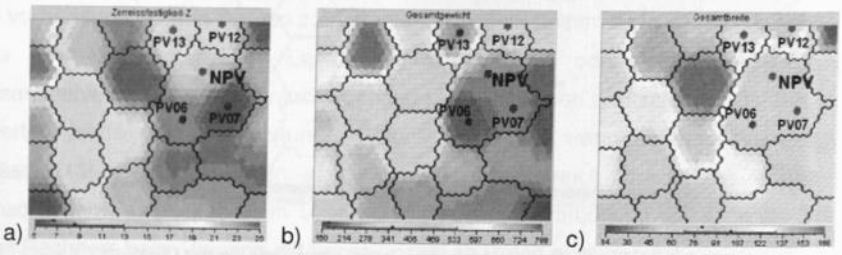


Bild 4: (a) Zerreißfestigkeit in Z-Richtung, (b) Gesamtgewicht, (c) Gesamtbreite

Wird die Gesamtbreite betrachtet, dann werden ebenfalls die Varianten PV06 und PV07 bevorzugt. Wenn z.B. aufgrund des Bauraums kein größeres Verriegelungssystem eingebaut werden kann, eine höhere Zerreißfestigkeit als Festforderung vorgegeben wird und keine der anderen Größen als genauso wichtig betrachtet wird, kann keine der zuerst identifizierten Produktvarianten verwendet werden. In diesem Fall würde man die Produktvarianten auswählen, die diese Forderungen erfüllen. So werden z.B. die im oberen linken Bereich befindlichen Produktvarianten näher untersucht werden.

Im aktuellen Projekt wurde nach der Analyse der wichtigen Merkmale die Variante PV06 als die erfolgversprechendste angesehen, gefolgt von den Varianten PV07, PV012 und

PV13. Für das Festlegen der Rangfolge wurden zusätzlich die Messwerte aus den Prüfversuchen zu den Produktvarianten angeschaut. Dabei stellte sich heraus, dass in den meisten Fällen eine Übererfüllung der Anforderungen durch die Produktvarianten gegeben war. Aus dieser Erkenntnis wurde die Produktvariante PV06 als Entwicklungsgrundlage für den neuen Auftrag gewählt.

Betrachtet man die Faktoren, die für das Treffen dieser Entscheidung in Erwägung gezogen wurden, dann wird deutlich, dass eine eindeutige und somit automatische Entscheidung nicht möglich ist. Der menschliche Verstand ist in der Lage auf unvorhergesehene Hindernisse angemessen zu reagieren und in dem Produktauswahlprozess können nicht alle Problemfälle a priori identifiziert werden. Deshalb muss der Mensch als Entscheidungsträger alle ihm zur Verfügung stehenden Informationen auswerten und aufbauend auf diesen Erkenntnissen seine Entscheidung fällen. Das Ziel ist es, diese Informationen in einer für den Konstrukteur verständlichen Form aufzubereiten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Eine wichtige Erkenntnis der Arbeit ist die optimale Aufgabenverteilung zwischen Menschen und DV-Systemen im Hinblick auf eine Entscheidungsfindung im konstruktiven Umfeld. Die Aufgabenbereiche, in denen heute rechnerbasierte Lösungen in Form von Expertensystemen angewendet werden, sollten nach möglichen Optimierungsmöglichkeiten analysiert werden. Zudem sollten weitere Einsatzgebiete analysiert werden, in denen der Mensch mit seinen Fähigkeiten an seine Grenzen stößt und auf die Hilfe der Rechner angewiesen ist. Für das Anwenden von Data-Mining-Methoden ist die Grundvoraussetzung dafür, dass genügend Daten vorhanden sind. Bei vielen Problemstellungen sind selbst in der frühen Phase der Produktentwicklung viele Daten aus der Vergangenheit vorhanden, die eine neue Entwicklung entscheidend beeinflussen können. Zudem stehen durch die virtuelle Produktentwicklung heutzutage viele Daten bereits zu einem sehr frühen Stadium der Produktentwicklung zur Verfügung.

Eine allgemein wichtige Erkenntnis dieser Arbeit ist die Widerlegung der oft vertretenen Meinung, dass Data-Mining-Methoden in der frühen Phase der Produktentwicklung nicht angewendet werden können, da zu diesem Zeitpunkt nicht ausreichend Daten vorhanden sind. Diese Meinungen resultieren aus der Tatsache, dass bei der Entwicklung einer neuen Methode im konstruktionsmethodischen Umfeld, diese, wie die klassische

Konstruktionsmethodik es seit Jahrzehnten versucht, mit einer klassischen Neukonstruktion in Verbindung gebracht wird. Eine richtige Fokussierung der Aufgaben- bzw. Fragestellungen im konstruktiven Umfeld zeigt jedoch die Möglichkeiten auf, wie ausreichend Daten generiert und diese mithilfe von Data-Mining-Methoden zielgerichtet im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden können.

Literatur

[1] Winter Ulrike: *"Krise dauert bis 2010"*. Automobil Industrie. http://www.rp-online.de/wirtschaft/news/Krise-dauert-bis-2010_aid_639188.html. 16/11/2008. Abgerufen am: 17/12/2009.

[2] Bruns, Kai; Meyer-Wegener, Klaus. *Taschenbuch der Medieninformatik*. München. Carl Hanser,2005 -ISBN 3446402993.

[3] Giudici, Paolo. *Applied data mining*. Chichester. Wiley,2003 -ISBN 0470846798.

[4] Kurbel, Karl. *Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen*. 2., verb. Aufl. Berlin. Springer,1992 -ISBN 3540552375.

[5] Lossack, Ralf-Stefan. Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion. Berlin. Springer,2006 -ISBN 9783540296379.

[6] Ong, S K; Xu, Q L; Nee, Andrew Y. C. *Design reuse in product development modeling, analysis and optimization*. Singapore. World Scientific,2008 -ISBN 9789812832627.

[7] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich. *Konstruktionslehre*. 6. Aufl. Berlin. Springer,2005 -ISBN 3540220488.

[8] Pischon, Alexander; Liesegang, Dietfried G. *Integrierte Managementsysteme für Qualität, Umweltschutz und Arbeitssicherheit*. Berlin. Springer,1999 -ISBN 3540654070.

[9] Rao, R. *Decision Making in the Manufacturing Environment*. Berlin, Heidelberg. Springer,2007 -ISBN 9781846288197.

[10] Rosenkranz, Friedrich; Missler-Behr, Magdalena. *Unternehmensrisiken erkennen und managen*. Berlin. Springer,2005 -ISBN 9783540245070.

[11] Roth, Karlheinz. *Konstruktionslehre*. 3. Aufl., erw. und neu gestaltet. Berlin. Springer,2000 -ISBN 9783540671428.

[12] Runkler, Thomas A. *Data-Mining*. 1. Aufl. Wiesbaden. Vieweg + Teubner,2010 -ISBN 9783834808585.

[13] Schmidt, Günther. *Informationsmanagement*. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin. Springer,1999 -ISBN 3540663614.

Simulation von Beveloidrädern unter Last mithilfe der FEM

Matthias Beck, Matthias Bachmann, Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, IKTD
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
E-Mail: matthias.beck@iktd.uni-stuttgart.de; Internet: http://www.iktd.uni-stuttgart.de/

Inhalt: *Numerische Zahnrad-Berechnungsprogramme können derzeit keine Analysen von Beveloidrädern wegen ihrer Achslage und Geometrie unter Last durchführen. Daher wurde der am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) entwickelte Geometriegenerator für Beveloidräder um eine Schnittstelle zu dem FEM Programm Ansys erweitert. Damit können nun vollautomatisiert zweidimensionale wie auch dreidimensionale Tragfähigkeitsrechnungen für Beveloidräder durchgeführt werden.*

Abstract: *Numerical programs cannot simulate beveloid gears with loads because of the geometry and the axis position. Therefore, a data interface for the beveloid geometry generator was developed for communication with the FEM program Ansys. Now a fully automatic performance of a 2D as well as a 3D load capacity calculation of beveloid gears is possible.*

Stichwörter: *Beveloidrad, konisches Stirnrad, FEM, Tragfähigkeitsrechnung*

Keywords: *beveloid gear, conical spur gear, FEM, load capacity*

1 Einleitung

Beveloidräder sind konische Stirnräder mit evolventischen Stirnschnitten, weshalb sie einen allgemeineren Fall der üblichen Zylinderräder darstellen. Im Gegensatz zu diesen besitzen sie eine linear über der Zahnbreite veränderliche Profilverschiebung. Damit ergibt sich eine konische Mantelfläche, weshalb man mit Beveloidrädern eine parallele, kreuzende oder windschiefe Achslage erreichen kann. Durch eine axiale Verschiebung ist zudem eine Spieleinstellung möglich.

Der technisch interessanteste Einsatz von Beveloidrädern ergibt sich mit einer kreuzenden Achslage, beispielsweise in der Getriebeausgangsverzweigung von KFZ. Der Achswinkel liegt im Bereich von 0° bis etwa 15°. Größere Werte sind durch die geometrischen Einschränkungen der Zahnradbreite aufgrund der Spitzgrenze und des Unterschnitts kaum möglich. Damit stellen Beveloidräder ein Bindeglied zwischen dem Einsatz von Stirnrädern auf der einen Seite und Kegelrädern auf der anderen Seite dar.

2 Motivation

Obwohl Beveloidräder evolventische Stirnschnitte aufweisen, wälzen diese bei nicht paralleler Achslage nicht aufeinander ab, sondern stehen um den Achswinkel gekippt zueinander. Durch die Flankenform, Achslageabweichungen und gewollte oder ungewollte Flankenmodifikationen entsteht im Kontakt Punktberührung, wodurch die Flankenpressung sowie die Geräuschanregung stark ansteigen.

Ein weiterer kritischer Punkt ist bei Schrägverzahnung die sich ergebende asymmetrische Zahnform im Stirnschnitt. Aufgrund der Herstellung mit zahnstangenartigen Werkzeugen entstehen für Flanke und Rückflanke unterschiedliche Eingriffswinkel, wodurch sich für beide Flanken leicht unterschiedliche Makrogeometrien ergeben [5]. Zudem sind über der Zahnbreite beim Abwälzen Stirnschnitte mit unterschiedlicher Profilverschiebung im Eingriff. Dies alles widerspricht den Annahmen der analytischen Stirnradberechnung, beispielsweise nach DIN 3990 [4], weshalb die Anwendung auf Beveloidräder kritisch zu hinterfragen ist.

3 Stand der Technik zur Simulation von Beveloidrädern

Die bei Zylinderrädern gängigen Berechnungsprogramme können wegen des Achswinkels und der Geometrie einer Beveloidradpaarung das Abwälzen unter Last nicht korrekt nachbilden.

Von der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München wurden zur Zahnradauslegung die Programme "STplus" und "RIKOR" entwickelt, letzteres bestimmt mit FE-Einflusszahlen die Tragfähigkeit von Stirnrädern. Damit ist es allerdings nicht möglich, Beveloidräder abzubilden.

Durch Röthlingshofer [8] wurde eine Zahnkontaktanalyse unter Last für eine Beveloidverzahnung durchgeführt. Die Geometrie der Verzahnung erzeugte er dabei durch eine numerische Fertigungssimulation nach dem Hüllschnittverfahren. Mithilfe der FE-Struktur konnten so Verschiebungseinflusszahlen bestimmt und an das Programm "ZaKo3D" zur Tragbildberechnung übergeben werden.

Im Rahmen der Forschungsvereinigung Antriebstechnik wird derzeit ein allgemeiner Zahnradflankengenerator entwickelt, welcher zur Erzeugung von Beveloidflanken geeignet ist und langfristig an einen Berechnungskern zur Tragbildberechnung angeschlossen

werden soll. Da bislang nur die Evolvente berücksichtigt wird, eignet sich diese Geometrie nicht für Tragfähigkeitsrechnungen [2].

Die Beveloid-Flankentopographie besitzt Ähnlichkeiten mit der von Kegelrädern, die über der Breite ebenfalls eine variable Zahnform aufweisen. Im Bereich der Kegelrad-auslegungsprogramme ist "Becal" vom Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der TU Dresden weit verbreitet. Es ist in der Lage, die Kegelradflanken durch Freiformflächen zu approximieren und unter Berücksichtigung des Achswinkels, lastbehaftet aufeinander abzuwälzen. Allerdings besteht keine Möglichkeit, die Zahngeometrie von Beveloidrädern in Becal zu importieren [6]. Im Bereich der kommerziellen Programme ist ebenfalls keine Möglichkeit zur Simulation von Beveloidrädern unter Last verfügbar, z. B. [3].

Zur lastfreien Optimierung von Beveloidrädern wurde am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design der Universität Stuttgart das Programm "SimKoS" entwickelt. Es bietet die Möglichkeit, die Geometrie von Beveloidrädern analytisch zu generieren, lastfrei zu untersuchen und so das Tragbild und den Drehfehler zu optimieren. Daher wurde SimKoS um eine Datenübergabe an ein FE-Programm erweitert, um lastbehaftete FE-Simulationen durchführen zu können.

4 Modellerzeugung

4.1 Geometrie

Zur Geometrieerzeugung von Beveloidrädern wird in SimKoS ein auf analytischen Gleichungen aufbauender Flankengenerator verwendet. Ein Stirnschnitt wird dabei in die Bereiche evolventische Flanke, Kopfkurve, Fußkurve sowie Fußkreis unterteilt. Durch die Allgemeingültigkeit der analytischen Berechnungsvorschriften können sowohl Stirnräder als auch Beveloidräder erzeugt werden, jeweils gerad- oder schrägverzahnt. Auf die ideale Zahnflanke können zusätzlich Profil-, Breiten- und topologische Flankenmodifikationen aufgebracht werden. Die Korrektheit der erzeugten Zahnradgeometrie wurde in vorangegangenen Arbeiten anhand von Messungen an realen Rädern und durch den Vergleich mit einer Herstellsimulation nach dem Hüllschnittverfahren gezeigt [7]. Durch die Wahl der Anzahl von Punkten in Zahnhöhen- und Zahnbreitenrichtung kann eine diskrete Punktewolke der Flankengeometrie erzeugt werden.

4.2 Preprocessing

Ausgehend von der Punktewolke wird ein Zahnradsegment in dem FE-Berechnungsprogramm "Ansys" mithilfe der dort vorhandenen Skript-Sprache "APDL" erzeugt. Durch Spline-Interpolationen werden die Punkte zu Linien und weiter zu Volumina verbunden. Eine evtl. auftretende Ungenauigkeit der Geometrieinterpolation wird dadurch vermieden, dass zum einen eine große Anzahl an Punkten importiert, zum anderen beim Vernetzen sichergestellt wird, dass die FE-Knoten auf den Interpolationspunkten liegen. Die Abweichungen betragen weniger als 10^{-4} mm. Der Zeitbedarf für das gesamte Preprocessing bis zum fertigen FE-Modell ist geringer als 30 Sekunden.

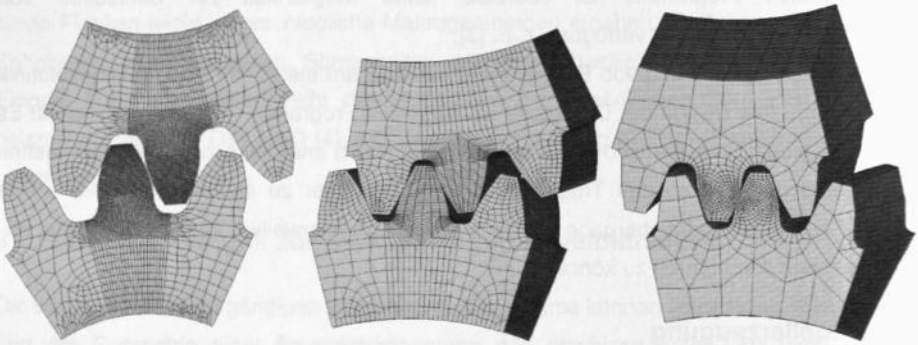


Bild 1: Verzahnungsbeispiele v.l.n.r.: Gerad-, Schräg-, Beveloidverzahung

Ein Zahnsegment besteht aus drei Zähnen. Bei der Berechnung des Einzeleingriffs wird der mittlere Zahn feiner vernetzt, die beiden äußeren dienen zur Abbildung der Nachbarzahnsteifigkeit. Der Radkörper wird als Hohlzylinder mit einer Wandstärke von ca. zweimal Modul erstellt. Das in Bild 1 dargestellte obere Rad erfährt die tangentiale Krafteinleitung in einstellbarer Größe am Innendurchmesser. Alle anderen Bewegungen sind durch Einspannungen verhindert. Die Vernetzung der Zahnsegmente erfolgt automatisch und kann in weiten Grenzen festgelegt werden. Die optimalen Unterteilungen liegen für zweidimensionale Rechnungen bei 50 Elementen auf der Profillinie, für dreidimensionale jeweils für Profil- und Flankenlinie bei 25. Möglich sind aber Auflösungen von bis zu 200 x 200 Elementen.

5 Ergebnisse

5.1 Solving

Ein Abwälzvorgang kann mit einer beliebigen Anzahl an Wälzstellungen berechnet werden, 20 Schritte bilden hierbei das Optimum aus Zeitaufwand und Ergebnisgüte. Die Steuerungsskripte sorgen dabei für einen automatisierten Ablauf der Rechnung sowie Zwischenspeicherung der Ergebnisse. Dies können unter anderem die Hertz'sche Flankenpressung und –abplattung, Flankenabstände zur Tragbilderzeugung, Zahnfußspannung, Zahnverformung etc. sein.

5.2 Postprocessing

Neben den bekannten Auswertemöglichkeiten des FE-Programms können die Ergebnisse mithilfe von Makros automatisiert ausgelesen und weiter verarbeitet werden. In Bild 2 rechts ist beispielhaft die theoretische Zahnfedersteifigkeit c'_{th} dargestellt.

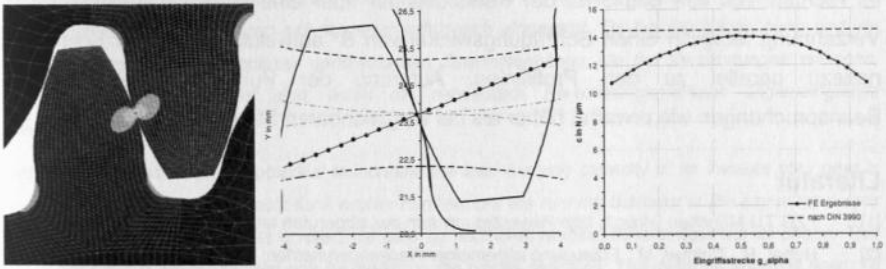


Bild 2: Stirnradverzahnung, numerische Berechnung, analytischer Abgleich und Steifigkeitsverlauf

Bei Stirnrädern ergab der Vergleich mit den analytischen Berechnungen nach DIN 3990 [4] für die Flankenpressung und Zahnfußspannung von Stirnrädern eine Abweichung von wenigen Prozent. Die über die einzelnen Wälzstellungen in Bild 2 gezogene Eingriffsstrecke ist zudem deckungsgleich mit den theoretischen Erwartungen.

6 Beispielhafte Anwendung für eine Beveloidradstufe

Die geschaffenen Programmroutinen wurden dazu verwendet, eine Beveloid-Getriebestufe unter Last zu berechnen. In Bild 3 links ist beispielhaft die Berührellipse der Beveloidverzahnung dargestellt. Gut ist die für diese Verzahnung typische Punktberührung

zu erkennen. Zudem hat die axiale Position der Beveloidräder einen großen Einfluss auf das Tragbild, weshalb der Berührpunkt im Berechnungsbeispiel zur Zehe hin wandert. An der Ferse ergibt sich deutliches Klaffen der Verzahnung.

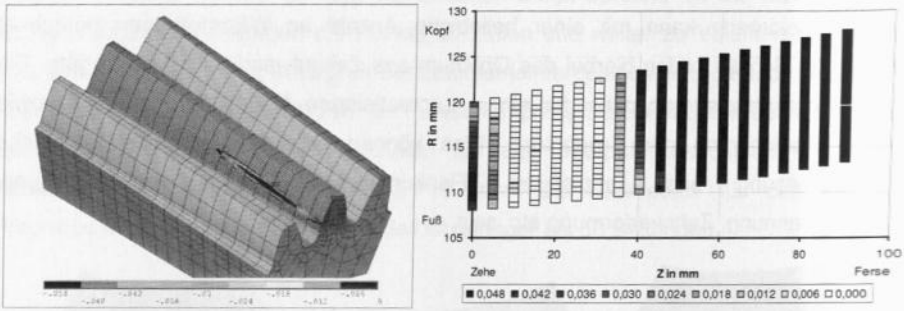


Bild 3: links: Berührellipse der Verzahnung in einer Wälzstellung, recht: Klaffmaß in mm bzw. Kontaktverlauf während des Abwälzens

Im rechten Teil von Bild 3 ist der Kontaktverlauf über eine Flanke dargestellt. Da die Verzahnung lediglich einen Schrägungswinkel von 6° aufweist, verläuft der Kontaktpfad nahezu parallel zu den Profillinien. Aufgrund der Punktberührung liegen die Beanspruchungen wie erwartet höher als bei vergleichbaren Stirnradpaarungen.

Literatur

[1] FZG TU München (Hrsg.): *http://www.fzg.mw.tum.de/*, abgerufen am 29.06.2010

[2] Huber, P., Zimmer, M.: *Erzeugung allgemeiner Flankengeometrien*, FVA Sachstandsbericht, Projekt 604 Flankengenerator, Garching 2010

[3] KissSoft (Hrsg.): *Nachrechnung Stirnradpaar*, Firmenschrift, Hombrechtikon 2010

[4] Norm DIN 3990 12.1987. Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern

[5] Roth, K.: Zahnradtechnik - Evolventen-Sonderverzahnungen zur Getriebeverbesserung. Springer Verlag Berlin, 1998

6] Schäfer, S.: Berechnung der Zahnfuß-, Grübchen- und Fresstragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidverzahnungen in BECAL, FVA Sachstandsbericht, Projekt 223/IX Tragfähigkeitsnachweis in BECAL, Dresden 2010

[7] Traut, C.: *Analyse der Stirnschnittgeometrie von konischen Zahnrädern.* Unveröffentlichte Diplomarbeit Universität Stuttgart, 2009

[8] WZL RWTH Aachen (Veranst.): Innovationen rund ums Kegelrad: Röthlingshöfer, T.: *Simulationsmethoden von Beveloidverzahnungen*; RWTH Aachen, 2010

Verwendung der FE-basierten Zahnkontaktanalyse zur Analyse asymmetrischer Verzahnungen

Christian Brecher, Christof Gorgels, Jan Ingeli

WZL, RWTH Aachen University
Steinbachstraße 19, D-52074 Aachen
E-Mail: j.ingeli@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *In diesem Bericht wird das Potenzial von schrägverzahnten, asymmetrischen Stirnradverzahnungen zur Steigerung der Tragfähigkeit aufgezeigt. Darüber hinaus wird die, aus einer symmetrischen Referenzverzahnung entwickelte asymmetrische Verzahnung dahingehend modifiziert, dass sich das Anregungsverhalten der asymmetrischen Verzahnung nicht wesentlich gegenüber dem der symmetrischen Variante verschlechtert. Bei der Berechnung der asymmetrischen Verzahnung wird ausschließlich auf die Variation der Makrogeometrie eingegangen. Die verwendeten mikrogeometrischen Größen bleiben konstant. Zur Berechnung der Belastungs- und Anregungskenngrößen kommt eine FE-basierte Zahnkontaktanalyse zum Einsatz, die im Rahmen des Berichts erläutert wird. Diese Berechnungsmethode wird zur Auslegung von symmetrischen Verzahnungen seit längerem erfolgreich eingesetzt. Da bei der Berechnung und vor allem Bewertung der sehr komplexen geometrischen Zusammenhänge, die bei Verzahnungen vorliegen, spezielle Kenngrößen definiert sind, liefert die verwendete Berechnungsmethode allgemeingültige Bewertungsgrößen.*

Abstract: *Within this report the potential to increase the load carrying capacity of an involute spur gear is shown by using an asymmetric tooth flank profile. Furthermore the running behavior of the asymmetric spur gear fits the values of the symmetric reference gear by additional modifications concerning its shape. This aims of optimisation will be reached only by modifying the macro geometry. The micro geometry is fixed. To evaluate the typical values which describe the load carrying capacity of gears a FE-based tooth contact analysis is presented. Beside the calculation of symmetric gears the usability to calculate asymmetric gears is shown. To compare the load carrying capacity of the symmetric and the asymmetric gears the FE-based tooth contact analysis allows to calculate parameters to quantify the enhancement of durability by considering the complex contact behavior of spur gears.*

Stichwörter: *Asymmetrische Verzahnungen, Tragfähigkeit, Laufverhalten, Zahnkontaktanalyse*

Keywords: *Asymmetric Gears, Load Carrying Capacity, Running Behavior, Tooth Contact Analysis*

1 Einleitung

Die steigende Leistungsdichte heutiger Antriebssysteme stellt die bei der Übertragung von Kräften und Momenten beteiligten Komponenten vor immer größere Herausforderungen. Ein zentrales Bauteil ist hierbei die Verzahnung. Neben Anforderungen hoher

Tragfähigkeit von Zahnflanke und Zahnfuß, müssen zunehmend Aspekte wie geringes Anregungsverhalten und Leichtbau berücksichtigt werden. Zudem wird von dem Entwicklungsingenieur gefordert, diese sich meist gegenseitig beeinflussenden Anforderungen in immer kürzerer Zeit in innovativen Produkten zu vereinen. Eine solche Innovation stellt die asymmetrische Verzahnung bei Stirnrädern dar. Asymmetrische Verzahnungen können überall dort eingesetzt werden wo eine Vorzugsdrehrichtung vorliegt. Als Beispiele sind hierbei PKW-, WEA- und Hebekrangetriebe zu nennen. Die asymmetrische Verzahnung wird dadurch charakterisiert, dass auf Zug- und Druckflanke unterschiedliche Eingriffswinkel vorliegen.

Gängige Auslegungsrichtlinien für Stirnradverzahnungen sind in den Normen der DIN3990/ISO6336 hinterlegt. Sonderverzahnungen wie die asymmetrischen Verzahnungen werden darin allerdings nicht berücksichtigt. Daher müssen zur Unterstützung des Auslegungsprozesses allgemeinere Berechnungsverfahren benutzt werden.

Am WZL der RWTH Aachen wurde eine FE-basierte Berechnungsmethode entwickelt und vor allem in der Automobilindustrie, einem Vorreiter bei der Entwicklung innovativer Produkte, schon seit Jahren mit Erfolg angewendet, [1]. Die Erweiterung der auf den Zahnkontakt spezialisierten Methode zur Berechnung asymmetrischer Verzahnungen liefert nun die Möglichkeit die auftretenden Belastungen dieser Sonderverzahnungen zu berechnen. Erste Beispielrechnungen zeigen ein großes Potential der asymmetrischen Verzahnungen, das Lauf- und Tragfähigkeitsverhalten entscheidend zu steigern und somit die Leistungsdichte zu erhöhen.

2 Vorteile asymmetrischer Verzahnungen

Das Lauf- und Tragfähigkeitsverhalten von Stirnrädern wird entscheidend durch die anwendungsgerechte Auslegung der Makrogeometrie beeinflusst. Durch unterschiedliche Eingriffswinkel von Zug- und Druckflanke können Eigenschaften der Verzahnungen erzielt werden, die gegenüber symmetrisch gestalteten Zahnprofilen mit gleichen Eingriffswinkeln ein großes Potential zur Steigerung der Belastbarkeit und Laufruhe haben, [2], [3]. Asymmetrische Verzahnungen werden heutzutage für Spezialanwendungen im Bereich Stirnradverzahnungen verwendet. Bei Kegelradgetrieben wird die Lastflanke schon seit Jahren für den entsprechenden Anwendungsfall optimiert. Durch die gezielte Erhöhung des Eingriffswinkels der Zugseite werden die auf dieser Seite auftretenden

Zahnfußspannungen und Hertz'schen Pressungen reduziert. Nachteilig wirkt sich der vergrößerte Eingriffswinkel auf die Profilüberdeckung und die Zahnkopfdicke aus. Durch die Verkleinerung des Eingriffswinkels der Gegenflanke kann die Zahnkopfdicke wiederum vergrößert werden und die Profilüberdeckung durch eine Erhöhung der Zahnhöhe angepasst werden, **Bild 4.**

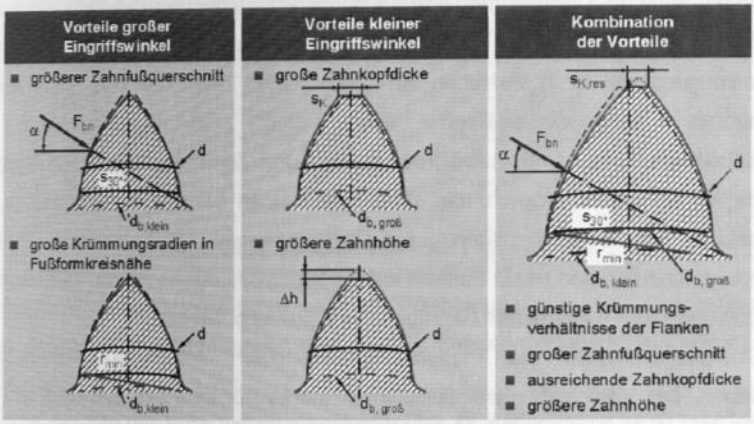


Bild 4: Vorteile asymmetrischer Eingriffswinkel

Die Zahnkopfdicke darf ein minimales Maß nicht unterschreiten, da bei der Verwendung von Einsatzstahl und der im Fertigungsprozess durchgeführten Wärmebehandlung ansonsten eine Versprödung des Zahnkopfes die Tragfähigkeit herabsetzen würde. Die Überdeckung beschreibt wie viele Zähne sich gleichzeitig im Kontakt befinden. Große Überdeckungen wirken sich positiv auf das Lauf– und Tragfähigkeitsverhalten der Verzahnungen aus, da bei mehreren im Kontakt befindlichen Zähnen die Steifigkeitssprünge über einzelne Wälzstellungen geringer werden. Durch große Überdeckungen können sich die Lasten, die auf die Verzahnung wirken auf mehrere Zähne verteilen. Daher ist bei der Auslegung von asymmetrischen Verzahnungen darauf zu achten, dass die Herabsetzung der Überdeckung durch vergrößerte Eingriffswinkel auf der Zugseite mit einer Vergrößerung der Zahnhöhe verhindert wird. Dabei ist eine minimale Zahnkopfdicke sowie ein minimales Zahnkopfspiel einzuhalten.

3 FE-basierte Zahnkontaktanalyse für Stirnradverzahnungen

Die Berechnungsmethode der FE-basierten Zahnkontaktanalyse ist in verschiedene Programmbausteine aufgeteilt, die von der Geometrieerzeugung über die automatisierte Vernetzung und anschließende Steifigkeitsberechnung bis hin zur Berechnung der Belastungen auch die Durchführung von Variationsrechnungen der Zahnflankentopografie ermöglicht. Zur Beurteilung des Anregungsverhaltens wird der Drehfehler (Übersetzungsschwankung) zwischen An- und Abtrieb betrachtet, die sich aus den wechselnden Steifigkeitsverläufen über dem Zahneingriff sowie aus Topografieabweichungen und –korrekturen ergibt. Durch den sehr allgemeinen Ansatz der Methode ist es zudem möglich, die Wechselwirkungen benachbarter Zähne auf den Zahnkontakt zu berücksichtigen. Außerdem können fast beliebig geformte Radkörpergeometrien und deren Einfluss auf die Steifigkeitseigenschaften im Zahnkontakt berechnet und somit Aspekte des Leichtbaus berücksichtigt werden.

Das Steifigkeitsverhalten der Verzahnung wird durch Verschiebungseinflusszahlen beschrieben. Die Verschiebungseinflusszahlen werden für jede Wälzstellung, an jedem Berührpunkt und für verschiedene Lastfälle berechnet. Dazu werden zunächst die FE-Struktur der Verzahnung und zusätzlich die Lage der einzelnen Berührpunkte ermittelt. Da die Berührpunkte nur in den geringsten Fällen mit den FE-Knoten, die eine Belastung aufnehmen können übereinstimmen, werden die einzelnen Berührpunktkräfte auf die umliegenden FE-Knoten verteilt und mit Einheitskräften belastet.

Nachdem die Steifigkeitscharakteristik der Verzahnungen in der FE-Berechnung durch die Verschiebungseinflusszahlen bestimmt wurde, kann anschließend mit den anliegenden Belastungen und den aus der Oberflächentopografie der Verzahnung resultierenden Kontaktabständen, die sich über die einzelnen Wälzstellungen ändern, das Mathematische Federmodell nach Neupert [4] aufgestellt werden, **Bild 5**. Die Beanspruchung eines einzelnen Zahnes ist im Wesentlichen von der Kraftaufteilung auf die an der Kraftübertragung beteiligten Zähne sowie von der Kraftverteilung entlang der Berührlinie der einzelnen Zahnpaare abhängig.

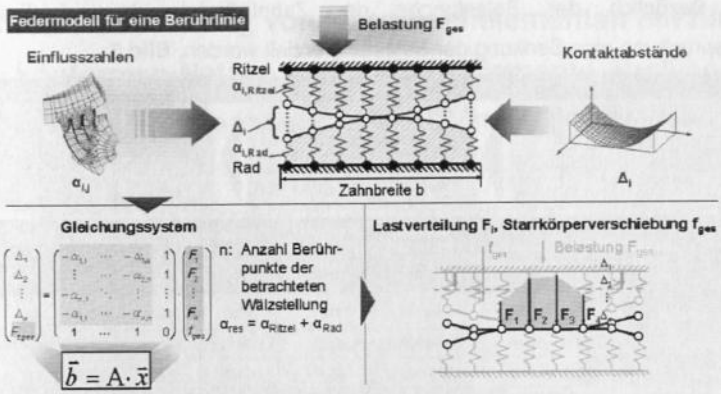


Bild 5: Mathematisches Federmodell nach Neupert

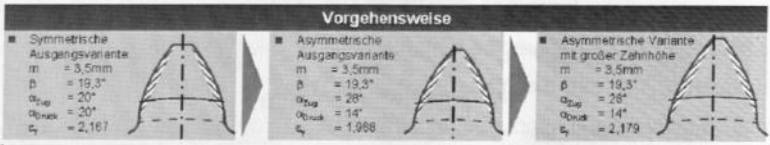
Das dargestellte Gleichungssystem stellt die Verbindung zwischen den anliegenden Kräften, den örtlichen Verformungen und den aus den Kontaktabständen resultierenden Verformungen her, [5].

Durch Verwendung der Verschiebungseinflusszahlen im Federmodell ist es möglich, nach einmaliger Berechnung der Verschiebungseinflusszahlen unterschiedlichste Topografiekorrekturen als Kontaktabstände vorzugeben. Dadurch wird die Berechnungszeit erheblich verkürzt.

4 Ergebnisse der Zahnkontaktanalyse

Die vorgestellte Berechnungsmethode eignet sich neben der Berechnung von symmetrischen Verzahnungen auf Grund ihrer sehr allgemeinen Definition hervorragend für die Berechnung von asymmetrischen Verzahnungen. Hierzu wurde eine symmetrische Schrägverzahnung als Referenzvariante gewählt und im ersten Schritt durch Variation der Eingriffswinkel von Vor- und Rückflanke auf hohe Tragfähigkeit ausgelegt. Dabei wurde eine Verringerung der Hertz'schen Flankenpressung angestrebt. Die Verringerung der Gesamtüberdeckung wurde durch eine Vergrößerung der Zahnhöhe ausgeglichen, so dass die Gesamtüberdeckung der asymmetrischen Zielvariante gesteigert werden konnte. Hierdurch konnte der maximale Summendrehfehler, der ein Maß für die Bewegungsungleichförmigkeit von Rad und Ritzel ist und somit das Anregungsverhalten der Verzahnung darstellt, bezogen auf die asymmetrische Ausgangsvariante, gesenkt

werden. Bezüglich der Belastungen der Zahnfüße konnte auf Seiten der Zugbeanspruchung eine Senkung der Belastung erzielt werden, **Bild 6**.



Varianten T = 500 Nm	Gesamt-überdeckung	Maximale Hertz'sche Pressung [N/mm²]	Maximaler Summen-drehfehler [µm]	Rad 1 [N/mm²]		Rad 2 [N/mm²]	
				σ_{F1Zug}	$\sigma_{F1Druck}$	σ_{F2Zug}	$\sigma_{F2Druck}$
V1: α_{Zug}=20°/α_{Druck}=20°	2,167	1424,33	37,07	297,82	-352,04	286,25	-339,12
V2: α_{Zug}=28°/α_{Druck}=14°	1,968	1402,38	40,85	294,96	-409,15	288,30	-399,53
V3: α_{Zug}=28°/α_{Druck}=14°	2,179	1273,10	38,61	286,62	-399,75	283,46	-387,19
Prozentuale Abweichungen zur symmetrischen Referenzvariante *V1* mit α_{Zug}=20°/α_{Druck}=20°							
V2: α_{Zug}=28°/α_{Druck}=14°	-9,18%	-1,54%	+10,20%	-0,96%	+16,22%	+0,72%	+17,81%
V3: α_{Zug}=28°/α_{Druck}=14°	+0,55%	-10,62%	+4,15%	-3,91%	+10,71%	-0,98%	+14,17%

Bild 6: Tragfähigkeitssteigerung durch asymmetrisches Ausführen einer symmetrischen Verzahnung

Die dargestellte Berechnungsmethode ist derzeit das umfangreichste Berechnungstool, welches zur automatisierten Berechnung von Stirnradverzahnungen basierend auf der FE-Methode zur Verfügung steht. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass asymmetrische Schrägverzahnungen ein großes Potenzial zur Steigerung der Tragfähigkeit besitzen, welches nicht zwangsläufig mit einer Steigerung des Anregungsverhaltens einhergehen muss.

Literatur

[1] Brecher, C.: FE-Stirnradkette v3.2 – Benutzeranleitung zum Programm. FVA-Forschungsvorhaben Nr. 127, Heft 723, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt a.M., 2007

[2] Niemann, G.; Winter H.: In: Maschinenelemente, Band 3, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag,1986

[3] Deng, G.; Nakanishi, T.: Enhancement of Bending Load Capacity of Gears Using an Asymmetric Involute Profile, In: GDS-17, The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, Fukuoka, 2001

[4] Neupert, B.: Berechnung der Zahnkräfte, Pressungen und Spannungen von Stirn- und Kegelradgetrieben, Dissertation RWTH Aachen, 1983

[5] Cao, J.: Anforderungs- und fertigungsgerechte Auslegung von Stirnradverzahnungen durch Zahnkontaktanalyse mit Hilfe der FEM, Dissertation RWTH Aachen, 2002

Kontaktberechnung von Maschinenelementen mit nicht konformen Netzen in der Finite Elemente Analyse

Florian Nützel, Martin Neidnicht, Bernd Roith, Christoph Wehmann, Frank Rieg

Universität Bayreuth

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth

Email: Florian.Nuetzel@uni-bayreuth.de

Internet: http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Die Berechnung verschiedener zu Baugruppen verknüpfter oder in Wechselwirkung stehender Bauteile ist sehr komplex. Dadurch wird der Einsatz der Finite Elemente Analyse erforderlich. Am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD wird deshalb ein vollkommen finite Elemente basiertes Kontaktberechnungsmodul entwickelt, welches diese Anforderungen erfüllt. Der vorliegende Beitrag behandelt die Diskretisierung und Berechnung von in Kontakt stehenden Stirnrädern bei geringer Verformung. Die Formulierung der Kontaktrandbedingungen erfolgt mit Hilfe zweier Verfahren basierend auf der Lagrange- Multiplikatorregel.*

Abstract: *The calculation of different components connected to an assembly or interacting with each other is very difficult. For this reason the application of the finite element analysis is required. Based on this fact a module for finite element contact problems is developed at the department of Engineering Design and CAD. The presented article describes the discretisation and calculation of small deformated, interacting spur wheels. The contact constraints are formulated with two different methods based on Lagrange multipliers.*

Stichwörter: *Finite Elemente Analyse, Kontakt, Stirnrad, Lagrange-Multiplikatorregel.*

Keywords: *Finite Element Analysis, contact, spur wheel, Lagrange Multiplier Method.*

1 Einleitung

Die Finite Elemente Analyse (FEA) ist ein Standardwerkzeug in der Produkt- und Prozessentwicklung bei der Berechnung von Fragestellungen über die analytischen Lösungsverfahren hinaus. Viele Kenntnisse prozess- und produktrelevanter Einflussgrößen können im Vorfeld simuliert und für die Abschätzung kritischer Designparameter gewonnen werden.

In der Simulation von Prozessen und Strukturen treten häufig Wechselwirkungen zwischen den Oberflächen verschiedener Körper auf. Hierzu zählen die Berechnung ganzer Baugruppen oder lokale Netzverfeinerungen in bereits diskretisierten Strukturen zur Steigerung der Abbildungsgenauigkeit.

Kontaktprobleme lassen sich in folgende Punkte gliedern: Die Kontaktsuche zwischen den diskretisierten Kontaktflächen der beteiligten Körper, die Definition der entsprechenden Kontaktrandbedingungen, die Berechnung der Kontaktaufgabe und die Kontaktverfolgung unter Berücksichtigung der Änderung des Diskretisierungszustands.

Dieser Beitrag behandelt die Umsetzung eines vollkommen finite Elemente basierten Kontaktberechnungsverfahren mit dem FE-Solver Z88CON am Beispiel von Stirnrädern. Die Berechnung der Tragfähigkeit von Stirnrädern nach DIN 3990 ist sehr umfangreich und für eine erste Abschätzung überdimensioniert. Vielmehr soll das skizzierte Verfahren eine rasche qualitative Einordnung der Tragfähigkeit mittels der FE-basierten Kontaktberechnung ermöglichen. Die verwendete Geometrie ist idealisiert, d.h. Verzahnungsfehler wie Fluchtungsfehler, Breitenballigkeit, usw. werden nicht berücksichtigt. Die Beanspruchung wird als statisch angenommen [1]. Bild 1 zeigt die Zahnfußbeanspruchung zu Beginn des Zahneingriffs. Bei Versagen der Stirnräder würde eine Schädigung im Bereich der Biegezugspannung entstehen [2].

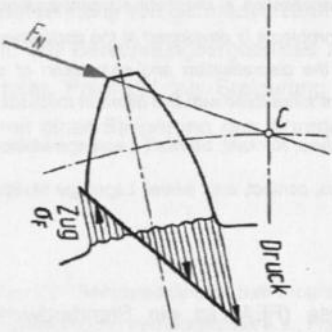


Bild 1: Biegebeanspruchung des Zahnfußes [2]

2 FE-Formulierung des Kontaktbereichs

Die FE-Kontaktberechnung der Stirnräder liefert geringe Verformungen der diskretisierten Geometrie, sodass die Theorie der geometrischen Linearität vorausgesetzt wird [3]. In der Kontaktfläche der Zahnflanken besteht erwartungsgemäß keine große Verformung. Die FE-basierte Kontaktberechnung ist, wie oben beschrieben, in vier Teilbereiche gegliedert. Zunächst erfolgt die Kontaktsuche. Auf Basis dieser Ergebnisse resultiert die

Kontaktdefinition der diskretisierten Körper. Diese ist wegen der geringen Verformungen rein statisch und erfolgt als doppelter Knoten-Segment-Kontakt. Das heißt, die übliche Definition von Master- und Slave-Netz wird dahingehend erweitert, dass beide in Kontakt stehende Körper bis zu einem bestimmten Grad ineinander eindringen können. Für die anschließende Berechnung der Verschiebungen kommt das Lagrange-Verfahren (1) bzw. das Gestörte-Lagrange-Verfahren (2) zum Einsatz. Dafür sind die folgenden Gleichungssysteme zu lösen, die das Ergebnis der Variation der potentiellen Energie im linear elastischen Fall beschreiben. $\boldsymbol{K}$ ist dabei die Gesamtsteifigkeitsmatrix, $\boldsymbol{G}$ die Matrix der Kontaktrandbedingungen, $\boldsymbol{H}$ die Störmatrix, $\boldsymbol{u}$ sind die Verschiebungen, $\boldsymbol{\lambda}$ die Lagrange-Multiplikatoren und $\boldsymbol{f}$ die externen Kräfte. Die Störmatrix $\boldsymbol{H}$ ist eine Diagonalmatrix, die das Gesamtsystem positiv definit hält und die Diagonalelemente $1/\beta$ besitzt, wobei β problemspezifisch gewählt werden kann. Je größer die Werte für β sind, desto steifer ist die Kontaktbedingung definiert. Die Lagrange-Multiplikatoren $\boldsymbol{\lambda}$ liefern als Lösung die Kontaktkräfte [3, 4, 5].

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{G}^T \\ \boldsymbol{G} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{G}^T \\ \boldsymbol{G} & \boldsymbol{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{2}$$

3 Modellbildung

Um die Zahnfußtragfähigkeit zu berechnen, wird lediglich ein Zahn des Stirnrads modelliert. Die Geometrie ist vereinfacht, d.h. die Zahnflanken folgen nicht exakt einer Evolvente. Bei der Ausgangsdiskretisierung handelt es sich um eine Superstruktur im Dateiformat *.DXF, die mit Hilfe des CAD-Konverters Z88X und des Mapped Meshers Z88N zur FE-Struktur konvertiert und vernetzt wird. Aufgrund der getroffenen vereinfachten Annahmen wird die Zahngeometrie mit quadratischen Scheiben diskretisiert. Ein einzelner Zahn besitzt 512 Elemente und 1639 Knoten [1].

Zur Kontaktberechnung wird ein Modell mit zwei Zähnen erstellt. Die Randbedingungsaufgabe erfolgt auf zwei verschiedene Arten (Bild 2). In beiden Fällen wird für Zahn 1 die Verschiebung in x- und y-Richtung an der Innenseite des Radkörpers gesperrt. Zahn 2 wird drehbar gelagert, im Fall A mittels einer Stabstruktur, im Fall B mit

Scheibenelementen. So kann eine bzgl. der Rotationsachse konzentrische Beweglichkeit sichergestellt werden.

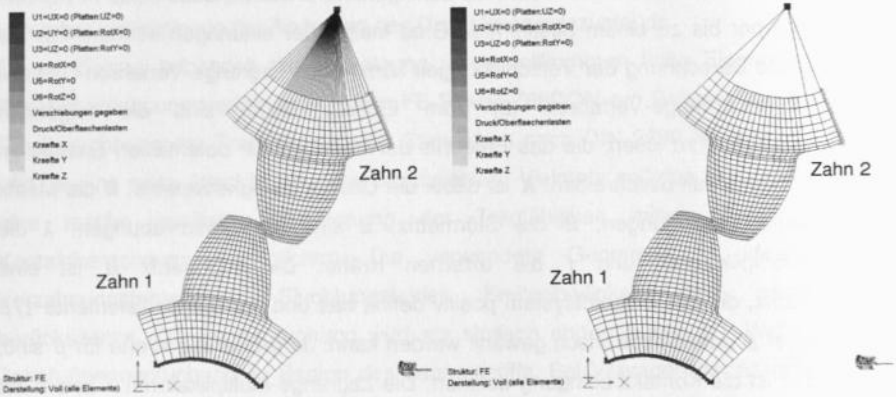


Bild 2: Modellbildung: Fall A (links) und Fall B (rechts)

Die Last ist als Linienlast ($F = 12.100\ N/mm$) über den Querschnitt des Radkörpers des Zahns 2 aufgebracht. Die Zahnradsegmente sind aus Stahl ($E = 206.000\ N/mm^2$, $\upsilon = 0{,}3$). Die Steifigkeit der Lagerung wird variiert und die Zahnfußbeanspruchung in Abhängigkeit der Steifigkeit der jeweiligen Lagerelemente untersucht. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt unter Berücksichtigung aller Randbedingungen nach dem Lagrange- bzw. nach dem Gestörten-Lagrange-Verfahren mit dem dafür modifizierten FE-Solvers Z88CON auf Basis des FE-Solvers des FE-Systems Z88 [1]. Zur Auswertung werden die Spannungen in den Eckknoten der Elemente im Zahnfuß herangezogen. Als Vergleichsspannungshypothese wird die Gestaltänderungsenergiehypothese gewählt.

4 Auswertung und Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Zahnfußbeanspruchung der Kontaktberechnung wird eine spannungsoptische Aufnahme herangezogen (Bild 3) [6]: „Die eingetragenen Zahlen 1 bis 15,5 für Linien gleicher Hauptschubspannungen sind proportional der Spannung. Der Abbruch des Zahns ist an der Zugseite des Zahns (Randspannung 12,5) zu erwarten."

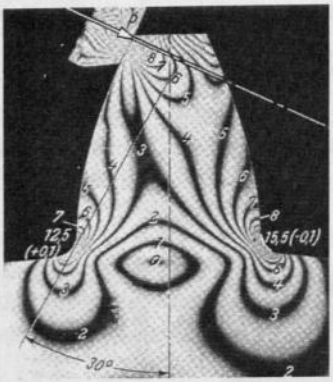


Bild 3: Spannungsoptische Aufnahme der Zahnfußbeanspruchung [6]

Tabelle 1 zeigt die Auswertung der Spannungen im Zahngrund von Zug- und Druckseite. Die Verifikation von FE-Berechnung und Versuch erfolgt anhand des Spannungsverhältnisses, da sich die absoluten Werte aufgrund unterschiedlicher Belastung und Materialdefinition unterscheiden. Für das Verhältnis der Spannungen von Druck- zur Zugseite im Zahngrund ergibt sich für die spannungsoptische Aufnahme nach [6] $\sigma_D/\sigma_Z = 1{,}24$. Die FE-Kontaktberechnung (Bild 4) liefert sowohl für die Berechnung nach dem Gestörten-Lagrange-Verfahren, als auch nach dem Lagrange-Verfahren Ergebnisse, die qualitativ die Versuchsergebnisse wiederspiegeln. Abweichungen der Ergebnisse sind v.a. mit der Art der Lagermodellierung des Zahns 2 zu begründen. Mit steigender Steifigkeit der Lagerelemente (Scheiben- bzw. Stabstruktur) sinkt die Zahnfußbeanspruchung und nähert sich der des spannungsoptischen Versuchs an. Für Zahn 1 ist in beiden Fällen A und B das Spannungsverhältnis mit $\sigma_D^A/\sigma_Z^A = 1{,}23$ bzw. $\sigma_D^B/\sigma_Z^B = 1{,}27$ sehr nahe am Versuchsergebnis. Das Spannungsverhältnis für Zahn 2 nach Lagermodellierung Fall B zeigt bei steifer Ausführung mit $\sigma_D^B/\sigma_Z^B = 1{,}29$ gute Übereinstimmung mit dem spannungsoptischen Versuch. Für die Stabstruktur (Fall A) ergibt sich ein Spannungsverhältnis zugunsten der Druckseite. Trotz dieser Abweichung zum Versuch scheint das Modell im Fall A, gerade im Bereich des Übergangs von Radkörper zu Welle, realistischer modelliert zu sein. Weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Lagermodellierung sind demzufolge nötig. Die Kontaktberechnung nach dem Gestörten-Lagrange- bzw. dem Lagrange-Verfahren zeigt für sehr kleine Faktoren $\beta = 1e - 12$ keine Unterschiede im Ergebnis.

Tabelle 1: Verhältnis der Spannungen von Druck- zu Zugseite im Zahngrund

	Stabstruktur Fall A			Scheibenstruktur Fall B			Versuch [6]
E-Modul in N/mm²	2,06E+05	1,00E+06	1,00E+09	2,06E+05	1,00E+06	1,00E+09	-
σ_D/σ_Z **Zahn 1**	1,28	1,24	1,23	1,46	1,33	1,27	1,24
σ_D/σ_Z **Zahn 2**	1,59	1,53	1,49	1,67	1,40	1,29	-

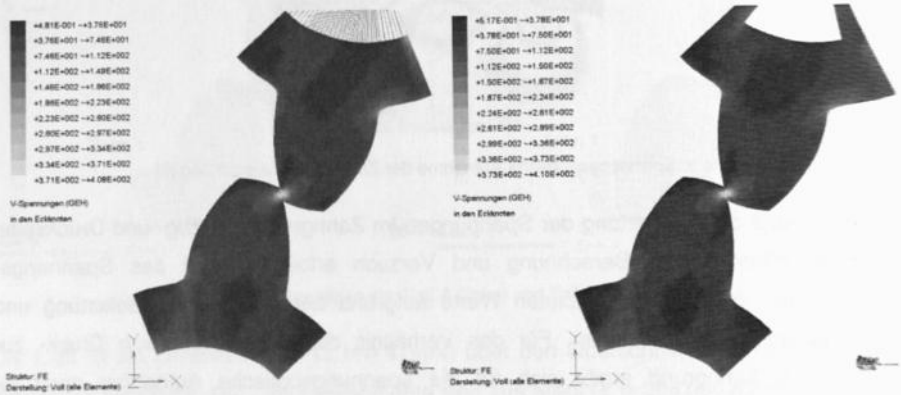


Bild 4: Ergebnisse der FE-Kontaktberechnung für Modellierung Fall A (links) und Fall B (rechts)

Literatur

[1] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure.* 3. Auflage München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009.

[2] Decker, Karl-Heinz; Kabus, Karlheinz: *Maschinenelemente.* 17. Auflage München: Carl Hanser Verlag, 2009.

[3] Belytschko, Ted; Liu, Wing Kam; Moran, Brian: *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures.* 1. Auflage. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2000.

[4] Zienkiewicz, Olgierd Cecil; Taylor, Robert Love: *The Finite Elemente Methode: Volume 2: Solid Mechanics.* 5. Auflage Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

[5] Wriggers, Peter: *Computational Contact Mechanics.* 1. Auflage Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2002.

[6] Niemann, Gustav; Winter, Hans: *Maschinenelemente. Zweiter Band: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe – Grundlagen, Stirnradgetriebe.* 2. Auflage Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag, 1983.

Finite Elemente Analysen zur Berechnung von Maschinenelementen mit nichtlinearem Verhalten

Christoph Wehmann, Martin Neidnicht, Florian Nützel, Bernd Roith, Frank Rieg

Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth
E-Mail: christoph.wehmann@uni-bayreuth.de
Internet: www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Die vorliegende Arbeit untersucht Berechnungsmöglichkeiten für die Kennlinienbestimmung von Tellerfedern. Es werden Finite Elemente Analysen mit verschiedenen Elementtypen, Elementformulierungen und Diskretisierungsgraden betrachtet. Ziel der Analysen ist die korrekte Beschreibung der auftretenden Nichtlinearität. Die Güte der Berechnungsergebnisse wird mit Hilfe der experimentell abgesicherten Kennlinie von Almen und László bewertet.*

Abstract: *The present publication analyzes possibilities to calculate the characteristic curve of disk springs. Therefore it contains Finite Element Analysis with different element types, element formulation and mesh fineness. The intention is getting a correct model of the nonlinear behavior. The performance of the results will be evaluated by the characteristic curve of Almen and László.*

Stichwörter: *Tellerfeder, Federkennlinie, Finite Elemente Analyse, Elementformulierung, Elementtyp.*

Keywords: *disk spring, characteristic curve, Finite Element Analysis, element formulation, element type.*

1 Zielsetzung

Die Berechnung von Maschinenelementen mit nichtlinearem Verhalten und die dazu notwendigen Vorgehensweisen hinsichtlich der Modellbildung stehen im Mittelpunkt der folgenden Betrachtungen. Dazu werden verschiedene Finite Elemente Analysen zur Berechnung der Kennlinien von Tellerfedern durchgeführt.

Die Analysen unterscheiden sich durch Elementtyp, Elementformulierung und Diskretisierung. Als Elementtypen kommen lineare und quadratische Tetraeder und Hexaeder aus [1] zum Einsatz. Die Elementformulierung betreffend wird die Eignung der totalen Lagrange'schen Formulierung [2] untersucht. Außerdem wird der Gewinn an Ergebnisgüte gegenüber der klassischen, linearen Formulierung herausgearbeitet. Schließlich wird der Einfluss des Diskretisierungsgrads geprüft.

Zur Berechnung der Kennlinien wird eine eigens für diese Zwecke entwickelte Funktionalität des Präprozessors von Z88 Aurora® [3] angewendet. Sie erlaubt, an diskreten Orten mechanische Größen über den Verlauf der Verformung aufzuzeichnen.

2 Modellbildung und Vorgehen

2.1 Grundlegendes Finite Elemente Modell

Als Berechnungsgrundlage dient die in Bild 1 gezeigte Tellerfeder, bei der der äußere Tellerrand reibungsfrei in der Tellerebene beweglich ist. Allein die Bewegung in Axialrichtung ist fixiert. Ein virtueller Fixpunkt gewährleistet eine statisch bestimmte Lagerung ohne die radiale Bewegungsfreiheit einzuschränken. Die Kraft wird gleichmäßig auf die Knoten des inneren Tellerrandes aufgebracht.

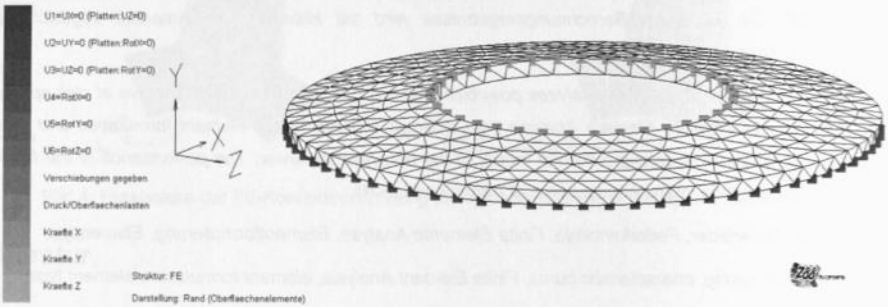


Bild 1: Modell der Tellerfeder mit Randbedingungen, dargestellt in Z88 Aurora®

2.2 Totale Lagrange'sche und klassische Elementformulierung

Die Elementformulierung erfordert die Wahl eines geeigneten Spannungsmaßes, auch wenn lediglich Verschiebungen berechnet werden sollen. Bei der klassischen Elementformulierung ist dies die technische Spannung . Zur Beschreibung geometrischer Nichtlinearitäten existieren mehrere Spannungsmaße, insgesamt 16 Stück [4]. Hier wird die 2. Piola-Kirchhoff'sche Spannung S angewendet, die bezogen auf die unverformte Struktur definiert ist. Auch das zur totalen Lagrange'schen Elementformulierung gehörige Dehnungsmaß, die Lagrange'sche Dehnung , ist bezogen auf die unverformte Struktur definiert. In Tabelle 1 ist ein Überblick über einige Spannungs- und Dehnungsmaße gegeben.

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Spannungs- und Dehnungsmaße

Spannungsmaß	Arbeitskonjugiertes Dehnungsmaß
Technische Spannung σ	Technische Dehnung ε
2. Piola-Kirchhoff'sche Spannung S	Lagrange'sche Dehnung λ
Cauchy'sche Spannung σ_c	Euler'sche Dehnung η

Im nächsten Schritt müssen Spannung und Dehnung über ein Materialgesetz verknüpft werden. Für die klassische Elementformulierung wird das Hooke'sche Gesetz nach Gl. (1) verwendet.

$$\sigma = C\,\epsilon \tag{1}$$

Bei der totalen Lagrange'schen Elementformulierung findet die Übertragung des Hooke'schen Gesetzes auf die Theorie endlicher Dehnungen, das St. Venant'sche Gesetz (2), Anwendung [5].

$$S = C\,\lambda \tag{2}$$

In den Gleichungen (1) und (2) ist mit $\boldsymbol{C}$ die Materialmatrix bezeichnet, die aus Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl berechnet werden kann [1].

2.3 Tetraeder- und Hexaederelemente, Diskretisierung

Die Kennlinien werden mit Hilfe von vier verschiedenen Elementen berechnet. Es kommen zwei Z88-Tetraederelemente, Tetraeder Nr. 16 mit 10 Knoten und Tetraeder Nr. 17 mit 4 Knoten, zum Einsatz, sowie die Z88-Hexaederelemente Hexaeder Nr. 1 mit 8 Knoten und Hexaeder Nr. 10 mit 20 Knoten. Die Integrationsordnung zur Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrizen wird gemäß der Empfehlung in [1] gewählt. Die Elemente werden außerdem in unterschiedlich fein diskretisierten Netzen verwendet. Die feinsten Netze besitzen knapp 75.000 Freiheitsgrade, während die gröbsten Netze nur ungefähr 5.000 Freiheitsgrade umfassen.

2.4 Computertechnische Auswertung

Aufgrund der Symmetrie genügt es, die Verschiebung eines Knotens des belasteten Tellerinnenrandes zu betrachten. Dieser Knoten kann in Z88 Aurora® über die grafische Benutzeroberfläche gewählt werden, so dass der Gleichungslöser für jede Laststufe die zugehörige Verschiebung in Achsrichtung ausgibt. Diese Berechnungsergebnisse dienen als Grundlage für die Untersuchungen in Kapitel 3.

3 Ergebnisse und Auswertung der Berechnungen von Tellerfedern

3.1 Analytische Referenzberechnung

Die Güte der mittels der Finite Elemente Analyse berechneten Kennlinien wird über die Abweichung von der Kennlinie nach Almen und László bewertet. Der entsprechende Zusammenhang zwischen Kraft und Weg ist in (3) dargestellt, entnommen aus [6].

$$F = \frac{4 \cdot E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot \frac{s}{t} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{t}\right) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t}\right) + 1\right] \tag{3}$$

Die Eingabewerte sind E=206.000 N/mm², ν=0.3, D_e=112 mm, D_i=57 mm, h_0=3,9 mm, t= 3,0 mm und K_1=0,687.

3.2 Einfluss der Elementformulierung

Die beiden verwendeten Elementformulierungen führen bei der Kennlinienberechnung auf deutlich unterschiedliche Kurven. Sind Elementtyp und Diskretisierungsgrad gleich, liegt die mittels der totalen Lagrange'schen Formulierung errechnete Linie stets näher an der Referenzlinie als bei Berechnung über die klassische Elementformulierung.

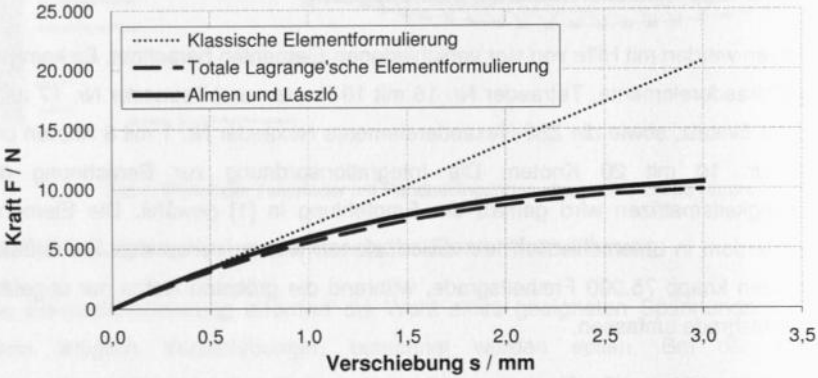


Bild 2: Berechnete Federkennlinien für verschiedene Elementformulierungen

Insbesondere bei Verwendung der Elementtypen Tetraeder Nr. 16, Hexaeder Nr. 1 und Hexaeder Nr. 10 erhält man eine sehr gute Annäherung an die analytisch berechnete Referenzlinie. In Bild 2 sind die mit Tetraedern Nr. 16 berechneten Federkennlinien zu sehen. Das zu Grunde liegende Netz besitzt 5332 Elemente und 33252 Freiheitsgrade.

Die totale Lagrange'sche Formulierung liefert eine leicht degressivere Kennlinie als die nach Almen und László. Dies könnte auf die im Finite Elemente Modell näherungsweise angenommene reibungsfreie Lagerung zurückzuführen sein. Reibung würde die radiale Bewegung behindern und könnte so ein weniger nachgiebiges Verhalten der Tellerfeder nach sich ziehen.

3.3 Einfluss von Elementtyp und Diskretisierungsgrad

Aus Kapitel 3.2 geht hervor, dass die totale Lagrange'sche Elementformulierung sehr gut für die Kennlinienberechnung geeignet ist. Daher wird fortan mit dieser Formulierung gearbeitet. Es soll nun der Einfluss des Elementtyps untersucht werden. Dazu werden die in Kapitel 2.3 beschriebenen Elementtypen herangezogen. Alle vier verwendeten Netze besitzen jeweils knapp 10.000 Knoten. In Bild 3 ist zu sehen, dass Tetraeder mit linearen Formfunktionen keine gute Übereinstimmung mit der Referenzlinie liefern.

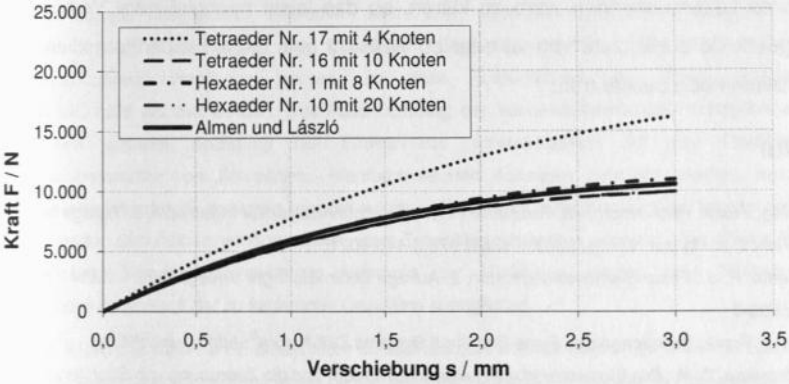


Bild 3: Berechnete Federkennlinien, totale Lagrange'sche Formulierung

Die anderen drei Elementtypen dagegen führen auf eine Federkennlinie mit sehr geringer Abweichung von der Referenzlinie. Mit zunehmend feinerer Diskretisierung konnte eine Annäherung der auf Tetraedern Nr. 17 basierenden Kennlinie an die beiden Linien, die von Elementen mit quadratischen Formfunktionen stammen, beobachtet werden. Dies könnte auf die unzureichende Abbildungsgenauigkeit des Tetraeders Nr. 17 hinsichtlich des Spannungsverlaufs zurückzuführen sein. Tetraeder mit linearen Formfunktionen besitzen eine über das Element konstante Spannung. Daher sind in Dickenrichtung

mehrere Elemente notwendig, um die Spannungen mitten in der Tellerfeder wiederzugeben und gleichzeitig die Randbedingung einer kräftefreien Oberfläche einzuhalten. Auch bei den Hexaedern Nr. 1 konnte die gleiche Annäherung mit zunehmend feineren Netzen festgestellt werden. Die Änderung ist hier allerdings nicht so stark, was auf die Abbildungsmöglichkeit von linearen Spannungsverläufen zurückzuführen sein könnte.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass die totale Lagrange'sche Elementformulierung sehr gut zur Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens von Tellerfedern geeignet ist. Hinsichtlich der Elementtypen weisen die Elemente Tetraeder Nr. 16, Hexaeder Nr. 1 und Hexaeder Nr. 10 geringe Abweichungen von der Referenzlinie auf. Tetraeder Nr. 17 dagegen zeigt hohe Abweichungen von der Referenzlinie.

In weiteren Untersuchungen wäre zu klären, ob das leicht nachgiebigere Verhalten auf Reibungseffekte zurückzuführen ist oder ob vielleicht eine dritte Elementformulierung die Referenzlinie noch besser trifft.

Literatur

[1] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure.* 3. Auflage München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-40215-7

[2] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden.* 2. Auflage Berlin: Springer Verlag, 2002. – ISBN 3-540-66806-3

[3] Rieg, Frank: Homepage des Finite Elemente Systems Z88 Aurora®: *http://www.z88.de.*

[4] Macvean, D. B.: Die Elementararbeit in einem Kontinuum und die Zuordnung von Spannungs- und Verzerrungstensoren. ZAMP, 19, 1968, S. 157-185.

[5] Wriggers, P.: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden.* Berlin: Springer Verlag, 2001. – ISBN 3-540-67747-X

[6] Decker, K.-H.; Kabus, K.: *Maschinenelemente. Funktion, Gestaltung und Berechnung.* 16. Auflage München: Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978-3-446-40897-5

Simulative Methode zur Optimierung der Verzahnungstolerierung nach DIN 3961/ISO 1328

Christian Brecher, Fritz Klocke, Christof Gorgels, Ario Hardjosuwito, Christoph Löpenhaus

WZL, RWTH Aachen University
Steinbachstraße 19, D-52074 Aachen
E-Mail: a.hardjosuwito@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *Im Rahmen dieses Berichtes wird der Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren (Zahnradschaben und Verzahnungsschleifen) auf die zu erreichenden DIN-Qualitäten exemplarisch präsentiert, wobei die in der industriellen Praxis vielfach verwendeten genannten Feinbearbeitungsverfahren kurz vorgestellt werden. Exemplarisch wird eine Methodik zur Vorhersage der Profilabweichungen beim Zahnradschaben präsentiertt. Nachfolgend werden die simulativ berechneten Verzahnungstopographien in einer FE-basierten Zahnkontaktanalyse abgewälzt. Weiterhin wird eine Toleranzfeldanalyse vorgestellt, bei der fertigungsbedingte Abweichungen mit diversen Ergebnisparametern (Drehfehler, Pressungen, Zahnfußspannungen) verglichen werden, so dass Auswirkungen der Toleranzklassen nach DIN 3961/ISO 1328 sichtbar werden. Das Postprocessing der Variationsrechnungen ermöglicht eine sehr flexible und schnelle Abbildung der Effekte von Toleranzfeldern auf das Geräusch- und Tragfähigkeitsverhalten von Zahnrädern. Hierdurch können Aussagen getroffen werden, welche DIN-Qualitäten eine Verzahnung erreichen bzw. mit welchen Korrekturen diese beaufschlagt werden sollte. Dank der vorgestellten Simulationsmethoden stehen dem Entwicklungsingenieur schon in einer frühen Phase der Getriebe- bzw. Verzahnungsentwicklung Hilfsmittel zur Verfügung, welche eine Optimierung der Verzahnungen hinsichtlich der zu fordernden Qualitäten ermöglichen.*

Abstract: *Within this report a FE-based tooth contact analysis is presented which allows to determine the effects of several manufacturing processes on the tolerance zones on the running and acoustic behaviour of the gears. The analysis of the tolerance zone compares the simulation results (transmission error, pressures, tooth root stresses) to the production-related deviations. Thus the effects of the tolerances according to DIN 3961/ISO 1328, i.d. the quality, gets illustrated. Furthermore a method to predict profile deviations in gear shaving is shown exemplary. Through the presented simulation software numerous tools are available for the optimization of gears regarding their required qualities and tolerances for the development engineer.*

Stichwörter: *Verzahnungen, Zahnradschaben, Wälzschleifen, Verzahnungstolerierung*

Keywords: *Gears, Gear Shaving, Gear Grinding, Tolerance of Gears*

1 Einleitung

Bereits in der frühen Produktentstehungsphase eines Automobilgetriebes wird die Makrogeometrie der Verzahnung definiert. Hierbei werden in der Auslegung das Getriebe und die Verzahnung auf Basis der Anforderungen des Pflichtenheftes dimensioniert. Hinsichtlich der Tragfähigkeit wird die Makrogeometrie entsprechend der in DIN 3990 bzw. ISO 6336 genannten Vorgehensweise festgelegt. In der Normung wird von idealen Bauteilen ausgegangen, welche keinerlei fertigungsbedingte Abweichungen, wie sie bspw. beim Zahnradschaben auftreten können, sowie Modifikationen der Verzahnungstopographien besitzen. In der industriellen Praxis kann es zu Komplikationen bezüglich der Einhaltung der vorgegebenen Verzahnungstoleranzen kommen, wenn diese nicht hinsichtlich Fertigbarkeit der Verzahnungskomponenten ausgelegt wurden. Eine Kopplung von Konstruktion und Fertigung ist hierzu unabdingbar, da andernfalls u. U. Fertigungs- bzw. Verzahnungstoleranzen in der frühen Entwicklungsphase vorgegeben werden, die später in der Produktionsphase nur durch kostenintensive Nachbearbeitung der Bauteile realisiert werden können. Daher sollten bereits im Auslegungsprozess die Auswirkungen der gewählten Qualitätsstufe auf das Einsatzverhalten bekannt sein, um möglichst weit tolerieren zu können. Abhilfe können hierbei Simulationsprogramme schaffen, welche zum Einen den Fertigungsprozess abbilden und zum Anderen eine Analyse des Einsatzverhaltens der Verzahnungen ermöglichen. Am WZL existieren zahlreiche Softwareprogramme, welche eine simulative Betrachtung der Prozesskette der Verzahnungsentwicklung ermöglichen. Unter anderem existieren Fertigungssimulationen, welche die Herstellung verschiedenster Verzahnungen abbilden. Hierbei besteht die Möglichkeit resultierende Profilabweichungen der Zahnradflanke aufgrund des Zahnradschabens simulativ vorherzusagen. Weiterhin wurden Abwälzsimulationen, so genannte Zahnkontaktanalysen, entwickelt, welche eine Betrachtung des Einsatzverhaltens hinsichtlich Geräusch und Tragfähigkeit der Verzahnungen ermöglichen.

2 Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Flankenabweichungen

Nachfolgend werden exemplarisch die wesentlichen Charakteristika der Prozessschritte Zahnradschaben und Wälzschleifen zur Feinbearbeitung von Zahnrädern vorgestellt. Im Rahmen eines DFG-Vorhabens [1] wurde eine Methodik zur Vorhersage der

charakteristischen Profilabweichungen beim Zahnradschaben entwickelt. Mit Hilfe dieser Methodik ist es erstmals möglich Profilabweichungen in Abhängigkeit des Werkzeugverschleißes simulativ zu berechnen, **Bild 4**. Hierbei werden zunächst die Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück mit Hilfe einer Fertigungssimulation (Durchdringungsrechnung) ermittelt.

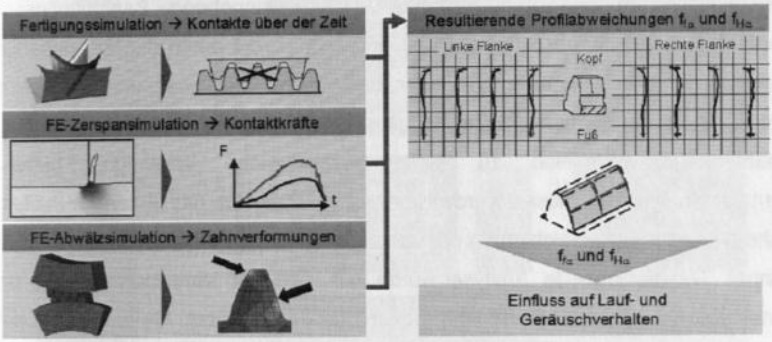


Bild 7: Vorhersage der Profilabweichungen beim Zahnradschaben

Diese Kontaktbedingungen werden als Eingangsdaten für eine zweidimensionale FE-Zerspansimulation herangezogen, aus welcher die verschleißbedingten Prozesskräfte ermittelt werden. Anschließend wird die Verzahnung in einer 3D Abwälzsimulation gepaart. Hieraus können die elastischen Verformungen unter Berücksichtigung der verschleißbedingten Prozesskräfte berechnet werden [2]. Abschließend werden aus den maximal elastischen Verformungen im Zahnkontakt die resultierenden Flankenabweichungen, z.B. Profilabweichungen $f_{f\alpha}$ und $f_{H\alpha}$, ermittelt, deren Einfluss auf das Einsatzverhalten bspw. in einer Toleranzfeldanalyse mittels Zahnkontaktanalyse ermittelt werden kann. Beim Wälzschleifen treten oftmals Abweichungen von der Sollgeometrie der Verzahnungen auf, insbesondere wenn Balligkeiten erzeugt werden. Diese Balligkeiten entlang der Zahnflanken- bzw. in Profilrichtung sorgen für ein besseres Laufverhalten der Verzahnung bspw. hinsichtlich des Verlagerungsverhaltens. Typische Abweichungen hierbei sind Verschränkungen, welche mit Hilfe der Flankenlinienabweichungen $f_{h\beta}$ bzw. der Profilabweichungen $f_{h\alpha}$ beschrieben werden können.

3 Toleranzfeldanalyse geschabter und geschliffener Verzahnungen

Die Auswahl der Fertigungskette hat einen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Qualität eines Zahnrads. Im Zuge der Wärmebehandlung kann es durch Härteverzüge zu deutlichen Abweichungen von der ursprünglichen Flankengeometrie kommen. Da im Gegensatz zum Schleifen das Schaben der letzte konturgebende Bearbeitungsschritt in der weichspanenden Zahnradfertigung ist, lassen sich die durch die Wärmebehandlung entstehenden Abweichungen nicht mehr beseitigen. Eine geeignete Möglichkeit zur Analyse der Auswirkungen der gefertigten Qualität auf das Einsatzverhalten einer geschabten im Vergleich zu einer geschliffenen Verzahnung bietet eine Toleranzfeldanalyse. In dieser werden die Kenngrößen für das Einsatzverhalten einer Verzahnung unter Berücksichtigung der von der Qualitätsstufe abhängigen Abweichungen berechnet. Die vorliegende Analyse wurde mit Hilfe der Variationsrechnung der FE-basierten Zahnkontaktanalyse FE-Stirnradkette [3] durchgeführt. Als Beurteilungskriterien werden die im Rahmen der Wärmebehandlung besonders stark beeinflussten Flanken- sowie Profillinienwinkelabweichungen herangezogen. Diese verändern in Abhängigkeit von Drehzahl und Belastung die statische Tragfähigkeit sowie die Laufruhe und dynamische Tragfähigkeit eines Getriebes signifikant.

Für die präsentierten Analysen wurde eine am WZL genutzte Prüfverzahnung mit hervorragenden akustischen Eigenschaften (Gesamtüberdeckung $\varepsilon_\gamma = 3$) ausgewählt, die mit den angegebenen Betriebsdaten auf einem Verspannungsprüfstand untersucht worden ist. Entsprechend der makrogeometrischen Daten wurden die zulässigen Abweichungen rechnerisch ermittelt. Die für die Fertigungsketten üblichen Qualitätsstufen Q8 (geschabt) sowie Q6 (geschliffen) wurden hierzu analysiert. Die Berechnung der maximal zulässigen Profil- und Flankenlinienwinkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ erfolgt nach DIN 3961 bzw. ISO 1328 [4,5]. Als Maximalwerte liegen für die schlechtere Qualitätsstufe 8 hinsichtlich der Profillinienwinkelabweichung ± 16,6 µm vor, sodass über einen Bereich von 20 µm mit einer Schrittweite von 2 µm variiert worden ist. Für die Flankenlinienwinkelabweichung beträgt der Maximalwert ± 21,5 µm, weshalb für diese Größe ein Intervall von 30 µm mit der Schrittweite von 2 µm analysiert wurde.

Die Toleranzfeldanalyse zur akustischen Bewertung befindet sich in

Bild 8, die zur Beanspruchung in **Bild 9**. Es wurde jeweils eine Worst-Case-Betrachtung für die Grenzen der Toleranzfelder gemacht, deren Ergebnisse sich im unteren Bereich

der Abbildung befinden. Als Beurteilungsgröße für die Anregung im Zahneingriff eignen sich die Kenngrößen Summendrehfehler D_{Sum}, also die Abweichung der Übersetzung von der idealen Übersetzung, sowie die Summendrehfehlerschwankung ΔD_{Sum} über dem Zahneingriff.

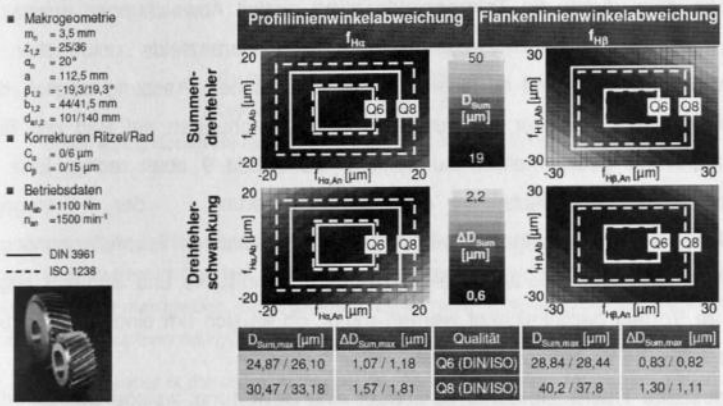


Bild 8: Toleranzfeldanalyse zum Geräuschverhalten geschabter (Q8) und geschliffener (Q6) Räder

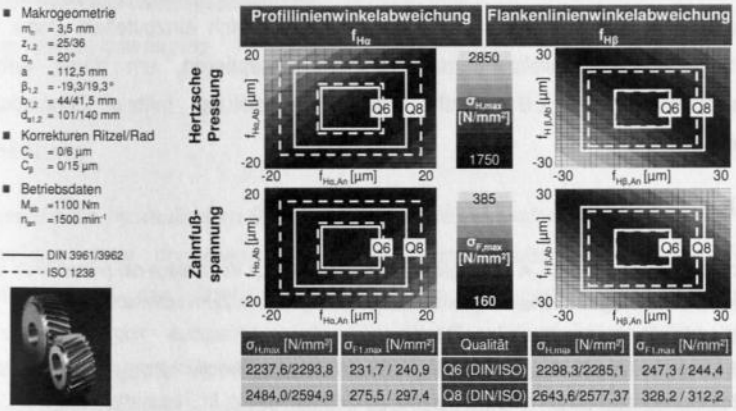


Bild 9: Toleranzfeldanalyse zur Beanspruchung geschabter (Q8) und geschliffener (Q6) Räder

Es sind deutliche Unterschiede zum einen zwischen den Qualitätsstufen, aber auch in Hinblick auf die gewählte Norm zu erkennen. Es wird deutlich, dass die Flankenlinienwinkelabweichung einen höheren Einfluss auf den Summendrehfehler hat, während die Profillininenwinkelabweichung eher die Schwankungsbreite beeinflusst, deren

Niveau hier jedoch vernachlässigbar klein ist. Die Beurteilung hinsichtlich der Beanspruchung auf der Zahnflanke und dem Zahnfuß ist in Bild 9 dargestellt. Für beide Kenngrößen (Hertzsche Pressung und Zahnfußspannung) zeigt sich, dass die Flankenlinienwinkelabweichung kritischer als die Profillinienwinkelabweichung ist. Es ist erkennbar, dass durch die Toleranzfeldanalyse gezielt Abweichungen ermittelt werden können, für die die Schwankungsbreite des Toleranzfelds unkritischer als die Grundauslegung ist. So ist es hinsichtlich der Hertzschen Pressung möglich, durch die Definition geringer positiver Flankenlinienwinkelabweichungen auf Rad und Ritzel das Pressungsniveau gesamtheitlich zu senken, siehe Bild 9 oben rechts. Eine ähnliche Vorgehensweise erlaubt eine Optimierung der vorgegebenen Profillinienwinkelabweichungen in Hinblick auf die maximalen Zahnfußspannungen. Zum Teil jedoch sind die erzielten Effekte bezüglich Zahnflanke und Zahnfuß gegenläufig, sodass im Vorfeld berücksichtigt werden muss, ob es sich um eine zahnfußbruch- oder grübchenkritische Verzahnung handelt.

Die vorgestellte Toleranzfeldanalyse erlaubt eine Bewertung, welche Qualität erforderlich ist, um die Anforderungen an das Einsatzverhalten der Radpaarung zu erfüllen. Insbesondere erlaubt die damit verbundene Variationsrechnung Abweichungen gezielt vorzugeben, um einen weniger kritischen Betriebsbereich einzustellen. Damit wird es möglich geringere Qualitätsanforderungen zu akzeptieren, um damit verbundene Einsparungspotenziale, z.B. durch Weichfeinbearbeitung mittels Zahnradschaben, aufzudecken.

Literatur

[1] Klocke, F.; Hardjosuwito, A.: Entwicklung einer Methodik zur Vorhersage der prozesskraft- und verschleißbedingten Werkstückgeometrieabweichungen beim Zahnradschaben. DFG-Abschlussbericht. RWTH Aachen, 2010

[2] Brecher, C.; Gorgels, C.; Hardjosuwito, A.: *Vorhersage der Werkstückgeometrieabweichungen beim Zahnradschaben – Ermittlung der elastischen Zahnverformung.* In: Tagungsband zur 50. Arbeitstagung „Zahnrad- und Getriebeuntersuchung", WZL, RWTH Aachen 2009

[3] Brecher, C.: *FE-Stirnradkette v3.2 – Benutzeranleitung zum Programm.* FVA-Forschungsvorhaben Nr. 127, Heft 723, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt a.M., 2007

[4] Norm DIN 3961: *Toleranzen für Stirnradverzahnungen.* Verlag Beuth, Berlin, 1978

[5] Norm ISO 1328: Cylindrical Gears – ISO system of accuracy. ISO-Verlag, Genf, 1995

Verwendungsmöglichkeiten von Gelen als Drucküberragungsmedium in hydraulischen Spannbuchsen

Enrico Kloß

Universität Rostock
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
Email: enrico.kloss@uni-rostock.de; Internet: http://www.kt.uni-rostock.de/ktc/

Inhalt: *In diesem Beitrag wird die Verwendung von Hydrogelen als Drucküberragungsmedium in hydraulischen Hohlmantelspannbuchsen untersucht. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen an gelgefüllten Glaskörpern durchgeführt. Die Ergebnisse führen zu fertigungsspezifischen Merkmalen für die Befüllung dieser Spannbuchsen mit Hydrogelen.*

Abstract: *Topic of this paper is the use of hydrogels as a pressure medium for hydraulic shaft bushings. Therefore experimental researches have been done with gel-filled glass vessels. The results will help to specify the demands for the manufacturing of shaft bushings filled with hydrogels.*

Stichwörter: *Hydrogel, Hohlmantelspannbuchse*

Keywords: *hydrogel, shaft bushing*

1 Einleitung

Die thematisierten hydraulischen Spannbuchsen, zum Verbinden von Wellen und Naben, bestehen aus einer doppelwandigen Buchse. Im Arbeitsraum befindet sich ein Druckmedium, auf das über einen mit Schrauben gespannten Druckring ein hydrostatischer Druck ausgeübt wird. Für die Berechnung der Kräfte gilt das Druckfortpflanzungsgesetz von Pascal: Wird auf ein vollständig umschlossenes Fluid an einer Stelle eine Pressung ausgeübt, pflanzt sich der Druck – ohne Berücksichtigung der Dichte-, d. h. Schwerewirkung– nach allen Richtungen gleichmäßig und unvermindert durch das gesamte Fluid fort. Überall im Innern des Fluids und an der Berandung herrscht dann der gleiche Druck. [1] Durch diesen Druckanstieg werden über das Druckmedium die Buchsenwände aufgeweitet und die Welle mit der Nabe kraftschlüssig verbunden.

Handelsübliche Lösungen verwenden Öl, selten auch Wasser oder plastischen Massen (z.B. Silikon) [2], als Druckübertragungsmedium. Die Ansprüche an den Befüllungswerkstoff sind dabei Inkompressibilität und eine gute Formbarkeit zur optimalen Adaption an die Arbeitsraumgeometrie. Diese beiden Bedingungen werden unter anderem auch von Gelen erfüllt.

Gele bestehen aus dispergierten Makromolekülen in einem homogenen Dispergierfluid. Dadurch sind sie Stoffsysteme, welche aus einer festen und einer flüssigen Phase bestehen. Die flüssige Phase stellt mit bis zu 90% den Hauptanteil am Stoff, so dass die Inkompressibilität gewährleistet ist. Der Vorteil gegenüber den Ölen ist, dass sich der Arbeitsraum der Spannbuchse, dank der festen Phase, leichter gegen die Atmosphäre abdichten lässt, als es bei niedrig viskosen Ölen möglich ist. Ein Nachteil der Gele ist die mögliche Phasenumwandlung in Form von Verdunstung der flüssigen Phase in Folge von Erwärmung.

2 Anforderungen an den Befüllungswerkstoff

Die Hauptkriterien bei der Wahl des Befüllungswerkstoffs sind die hydrostatischen Eigenschaften und die Möglichkeiten der Abdichtung gegen die Umgebung. Entscheidend für die gleichmäßige Druckübertragung sind zwei wichtige zusammenhängende Attribute. Erstens muss der Befüllungswerkstoff inkompressibel sein und zweitens ist bei der Befüllung des Arbeitsraums einer hydraulischen Hohlmantelspannbuchse darauf zu achten, dass keine Lufteinschlüssen im Druckmedium auftreten. Eventuell vorhandene Gasporen führen zu kompressiblen Sektionen im Arbeitsraum, durch die das Wirkprinzip dieser Welle-Nabe-Verbindung außer Kraft gesetzt wird.

2.1 Eigenschaften der Hydrogele in technischen Anwendungen

Hydrogele sind Stoffsysteme die sich frei konfektionieren lassen. So ist beispielsweise der Wasseranteil frei wählbar. Gesteuert wird dieser Parameter über den Herstellungsprozess. Typischerweise sind Hydrogele Vernetzungen hydrophiler Polymere, welche in Wasser quellen [3]. Durch diese chemische Reaktion entstehen dreidimensionale Netzwerke mit unendlicher Molmasse, die Festkörper bilden. Diese sind unlöslich, können aber beträchtliche Mengen an Lösungsmittel aufnehmen. Wenn Wasser als Quellmittel verwendet wird, spricht man von Hydrogelen [4]. Mit der Länge der Quellzeit nimmt auch der Wassergehalt des Hydrogels zu. Bei einem hohen Wasseranteil von 80% und mehr ist

dieses Material dann inkompressibel und kann als Druckübertragungsmedium in hydraulischen Hohlmantelspannbuchsen zum Einsatz kommen.

2.2 Ultraschallgel als Befüllungswerkstoff

In Laborversuchen fanden erste Untersuchungen an Hydrogelen und deren Verarbeitung in den Spannbuchsen statt. Verwendet wurde dabei handelsübliches Ultraschallgel, welches in der Sonographie zum Einsatz kommt. Verwendet wurden zwei verschiedene Produkte mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung. Das erste Produkt wird vom Pharma-Vertrieb auxynHairol® hergestellt und TMP (Tüshaus Medical Produkte) GmbH lieferte das zweite Ultraschallgel. Der Vorteil von Ultraschallgel ist, dass es im Lieferzustand mikroblasenfrei ist und somit herstellungsbedingte Lufteinschlüsse ausgeschlossen sind.

Bild 10: Lufteinschlüsse im Ultraschallgell nach dem Umfüllen in ein Becherglas

Während des Umfüllens des Ultraschallgels kam es durch die hohe Viskosität des Stoffes zur Ausbildung von makroskopischen Luftblasen. (Bild 10) Damit beim Befüllen von Hohlmantelspannbuchsen Gasblasen im Druckübertragungsmedium vermieden werden, mussten Überlegungen zur Lösung dieser Problematik unternommen werden.
Bei der Beobachtung einer unbehandelten Probe, die über einen Zeitraum von mehreren Tagen im Labor stand, konnte man feststellen, dass sich die Größe der Gaseinschlüsse mit der Zeit verminderte. Das Gel floss aufgrund seines Eigengewichts auf den Boden des Gefäßes und setzte sich dort ab. Dies führte zu der Idee, diesen Prozess zu beschleunigen. Als mögliches Verfahren kam zu diesem Zweck das Zentrifugieren zur Anwendung. Hierbei wird die Zentrifugalkraft genutzt, um das Gel im Probengefäß auf den Boden zu drücken und dabei die eingeschlossene Luft zu verdrängen und aus dem Gel zu pressen.

Eine geeignete Zentrifuge für kleine Proben war im Labor der chemischen Fakultät zu finden. Für Testläufe wurden Eppendorf-Reaktionsgefäße (1,5 ml) mit Ultraschallgel gefüllt und 90 Sekunden bei 1000 min^{-1} zentrifugiert. Als Ergebnis erhielt man ein makroskopisch blasenfreies Gel und auch eine Untersuchung der Proben unter dem Mikroskop ergab keine erkennbaren Gaseinschlüsse. Damit dieses Ergebnis auf die zu entwickelnden Spannhülsen übertragen werden konnten, wurden größere Zentrifugen benötigt. Nach langer, ergebnisloser Suche fand sich eine geeignete Zentrifuge (Minifuge RF - Heraeus SEPATECH) in der biologischen Fakultät der Universität Rostock am Lehrstuhl für Mikrobiologie. Diese Zentrifuge arbeitet nach dem so genannten Swing-Out-Prinzip mit schwenkbar gelagerten Probengefäßen.

Für die visuelle Untersuchung wurden Glaskörper zur Begutachtung der Luftblasenverteilung in doppelwandigen Hülsen (Bild 11) hergestellt. Diese wurden in der Glaswerkstatt der chemischen Fakultät angefertigt.

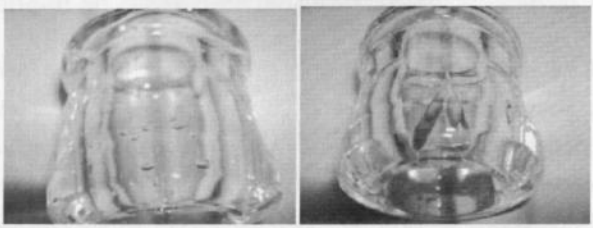


Bild 11: Eine befüllte Glashülse vor der Zentrifugation

Als Drehzahlbegrenzung gilt in der Chemie für Glasgefäße eine maximale Drehzahl von 3000 min^{-1}, damit ein Zerplatzen der Gefäße aufgrund des Eigengewichts vermieden wird.

Begonnen wurde bei der Erprobung der Gele mit den Glasgefäßen, damit eine visuelle Prüfung zeigen konnte, ob die Luftfreiheit der Probe erreicht wurde. Zu diesem Zweck wurden die Glashülsen über eine Einwegspritze mit dem Ultraschallgel befüllt. Es war bereits beim Aufziehen der Spritze zu erkennen, dass man selbst bei größter Vorsicht Lufteinschlüsse nicht vermeiden kann. In den mit dieser Befüllungsmethode befüllten Glashülsen sind sowohl kleinere Luftblasen, als auch größere luftgefüllte Volumenbereiche zu erkennen. (Bild 11)

Das Zentrifugieren erfolgte schrittweise, um die unterschiedlichen Stufen der Luftverdrängung dokumentieren zu können. Bei den ersten Versuchen wurden die

Zentrifugenbecher mit den gelgefüllten Glashülsen fünf Minuten mit 1500 min^{-1} rotiert. Nach einer Begutachtung der Glashülsen war zu erkennen, dass sich das Gel am Boden der Glashülsen abgesetzt hatte und ein Großteil der Luftblasen aus den Hülsen gedrückt war.

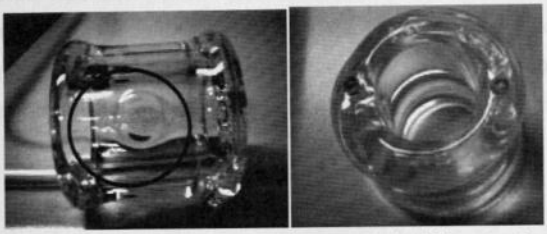


Bild 12: Glashülse nach dem Zentrifugieren mit 1500 min-1 - Luftschicht unter dem Rand (rechts)

An der Hülsenwand, insbesondere an den fertigungsbedingten Unregelmäßigkeiten waren noch vereinzelt kleine Lufteinschlüsse (Bild 12 links) zu erkennen. Rechts auf diesem Bild ist auch ein Luftspalt unter dem stirnseitigen Rand der Hülse zu sehen. Die Befüllung der Hülsen muss somit ein iterativer Prozess sein, bei dem nach jedem Zentrifugieren Gel nachgefüllt werden muss bis eine vollständige Befüllung realisiert ist.

Damit die verbleibenden kleinen Lufteinschlüsse eliminiert werden, musste die Drehzahl der Zentrifuge weiter erhöht werden. Nach einem Durchgang bei 2500 min^{-1} für fünf Minuten, war das Gel in den Glashülsen makroskopisch blasenfrei. Es verblieben dennoch einzelne Luftblasen unter dem stirnseitigen Rand der Testobjekte (Bild 13).

Bild 13: Luftblase unter der Stirnseite einer Glashülse

Diese Blasen entstehen durch die Unebenheiten auf der Glasfläche. Um diese Luft auch aus dem Gel zu drücken, wurden mit den Glashülsen weitere Versuche in der Zentrifuge durchgeführt, aber weder eine Erhöhung der Drehzahl auf die maximal erlaubten 3000 min^{-1} noch die Erhöhung der Zeit in der Zentrifuge auf zehn Minuten, brachten diesen erwünschten Erfolg. Die Luft konnte erst über die Positionierung der Glashülse im

1 Einleitung

Der zunehmende Wettbewerb und die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten mit niedrigen Anschaffungs- und Betriebskosten führen insbesondere bei Unternehmen der Auftragsfertigung zu einem drastischen Rückgang der Umwandlungsquote von abgegebenen Angeboten (deutlich unter 5% [1, 2]). Dies zwingt die Unternehmen der Auftragsfertigung mit ihren meist hochkomplexen, kundenindividuellen und kapitalintensiven Produkten, deren Unternehmenserfolg maßgeblich von der Höhe und der Qualität der abgegebenen Angebote abhängt [3, 2], zur Erschließung aller Potenziale, die hinsichtlich einer verursachungsgerechten und ressourceneffizienten Vorhersagefähigkeit der Produktkosten in der Angebotskalkulation bestehen.

Die Qualität der Angebote und deren Erstellungsaufwand sind vor allem durch die zur Verfügung stehenden technischen und betriebswirtschaftlichen Informationen bestimmt [3]. Im Angebotsengineering des Werkzeug- und Formenbaus sind diese derzeitig stark kundenbezogen, mit großen Unsicherheiten behaftet und von den beruflichen Erfahrungen des Kalkulators abhängig. Um die Produktkosten zukünftig besser planen und steuern zu können, wird in einer interdisziplinären Kooperation der Professuren „Konstruktionslehre" und „Unternehmensrechnung und Controlling" an der TU Chemnitz mit einem führenden deutschen Werkzeug- und Formenbauer die Entwicklung und Umsetzung eines technologie- und phasenübergreifenden Kalkulationsmodells für die Auftragsfertigung bearbeitet und am Beispiel des Werkzeug- und Formenbaus validiert.

2 Drei-Ebenenkonzept der Angebotskalkulation

Das Angebotsengineering ist in der Auftragsfertigung u.a. dadurch gekennzeichnet, dass die konkurrierende Anforderungen an die Produktkalkulation hinsichtlich der Genauigkeit und Geschwindigkeit variieren [1]. Um auf diese unterschiedlichen Anforderungen der Anfragebearbeitung und die Randbedingungen der Technologien Blechumformung, Druckguss und Spritzguss als Vertreter des Werkzeug- und Formenbaus reagieren zu können, wurde für das Kalkulationsmodell der Angebotskalkulation ein Drei-Ebenenkonzept entworfen. Das Drei-Ebenenkonzept für die Angebotskalkulation besteht aus den Ebenen Teilmodell-, Methoden und Funktionsebene (Bild 14).

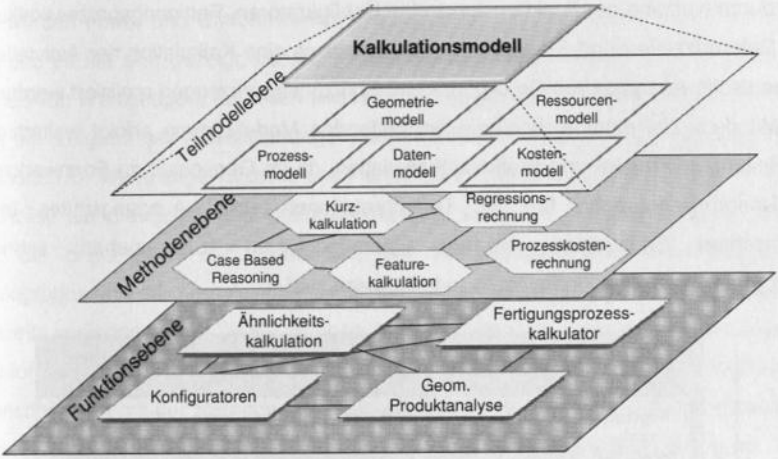


Bild 14: Drei-Ebenenkonzept des Kalkulationsmodells der Angebotskalkulation

Auf der Teilmodellebene sind die Teilmodelle Prozess-, Kosten-, Geometrie-, Ressourcen- und Datenmodell einzuordnen. Diese repräsentieren die verschiedenen Sichten auf das Kalkulationsmodell und bilden die konzeptionelle Grundlage für die Programmfunktionen einer IT-gestützten, technologieübergreifenden Kalkulationssoftwarelösung. Die Programmfunktionen sind auf der Funktionsebene in Form von Funktionsbausteinen dargestellt, die zu einem Funktionsbaukasten aggregiert und nach Anforderung der Nutzergruppen kombiniert werden können. Als Bindeglied zwischen der Modell- und der Funktionsebene hat die Methodenebene die Aufgabe, Methoden bereitzustellen, mit denen kalkulationsrelevante Informationen aus einer Datenbank und die vom Nutzer eingebenen Kalkulationsparameter entsprechend der Teilmodelle für die Programmfunktionen bereitgestellt und schließlich zu einem Kalkulationsergebnis verarbeitet werden. Dazu sind die fallbasierte Kostenschätzung (Case Based Reasoning - CBR), Feature-, Kurz- und Prozesskostenrechnung sowie die Regressionsrechnung und Cost Tables als Kalkulationsmethoden in das Kalkulationsmodell integriert.

Die Realisierung der konkurrierenden Anforderungen bei Schnellkalkulationen für Kurzanfragen und Detailkalkulationen bei Kunden mit höherer Auftragswahrscheinlichkeit wird durch die Modularisierung der Funktionsbausteine erreicht. Dabei werden Schnellkalkulationen durch eine Informationsversorgung der Angebotskalkulation mit statistischen Vergleichswerten im Rahmen einer Ähnlichkeitskalkulation, basierend auf der Methode des „Fallbasierten Schließens" ermöglicht. Eine höhere Kalkulationsgenauigkeit

kann durch Nutzung der Funktionsbausteine Konfiguratoren, Fertigungsprozesskalkulation über Referenzzeiten und Standardarbeitspläne sowie eine Kalkulation der Aktivteile über geometrische Analysen von Druckguss- und Spritzgusswerkzeugen realisiert werden (Bild 15). Mit dem Ziel einer technologieübergreifenden Modellbildung erfolgt weiterhin eine Unterteilung in Projekt- und Werkzeugkalkulation, da im Gegensatz zu Formwerkzeugen bei Umformwerkzeugen für die Transformationen eines Ausgangsgutes in den gewünschten Endzustand mehrere Operationsfolgen (z.B. ziehen, schneiden, nachformen) notwendig und einzeln zu kalkulieren sind.

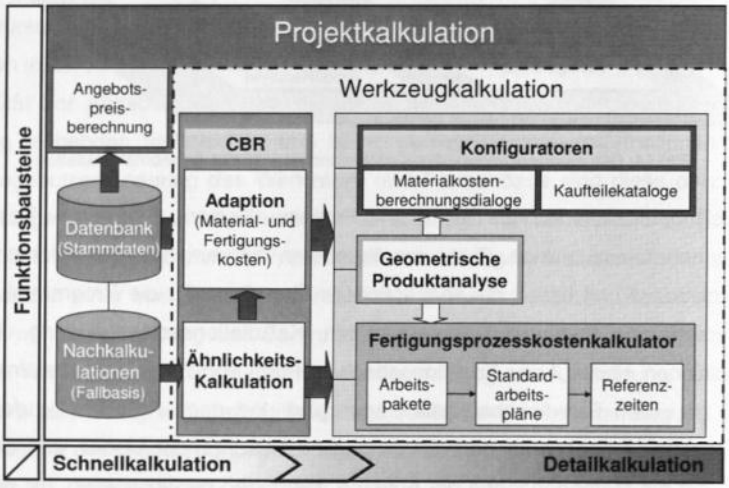


Bild 15: Einsatz der Funktionsbausteine für Schnell- und Detailkalkulationen

3 Fallbasierte Kostenschätzung

Ein Hauptziel der entwickelten Kalkulationslösung stellt eine IT-gestützte Bereitstellung von Kosteninformationen für die Angebotskalkulation dar. Aufgrund der Tatsache, dass bei Unternehmen der Auftragsfertigung die Informationslücke zwischen dem Informationsbedarf und dem Informationsangebot in der Angebotskalkulation besonders groß ist und der Großteil des Kostenwissens nur in impliziter Form vorliegt, ist im Rahmen des Prozess- und Datenmodells die Ableitung von Methodenwissen aus dem spezifischen Faktenwissen von bereits durchgeführten Aufträgen vorgesehen [4].

Dazu wurden Form- und Umformwerkzeugen hinsichtlich ihrer Kostenbestandteile untersucht und es hat sich gezeigt, dass die Kosten (absolut oder relativ) von eingegrenzten Gruppen von Werkzeugen, Bauteilen und Herstellungsprozesse ähnlich sind [5]. Daraufhin wurde ein dreigliedriges Klassifizierungssystem entworfen, welches die Vergangenheitsinformationen für Werkzeuge, Bauteile und Herstellprozesse aus Sicht der Kosten einordnet. Im Hinblick auf die Form- und Umformwerkzeuge sind fünf Klassifizierungsstufen integriert, die diese nach der Auftragsart, der Werkzeugart, dem Werkzeugtyp, der Produktgruppe und der Komplexität klassifizieren. Somit stellen diese, bei Anwendung auf die bereits vorliegenden Nachkalkulationen, klassifizierten und ausgewerteten Vergangenheitsinformationen eine Fall- oder Vergleichsbasis für die Durchführung einer fallbasierten Kostenschätzung mit der Methode des „fallbasierten Schließens" in der Angebotskalkulation dar. Hierbei wird versucht, ein aktuelles Problem (z.B. Neukalkulation eines Werkzeugs) zu lösen, indem auf Lösungen (z.B. Nachkalkulationen) zurückgegriffen wird, die bei ähnlichen Problemen in der Vergangenheit erfolgreich angewandt wurden [6]. Durch einen Vergleich des aktuellen Problems mit der Fallbasis können die dort enthaltenen Lösungen zur ähnlichen Problemstellung zur Lösung des aktuellen Problems herangezogen werden [6]. Infolgedessen ist es möglich Schnellkalkulationen ressourcenschonend durchzuführen, indem das Kalkulationsproblem mittels Klassifizierung so abstrahiert wird, dass bei der Ähnlichkeitssuche in der ebenfalls klassifizierten Fallbasis ähnliche Kalkulationslösungen gefunden werden, die entweder direkt oder durch Adaption auf das aktuelle Kalkulationsproblem übertragen werden können.

4 Funktionsbausteine für eine Detailkalkulation

Auf Grundlage der fallbasierten Kostenschätzung ist der Kalkulator nun in der Lage, Schnellkalkulationen durchzuführen. Zur Realisierung der Detailkalkulationen ist diese Ähnlichkeitskalkulation durch die Funktionsbausteine „Konfiguratoren", „Fertigungsprozesskalkulator" und „geometrische Produktanalyse" ergänzt worden. Diese werden im Weiteren näher erläutert.

4.1 Konfiguratoren

Mit Hilfe der Konfiguratoren besteht die Möglichkeit, die Materialkosten von Form- und Umformwerkzeugen, die im Durchschnitt ca. 30% [1] der Selbstkosten verursachen, genauer zu kalkulieren. Dies wird auf Bauteilebene durch die Integration eines Werkzeug-

konfigurators ermöglicht, bei der der Kalkulator die Baustruktur mit den kostenrelevanten Hauptelementen grob konfigurieren kann. Sind zudem in der Fallbasis ähnliche Werkzeuge verfügbar, kann der Kalkulator auf Stücklisteninformationen und Stückpreise aus der Datenbank zurückzugreifen. Darüber hinaus ist wegen des hohen Anteils der Guss- bzw. Stahlkosten an den Materialkosten ein Berechnungsmodul integriert, mit dem die Rohmaterialkosten der Hauptelemente (z.B. Formrahmen, Kontureinsätze oder Gusskästen etc.) als Produkt der geometrischen Hauptabmessungen mit dem Volumenfaktor als Maß des Füllgrades bei Gussbauteilen, der Werkstoffdichte und dem Werkstoffpreis innerhalb des Konfigurators einzeln kalkuliert werden können.

4.2 Fertigungsprozesskalkulator

Vor dem Hintergrund, dass der Fertigungsablauf (Arbeitsplan) bei der Herstellung der kostenintensiven Hauptelemente (z.B. Formrahmen, Kontureinsätze, Niederhalter, Unterteil etc.) unabhängig von deren geometrischen Gestaltung nahezu immer aus den gleichen Arbeitsgängen besteht, soll mit dem Fertigungsprozesskalkulator der große Anteil der Eigenfertigungskosten (ca. 50% [5]) über Standardarbeitspläne und Referenzzeiten erfolgen. Die Referenzzeiten bilden hierbei die Prozessmengengrößen in Stunden ab, indem sie die Erfahrungswerte aus der mechanischen und der manuellen Fertigung als Referenzgröße für eine Prozesskostenrechnung in der Fertigung zur Verfügung stellen.
Allerdings sind gegenüber den Standardarbeitsplänen die jeweiligen Prozessmengen (Referenzzeiten) von der geometrischen Gestaltung der Bauteile abhängig, da komplexe Bauteilegeometrien zu einem erhöhten Fertigungsaufwand führen. Abhilfe wurde hier durch eine Differenzierung der Referenzzeiten nach den fertigungstechnischen, geometrischen und kundenspezifischen Anforderungen an das Form- bzw. Umformwerkzeug geschafft, die über ein Punktwertmodell zu einer Aussage zur Komplexität des Werkzeugs und somit zu komplexitätsabhängigen Referenzzeiten führen. Durch die Auswahl der zur Werkzeugherstellung benötigen Bauteile, der Komplexität des Werkzeugs und der zu durchlaufenden Arbeitspakete, werden die den entsprechenden Standardarbeitsplänen zugeordneten Referenzzeiten als Prozessmengen den zu belastenden Kostenstellen zugerechnet und zur Ermittlung der Fertigungsprozesskosten mit dem Prozesskosten- bzw. Maschinenstundensatz der Kostenstellen multipliziert (Bild 16).

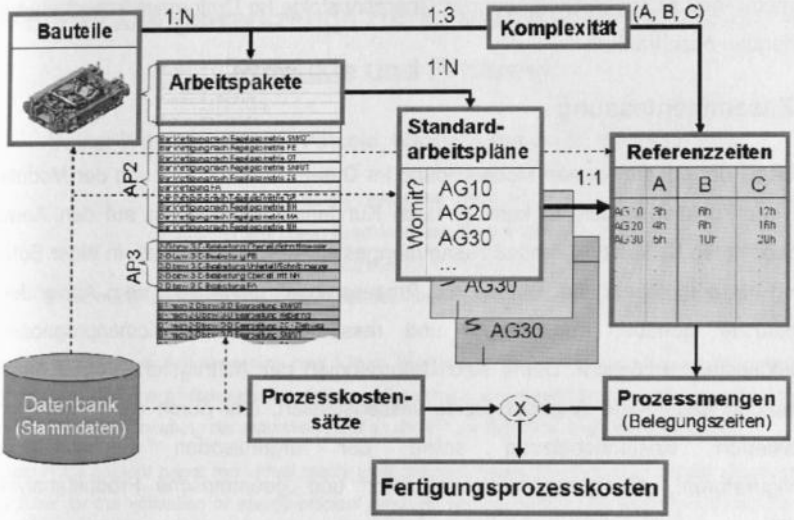


Bild 16: Fertigungsprozesskostenkalkulation

Der Kalkulator erlangt somit die Möglichkeit, neben der Auswahl der benötigten kostenrelevanten Bauteile im Konfigurator auf die Materialkosten (4.1) und durch das Zurückgreifen auf komplexitätsabhängige Referenzzeiten für die Belegungszeit der Betriebsmittel auf die Fertigungskosten des zu kalkulierenden Werkzeugs zu schließen.

4.3 Geometrische Produktanalyse

Die geometrische Produktanalyse beinhaltet eine Grobkalkulation der Materialkosten auf Basis von 3D-Modellen der Kundenartikel (Produkte) aus einem Templatemodell im CAD. Das Templatemodell ist parametrisch-assoziativ aufgebaut, so dass nach Auswahl eines geeigneten Templatemodells die Hauptabmessungen der Hauptelemente automatisch bestimmt und über einen Stücklistenexport des CAD- oder des PDM-Systems in den Konfigurator übertragen werden. Bei Anwendung der Materialkostenmethode kann anschließend aus der Kostenstruktur der gewählten Werkzeugklasse über einen Verteilungsschlüssel auf die übrigen Kostenpositionen geschlossen werden. Das Anwendungsfeld der Templatetechnik bleibt allerdings bisher aufgrund der hohen Werkzeugvielfalt, dem hohen Ressourceneinsatz zur Entwicklung eines geeigneten Templatebaukastens und der starken wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen der

Geometrie des Kundenartikels und der Operationsfolge im Umformwerkzeugbau auf den Formenbau beschränkt.

5 Zusammenfassung

Auf Basis der beschriebenen Modellbildung im Drei-Ebenenkonzept und der Modularisierung der Funktionsbausteine kann je nach Kundenanforderung ein auf den Anwender ausgerichtetes Kalkulationsmodell zusammengestellt werden, welches, in einer Softwarelösung mit entsprechendem Daten- und Prozessmodell umgesetzt, dem Anwender eine IT-gestützte genaue, transparente und ressourceneffiziente Kostenprognose von Produktkosten ermöglicht. Damit sind Unternehmen der Auftragsfertigung in der Lage, verursachungsgerechte Angebotspreise wissensbasiert, d.h. durch die Anwendung der fallbasierten Kostenschätzung sowie der ergänzenden Funktionsbausteine „Konfiguratoren", „Fertigungsprozesskalkulator" und „geometrische Produktanalyse" zu ermitteln.

Als Teil eines phasenübergreifenden Kalkulationsmodells, welches neben der Angebotskalkulation eine entwicklungsbegleitende Kalkulation in Verbindung mit der Integration der Target-Costing-Methodik beinhaltet, können marktkonforme Produktkosten innerhalb des Produktenstehungsprozesses zukünftig besser geplant, gestaltet und gesteuert werden.

Literatur

[1] Konarsky, M., Leidich, E, Götze, U.: Produktkostenkalkulation im Werkzeugbau, interner Projektzwischenbericht an der TU Chemnitz, 2010

[2] Tönshoff, H.-K./ Petzold, J.: Mit Erfolg kalkulieren im Werkzeug- und Formenbau, Unternehmensanforderungen an die Kalkulation – aktuelle Software und Trends, wt Werkstatttechnik online Jahrgang (92), H. 11/12, 2002, S. 568-572

[3] Fischer, J.-O.: Kostenbewusstes Konstruieren, Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess, Berlin Heidelberg, 2008

[4] Kümper, R.: Ein Kostenmodell zur verursachungsgerechten Vorkalkulation, Dissertation an der RWTH-Aachen, Band 18/96, Shaker Verlag, 1996

[5] Konarsky, M.: Untersuchungen der Werkzeugfertigung für Alu-Druckgussteile bei der Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG mit dem Ziel der Standardisierung und der Kostenoptimierung, Diplomarbeit an der Fakultät Maschinenbau, TU-Chemnitz, 2008

[6] Meyer, S.: Verarbeitung unscharfer Informationen für die fallbasierte Kostenschätzung im Angebotsengineering, Dissertation an der TU Chemnitz, Verlag der GUC, 2001

VR-Entwicklungswerkzeuge zur Bewertung energieeffizienter Produkte und Prozesse

Volker Wittstock, Martin Pätzold, Marco Schumann, Janine Glänzel

Technische Universität Chemnitz
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz
Email: martin.paetzold@mb.tu-chemnitz.de; Internet: http://www.tu-chemnitz.de/mb/iwp

Inhalt:. *Im vorliegenden Artikel werden zwei Virtual Reality (VR) Entwicklungswerkzeuge vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Energieflussvisualisierung zur Bewertung energieeffizienter Produkte und Prozesse. Zusätzlich wird eine Anbindung der adaptiven FEM an die VR zur besseren Interaktion behandelt.*

Abstract: *In the present paper two virtual reality tools are introduced. The focus lies on the visualization of energy flows for the validation of energy-efficient products and processes. Additionally a linking between adaptive FEM and VR for improved interaction is treated*

Stichwörter: *Energieflussvisualisierung, adaptive FEM, VR-Kopplung*

Keywords: *visualization of energy flow, adaptive FEM, VR interface*

1 Einleitung

Kürzere Produktlebenszyklen und sinkende Ressourcen führen zunehmend dazu, dass die virtuelle Realität (VR) zur schnellen und kostengünstigen Bewertung des Prototyps im Entwurfsprozess eines Produkts unerlässlich ist. Um die VR zusätzlich als ein Hilfsmittel für die Bewertung von Energieeffizienz nutzbar zu machen, wurde im Rahmen des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkte und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik" (eniPROD) begonnen, zusätzliche VR-basierte Bewertungsmethoden und -werkzeuge zu entwickeln. Während die Energieflussvisualisierung die Anschaulichkeit für Personen außerhalb des eigentlichen Entwicklungsprozesses verbessert, dient die interaktive Verwendung der adaptiven FEM in der VR z. B. der beschleunigten Variantenbewertung.

2 Visualisierung diskreter Mess- und Simulationswerte

Die Visualisierung von Energieflüssen macht es notwendig, Energiedaten zu generieren. Dies erfolgt sowohl mit diskreten Messwerten als auch mit diskreten Simulationswerten.

Für die Produktentwicklung sind jedoch Simulationsdaten zur Verhaltensbewertung des virtuellen Prototyps grundsätzlich besser als Messwerte geeignet. Die interaktive Nutzbarkeit und der Wunsch zur Bewertung von Fragestellungen der Energieeffizienz erfordern, dass ein mathematisches Modell und Bewertungskriterien in die VR-Anwendung integriert sind [1]. Für die damit generierten Daten müssen innerhalb der VR-Entwicklungswerk-zeuge Schnittstellen geschaffen werden. In einem ersten Schritt werden vorerst diskrete Messwerte als Eingabedaten verwendet, die als Textdateien vorliegen. Im Weiteren werden Simulationsmodelle angebunden und simulierte Energiewerte direkt ausgelesen. Durch das Simulationsmodell wird es möglich, eine interaktive Parameteränderung in der VR zu implementieren und die Ergebnisse der erneuten Simulation direkt zu visualisieren. Für die Visualisierung von Energiekenngrößen wurden verschiedene Darstellungen analysiert und bewertet. Hierbei stellten sich drei Varianten heraus: Einfärbung von Bauteilen, Balkendiagramme sowie Energieflussdiagramme (Sankey-Diagramme).

3 Energieflussvisualisierung

3.1 Sankey-Visualisierung

Eine Betrachtung der Vor- und Nachteile in [2] ergab, dass Sankey-Diagramme, die bereits 1896 in [3] für die Analyse einer Dampfmaschine verwendet wurden, am besten für die Darstellung von Energiegrößen geeignet sind. Es existieren verschiedene Programme (z. B.: S.Draw, SankeyEditor), die es ermöglichen eigene Sankey-Diagramme zu erstellen. Die Anwendung von interaktiven Sankey-Diagrammen und der damit verbundenen Hinterlegung von sich verändernden Messwerten ist bereits durch die Anbindung von Microsoft Excel® in kommerziellen Programmen wie e!Sankey oder Sankey Helper verfügbar. Eine Betrachtung von Energieströmen über die Diagrammzweige zwischen den Messstellen sowie eine Level-of-Detail-Implementierung wird in [4] beschrieben. Dadurch werden komplexe Diagrammstrukturen und Zusammenhänge bewertbar.

3.2 3D-Sankey-Diagramme

Voraussetzung

Neben der Werkzeugmaschinengeometrie und den Messdaten bzw. dem Simulationsmodell werden Informationen über die Abhängigkeiten zwischen den Messstellen benötigt.

Die Verknüpfung zwischen Messstelle und dem entsprechenden Kennwert muss zusätzlich angelegt werden. Für die einfache Darstellung der aufgezeichneten Messungen werden diese Zusatzinformationen in einer Datenstruktur hinterlegt, die in einem vorverarbeitenden Schritt in einer Textdatei gespeichert wird. Die interaktive Erstellung der Sankey-Struktur in der VR wurde ebenfalls evaluiert. Mit derzeitigen kommerziellen VR-Interaktionsgeräten und den dafür vorhandenen Interaktionsmetaphern ist jedoch keine präzise Bearbeitung der Diagrammstruktur möglich.

Umsetzung

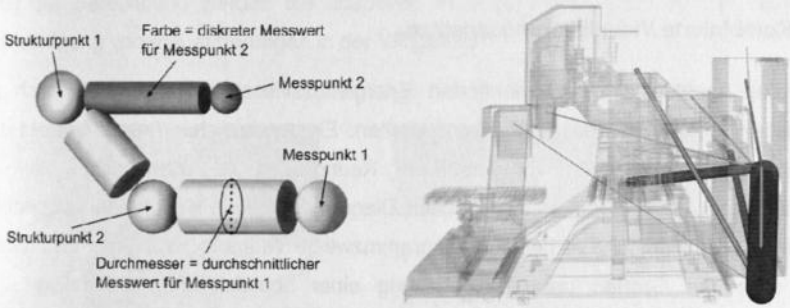


Bild 17: (links) Strukturaufbau eines Diagramms; (rechts) Anwendungsfall an dem BAZ DMP45V

Die Implementierung der Sankey-Diagramme erfolgt über die Programmierschnittstelle der VR-Software. Innerhalb des entstandenen Moduls dienen die Maschinengeometrie, die Energiekennwerte sowie der Strukturaufbau des Diagramms als Eingabewerte.

Dieser Aufbau beinhaltet die Positionen der Messstellen sowie zusätzliche Strukturpunkte für die räumliche Repräsentation der Sankey-Diagrammzweige. Die Positionen dieser Punkte im Anwendungsfall (Bild 17 (rechts)) wurden hauptsächlich anhand des Mittelpunkts der Bauteile ermittelt. Für Messstellen ohne zugehöriges Geometriebauteil oder für räumlich sehr ausgedehnte Bauteile ist es nicht möglich bzw. nicht repräsentativ den Mittelpunkt als Diagrammposition zu verwenden. Hier wurden Abschätzungen zur besseren Darstellbarkeit vorgenommen. Eine automatisierte Erstellung der Punkte ist vorgesehen. Auf die Definition der Struktur- und Messpunkte folgt für den Aufbau des Diagramms eine Definition für jeden Diagrammzweig. Hierbei wird jeder Zweig aus einer Liste dieser Punkte zusammengesetzt. Zusätzlich bekommt der Zweig eine Messstellenbezeichnung, sodass die Energiekennwerte aus den Messungen eindeutig

zugeordnet werden können. Die zusätzlichen Zusammenhänge zwischen Bauteil und assoziierten Diagrammzweigen erlauben die Animation der einzelnen Diagrammzweige, wenn die jeweiligen Bauteile transformiert werden.

Die Generierung der 3D-Diagrammrepräsentation, die sich aus den geometrischen Grundkörpern Kugel und Zylinder zusammensetzt, erfolgt nun mithilfe der hinterlegten Struktur. Die Eigenschaften dieser Grundkörper werden zur Darstellung der Messungen verwendet. Die Farbe des Diagrammzweigs entspricht der Messung zu einem konkreten Zeitpunkt, während der Durchmesser den Durchschnitt des Messwertes über den gesamten Erfassungszeitraum der Messung abbildet (**Bild 17** (links)).

3.3 Kombinierte Visualisierungsansätze

Aus der Analyse der implementierten Energieflussvisualisierung ergeben sich neue Aufgaben für die weiteren Forschungsarbeiten. Ein wesentlicher Ansatz besteht in der gleichzeitigen Darstellung von mehreren Kenngrößen (z. B.: Schein-, Wirk- und Blindleistung), da dies einem zusätzlichen Diagramm für jede Kenngröße entspricht und somit das Problem der verdeckten Diagrammzweige verstärkt wird. Eine Visualisierung von mehreren Größen unter Beibehaltung einer übersichtlichen Darstellung ist zu erforschen. Ein weiterer Ansatz ergibt sich aus der Farbdarstellung von Messwerten. Die Abbildung der Messwerte auf die Farbe der Diagrammzweige lässt kein Erkennen von präzisen Werten zu. In einem ersten Schritt wurden in einer 2D-GUI Einstellungsmöglichkeiten zum manuellen Setzen von Maximum und Minimum des abzubildenden Messbereichs für die Kenngröße implementiert. Es ist zu untersuchen, ob andere Techniken wie lokale Durchschnittsbildung, Diskretisierung des Wertebereichs oder nichtlineare Abbildung der Messwerte besser geeignet sind. Die Implementierung hat gezeigt, dass die zusätzliche Dimension bei der Transformation des Sankey-Diagramms von 2D- zu 3D-Eigenschaften zu einer missverständlichen Interpretation führen kann, da kein linearer Zusammenhang vorliegt. Inwieweit die Entscheidungsfindung durch die visuelle Wahrnehmung beeinflusst wird, soll mittelfristig unter psychologischen Gesichtspunkten evaluiert werden. Durch die herausgestellten Nachteile erscheint die Weiterentwicklung eines gemischten Ansatzes aus Elementen der Sankeydarstellung und der Bauteileinfärbung als vielversprechend.

4 Interaktive adaptive FE-Simulation in einer VR-Umgebung

Ein Ansatz, die stetig steigende Komplexität der Berechnung und Optimierung besser zu handhaben, ist die adaptive FEM. Projektziel ist es, trotz steigender Modellgröße, aus einer VR-Umgebung heraus, interaktiv Parameteränderungen vorzunehmen und Berechnungsergebnisse zu evaluieren. Die dafür entwickelte nicht kommerzielle adaptive FEM-Methode [6] kann zur Unterstützung bei der Produktentwicklung für Spezialfragestellungen eingesetzt werden, welche herkömmliche FEM-Software nur mit geringerer Genauigkeit oder extremer Rechenzeitintensität lösen kann [2]. Neben dem Aspekt der Berechnung werden die adaptiven FE-Algorithmen auch für die deutliche Beschleunigung von Visualisierungen in der VR genutzt.

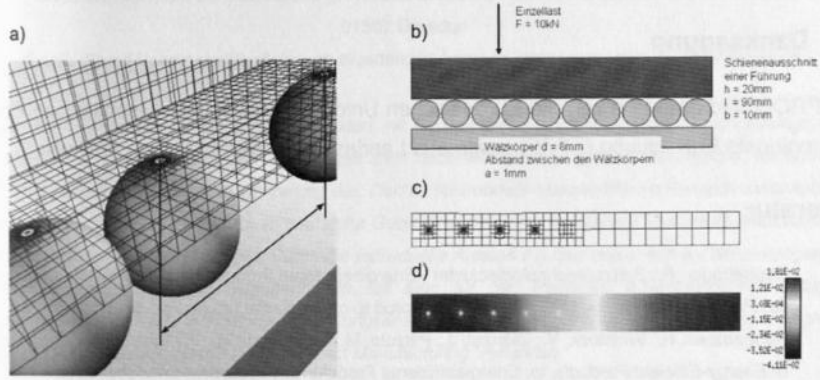


Bild 18: a) interaktive Parameteränderung, z. B. Kugelabstand; b) Modellaufbau; c) fehlergesteuerte adaptive Netzverfeinerung der Kugelkontaktzonen; d) Kugelkontaktdruckdarstellung

Bild 18 zeigt links die interaktive Veränderung des Kugelabstandes und rechts die Lasteinwirkung einer Kraft auf eine Linearführung. Durch die Verwendung der adaptiven FEM konnte für dieses Simulationsmodell gegenüber ANSYS-Classic ein Zeitvorteil pro Rechnung von 1:33 ermittelt werden.

Zur Steuerung der adaptiven FEM aus der VR-Umgebung heraus, wurde eine Programmierschnittstelle für das FEM-Linuxprogramm entworfen, welches keine API besitzt. Jegliche Eingaben werden von der Tastatur erwartet und die Ergebnisse in Textdateien geschrieben. Der Einsatz von Pipelining ermöglicht das Emulieren eines Nutzers, indem die Standardein- und Standardausgabeströme eines Kindprozesses so abgeändert werden, dass diese mit dem Elternprozess Daten austauschen. Implementiert

wurde ein Server-Programm, welches durch diese Technik das adaptive FEM-Programm nutzt, um seinen Clients Simulationsrechnungen zu ermöglichen. Der FEM-Server kommuniziert über das Netzwerk mit seinen Clients und nutzt die vorgestellte Pipelining-Technik, um die FE-Simulation zu steuern. Die Clients fordern nach erfolgreicher Iteration die Ergebnisdaten an und werten diese aus. Ein VR-Plugin beispielsweise liest Netzdaten und Spannungsverläufe ein, um diese in der VR-Umgebung darzustellen. Das Interaktionsgerät ist ein Smartphone, mit dem sich die Iterationsdurchläufe des FEM-Programms steuern lassen. Verändert werden Simulationsparameter, welche durch die Tastatur des Smartphones für den Nutzer einfach zu handhaben sind. Durch die Geschwindigkeitsvorteile der adaptiven FEM kann das neue Simulationsergebnis zeitnah visualisiert werden.

5 Danksagung

eniPROD wird gefördert von der Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen.

Literatur

[1] Neugebauer, R.: Spitzentechnologiecluster »Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik«, URL: http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/ (abgerufen am 8. Juli 2010)

[2] Neugebauer, R.; Wittstock, V.; Glänzel, J.; Pätzold, M.; Schumann, M.: *VR-tools for the Development of Energy-Efficient Products.* In: Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik: 1. Int. Kolloq. eniPROD, Chemnitz, 2010, S. 657-676 – ISBN 978-3942267007

[3] Sankey, H. R.: *The Thermal Efficiency of Steam-Engines.* In: M.P.I.C.E. Vol. 125, 1896, S. 182-242

[4] Riehmann, P.; Hanfler M.; Froehlich, B.: *Interactive Sankey Diagrams.* In: Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis 05), Washington DC, 2005, S. 233-240

[5] Neugebauer, R.; Wittstock, V.; Glänzel, J.; Schumann, M.: Adaptive Finite-Elemente-Methode zur Lösung spezieller Auslegungsprobleme des Maschinenbaus und zur Erweiterung von Virtual Reality-Technologien. In: 9. Paderborner Workshop, Paderborn, 2010

[6] Beuchler, S.; Meyer, A.; Pester, M.: SPC-PM3AdH v1.0-Programmer's Manual. Preprint SFB393/01-08, Chemnitz, 2003

Festigkeits- und verformungsoptimierte Gestaltung konturidentischer Implantate für die Fertigung im Direct Manufacturing

Philipp Sembdner, Christine Schöne, Ralph Stelzer, Bernd Reitemeier*

Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
01062 Dresden
Email: Philipp.Sembdner@tu-dresden.de; Internet: http://www.tu-dresden.de

*Universitätsklinikum der Technische Universität Dresden, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
01307 Dresden
Email: Bernd.Reitemeier@uniklinikum-dresden.de; Internet: http://www.uniklinikum-dresden.de

Inhalt: *Die Rekonstruktion von Knochendefekten mit Implantaten aus biokompatiblen Hochleistungswerkstoffen wie z.B. Reintitan oder Titanlegierungen stellt nach wie vor eine große medizinische, konstruktive und produktionstechnische Herausforderung dar. Derzeit verwendete standardisierte Rekonstruktionsplatten offenbaren durch die wenig individuell gestaltete Geometrie deutliche funktionale und strukturmechanische Defizite sowie ästhetische Nachteile. Durch die individuelle Anpassung des Implantats an die jeweiligen geometrischen und elastischen Gegebenheiten soll eine für den Patienten lebensgerechtere Situation geschaffen werden. Neue technologische Lösungsansätze für die Fertigung dieser kontur- und steifigkeitsangepassten Implantate bieten dabei die Direct Manufacturing Verfahren.*

Abstract: *The reconstruction of bone defects using implants made of biocompatible high-performance materials like titanium or titanium alloys is still regarded as a great challenge for medicine, design and production engineering. As a rule, the reconstruction plates that have been used up to now have an only slightly individually shaped geometry. The implant thus suffers from functional and mechanical structure deficiencies, as well as aesthetic disadvantages. The individual adaptation of the implant to the corresponding geometric and elastic circumstances should better meet the needs of the patient. The Direct Manufacturing provide new technological approaches to fabricate these contour- and stiffness-adapted implants.*

Stichwörter: *Individuelles Implantat, Titan, Direct Manufacturing, Computertomografie, CAD, Biomechanik*

Keywords: *Individual implant, Titanium, Direct Manufacturing, Computer tomography, CAD, Biomechanics*

1 Einleitung

Die erfolgreiche operative Versorgung von Knochenfrakturen erfordert eine exakte anatomische Reposition der Knochenbruchfragmente, deren funktionsstabile Fixierung sowie

die Möglichkeit der frühzeitigen aktiven Mobilisierung. In den letzten Jahren hat sich die Verwendung von standardisierten Osteosyntheseplatten durchgesetzt. Die für eine optimale Heilung geforderte gewebeschonende Applikation bei gleichzeitiger Stabilität wird jedoch in der Summe von keinem der bisher verfügbaren Verfahren erfüllt [5].

Besondere Vorteile lassen sich hier durch die Gestaltung neuartiger filigraner konturidentischer und gradiert steifigkeitsangepasster Implantate erzielen. Durch die Anpassung des Implantats an die jeweiligen geometrischen und elastischen Gegebenheiten können z.B. Ermüdungsbrüche des Implantats, die während der Neubildung des Knochengewebes auftreten, gezielt verhindert werden. Das zusätzliche Einbringen von knochenwachstumsfördernden Strukturen erhöht zudem die Zuverlässigkeit bei der Knochenheilung. Zielstellung ist die vollständige Wiederherstellung der knöchernen Struktur. Der Knochen soll nach der Regeneration die auftretenden Lasten wieder selbst aufnehmen können. Das Implantat verbleibt dabei dauerhaft im Körper.

Erste technologische Lösungsansätze für die Fertigung dieser Implantate bieten generative Fertigungsverfahren. Die generativen Verfahren haben in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht. Inzwischen ist es möglich, nicht nur Prototypen (Rapid Prototyping) zu erstellen, sondern auch Objekte, die für den direkten Einsatz vorgesehen werden können (Direct Manufacturing). Die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Verfahren zur Erzeugung individueller Implantate konnte bereits nachgewiesen werden.

In diesem Beitrag sollen erste Ergebnisse für die Gestaltung konturangepasster Implantate am Unterkiefer für die Fertigung im Direct Manufacturing vorgestellt werden.

2 Grundlagen

Bedingung für die Modellierung konturidentischer Implantate ist die Kenntnis über die Gestalt des zu rekonstruierenden Knochens. Ausgangspunkt sind CT-Schichtbilddaten des relevanten Knochenbereiches, die im Anschluss an eine Segmentierung, d.h. der Trennung von Materialien unterschiedlicher Dichte wie z.B. Weichteilgewebe und Knochen, in ein facettiertes 3D-Modell überführt werden. Anhand dieser diskreten 3D-Daten wird ein Volumenmodell erstellt, das dann bei der rechnergestützten Konstruktion (CAD) als Basis für die Modellierung des Implantats zur Verfügung steht.

Vor der Implantation eines Knochenersatzelementes ist es notwendig, den defekten Kieferbereich operativ zu entfernen. Die dazu erforderlichen Schnittebenen werden am vorliegenden Kiefermodell im CAD-System in Abhängigkeit der Zahnstellung definiert. Die Lage

der Schnittebenen werden dem Operateur in Form von Schnittschablonen vorgegeben (Bild 5). Die Schnittschablonen sind zweigeteilt und werden am Knochen verspannt.

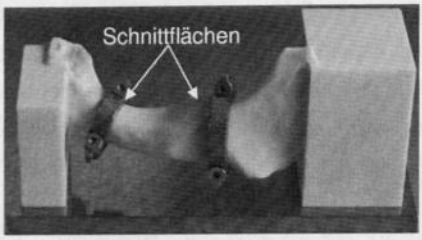


Bild 5: Modell eines Unterkiefersegments mit montierten Schnittschablonen

3 Gestaltung und Fertigung

Bisherige Modellierungen konturidentischer Implantate gehen von einem der Natur nachempfundenen Aufbau, bestehend aus einer äußeren Tragschalenkonstruktion und einer inneren filigranen Stützstrukturkonstruktion, aus.

Die äußere Hüllgeometrie entspricht der Form des herausgetrennten Kiefersegments. Sie repräsentiert die feste äußere Knochenschicht (Kortikalis) und ist der maßgebliche kraftaufnehmende Teil des Implantats. Die Auslegung der Hüllstruktur erfolgt in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Restknochens. Gestaltungsmöglichkeiten ergeben sich aus der Variation der Wandstärke oder dem gezielten Einbringen von Fehlstellen in die Hüllstruktur.

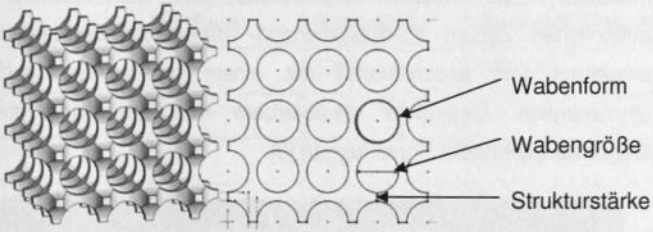


Bild 6: Beispiel einer Stützstruktur mit beschreibenden Parametern [3]

Die innere filigrane Stützstruktur hat primär die Anregung des Zellwachstums nach der erfolgten Operation zur Aufgabe. Sie stellt die innere schwammartige Knochenschicht (Spongiosa) dar. Diese filigranen Strukturen können geometrisch unterschiedlich ausgeprägt, mit stochastischen Fehlstellen ausgestattet und verschieden dimensioniert sein. Wabenförmige Filigranstrukturen in Abhängigkeit beschreibender Parameter (Bild 6) sind

Ergebnisse erster Untersuchungen. Die Wabenform basiert dabei auf geometrischen Primitiven wie Kugeln oder Quadern. Die Strukturstärke ist ein Maß für die minimale Materialbreite. Die Porosität der inneren Stützstruktur wird über die Wabengröße bestimmt.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Implantatgestaltung ist die Anbindung an den Restkieferknochen. Die derzeit aktuelle Vorgehensweise legt eine auf die äußere Unterkieferkontur aufgesteckte Variante als Basis zugrunde (Bild 7 links). Dazu bedarf es jedoch bei der Operation selbst umfangreicher Maßnahmen zur Vorbereitung des Unterkieferknochens im Schnittbereich. Die äußere Knochenschicht des Restkiefers muss dabei im Bereich der Überlappung um den Betrag der Wandstärke des Implantats abgetragen werden, um eine konturgetreue Anpassung zu ermöglichen.

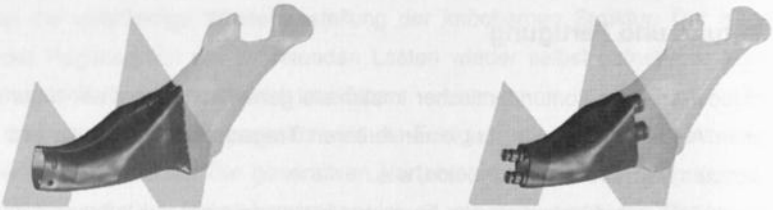


Bild 7: CAD-Implantatmodelle mit möglichen Anbindungstechnologien und definierte Schnittebenen - Links: äußere Befestigung am Restknochen, Rechts: innere Befestigung im Knochen

Eine Alternative stellt die in Bild 7 rechts abgebildete Variante dar, wobei das Implantat in den Knochen eingeschoben wird. Dazu werden die am Implantat befindlichen Zapfen in entsprechend vorbereitete Bohrungen am Unterkiefer eingeführt und anschließend mit einem geeigneten Knochenersatzmaterial einzementiert. Geeignete resorbierbare Knochenzemente sind jedoch noch Gegenstand aktueller Forschungen [6].

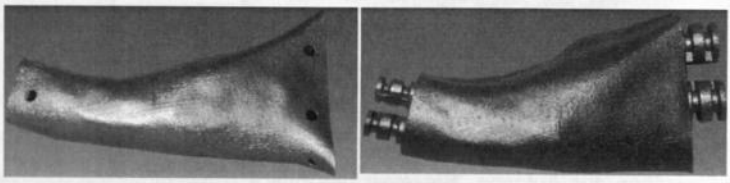


Bild 8: Im Direct Manufacturing gefertigte Unterkieferimplantate

Derzeit werden vor allem konventionelle Fertigungsverfahren, wie spanende, umformende bzw. urformende Verfahren zur Herstellung von Implantaten verwendet. Diese sind jedoch

hinsichtlich ihrer geometrischen Komplexität limitiert [1]. Generative Fertigungsverfahren eignen sich im Gegensatz dazu hervorragend für die Fertigung komplexer Geometrien und innerer Hohlstrukturen. Bild 8 zeigt zwei Unterkieferimplantate, die im Direct Manufacturing hergestellt wurden.

4 Ermittlung der mechanischen Stabilität

Neben der konturtreuen Gestaltung der Implantate ist die Überprüfung hinsichtlich ihrer Festigkeit und Steifigkeit elementar. Da bereits rechnergestützte Daten vorliegen, ist die Methode der Finiten Elemente (FEM) ein sehr effizientes Werkzeug, um Aussagen zur mechanischen Stabilität zu treffen.

Zur Ermittlung erster Erkenntnisse wurde ein einfaches Berechnungsmodell aufgestellt. Dazu wurden die Bereiche am Kieferwinkel und an den Kiefergelenkkapseln fest eingespannt und eine Kaukraft punktuell im Seitenzahnbereich aufgebracht. Für die Kaukraft wurde ein fester Wert von 300N angenommen. Dieser Wert wird in der Literatur mehrheitlich angegeben [4]. Die Kraft wird in Kieferschlussposition auf den Unterkiefer eingeleitet. Die Bestimmung von Materialkennwerten der knöchernen Strukturen erwies sich weniger eindeutig, da sie von verschiedenen Faktoren abhängig und somit in der Literatur nicht einheitlich angegeben sind [2][7]. In Tabelle 1 sind die gewählten Kennwerte abgebildet.

Tabelle 1: Zur Berechnung herangezogene Werkstoffkennwerte

	Kortikalis	Spongiosa	Implantat (Reintitan)
E-Modul (N/mm²)	13300	1330	105000
Poissonzahl v	0,22	0,22	0,33
Dichte (kg/m³)	1200	400	4500
Max. Zugfestigkeit (N/mm²)	150	2	440

Es stellte sich heraus, dass die Stabilität der bisher getesteten Implantatvarianten gewährleistet ist. Die Steifigkeit, d.h. die Verformung des Unterkiefers mit Implantat bei Belastung liegt im Bereich der Verformung des nicht resezierten Knochens. Dies ist im Elastizitätsmodul des verwendeten Werkstoffs Titan begründet, der dem E-Modul des Knochens von allen metallischen Werkstoffen am nächsten kommt.

5 Resümee und Ausblick

Die vorgestellten Konstruktionsvarianten zeigen einen ersten Einblick, individuelle und komplexe Geometrien mittels generativer Fertigungsverfahren herzustellen. Bislang wurden Implantationsversuche an acht Unterkiefern von Schweinekadavern und zwei menschlichen Leichenunterkiefern durchgeführt.

Schwerpunkt aktueller Forschungen ist die rechnergestützte Modellierung innerer filigraner Stützstrukturen, die das Zellwachstum fördern. Zielstellung zukünftiger Tätigkeiten soll hierbei auch die effiziente und automatisierte Erstellung solcher Strukturen im CAD sein.

Wesentlich für die Funktion des Implantats ist die stabile Anbindung an den Restknochen. Hierfür werden im Beitrag mögliche Konstruktionsvarianten genannt. Dabei sind z.B. auch Festigkeit, Biokompatibilität und Operationsbedingungen zu berücksichtigen. Zukünftige Tests sollen die Stabilität dieser Verbindungen klären. Dazu ist derzeit die Entwicklung eines Versuchsstandes für die Prüfung am Modellkiefer in Arbeit. Mit diesem können ebenso die Ergebnisse aus FE-Analysen validiert werden.

Literatur

[1] Wirtz, T. P.: *Herstellung von Knochenimplantaten aus Titanwerkstoffen durch Laserformen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, Aachen 2005

[2] Maurer, P. G. W.: *Klinische und computergestützte Studie zur Designoptimierung von Unterkieferrekonstruktionsplatten*, Universitätsklinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Habilitation, Halle (Saale) 2004

[3] Undeutsch, J.: *3D-Modellierung und Belastungsrechnungen von filigranen Implantatstrukturen*, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Diplomarbeit, Dresden 2010

[4] Schupp, W.: *Biomechanische Testung verschiedener Osteosynthesesysteme bei Unterkieferkontinuitätsresektion*, Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Albert-Ludwigs Universität Freiburg i. Br., Dissertation, Freiburg 2005

[5] Schieferstein, H.: *Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems*, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München, Band 180, München 2003

[6] Henning, S.: *Morphologie und Mikromechanik von Knochen und neuartigen, partiell resorbierbaren Knochenzementen*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Dissertation, Halle (Saale) 2006

[7] Lang, J.; Erdmann, B.; Kober, C., Deuflhard, P.; Zeilhofer, H.-F.; Sader, R.: *Effiziente und zuverlässige Finite-Elemente-Methoden zur Simulation des menschlichen Unterkiefers*, Berichte des IZWR, Band 1, S. 49-57, Jena 2003

Anforderungen an die Wissensakquisitionskomponente eines selbstlernenden Assistenzsystems

Sebastian Röhner, Thilo Breitsprecher, Sandro Wartzack

Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Martensstraße 9, 91058 Erlangen
Email: roehner@mfk.uni-erlangen.de; Internet: http://www.mfk.uni-erlangen.de

Inhalt: *Wissensbasierte Systeme bieten Produktentwicklern Hilfestellung bei nicht wertschöpfenden Tätigkeiten. Der erwartete Erfolg dieser Systeme ist jedoch infolge der Schwierigkeit bei der Wissenspflege bis heute nicht eingetreten. Als Grund hierfür sind die eingesetzten Methoden der Wissensakquisition anzusehen. Lediglich eine automatische Wissensakquisition scheint Potential zu bieten, diesem Problem zu begegnen. In diesem Beitrag werden die Anforderungen an eine automatische Wissensakquisitionskomponente eines selbstlernenden Assistenzsystems erhoben.*

Abstract: *Knowledge-based systems give design engineer assistance for non value adding activities. The expected success of those systems doesn't occur as a result of the aging of their underlying knowledge. Here the used methods of knowledge acquisition can be identified as a main reason. Merely an automatic knowledge acquisition presents potential to solve this problem. In this article requirements on the knowledge acquisition facility of a self learning engineering assistance system are gained.*

Stichwörter: *Wissensbasierte Systeme, Wissensakquisition, Data Mining.*

Keywords: *Knowledge-based systems, knowledge acquisition, data mining.*

1 Einleitung

Der Produktentwicklungsprozess ist ein informations- und wissensgetriebener Prozess, da sich in dessen einzelnen Phasen immer wieder neue Problemstellungen ergeben, die infolge der Erhebung und Verarbeitung von neuen Informationen und Wissen gelöst werden müssen [1, 2]. Laut [1] gehören diese Aktivitäten zu den indirekten und somit zu den nicht wertschöpfenden Tätigkeiten eines Produktentwicklers, die es bzgl. des Spannungsfeldes Qualität, Zeit und Kosten zu reduzieren gilt.

In den vergangenen zwei Dekaden sind aus diesem Grund mehrere verschiedene wissensbasierte Systeme für die unterschiedlichsten konstruktionstechnischen Problemstellungen entwickelt worden. Diese Systeme boten dem Benutzer zunächst sinnvolle Hilfestellungen, jedoch veralterte deren Wissensbasis aufgrund sich ändernder Anwendungsbedingungen und unzureichender Aktualisierung, was letztendlich deren

industriellen Einsatz, trotz der Bedeutung von Wissen in der heutigen Zeit, verhinderte. Als Ursache sind hierfür die herangezogenen Methoden der Wissensakquisition anzusehen.
Zur Gewährleistung einer aktuellen und leistungsfähigen Hilfestellung für den Produktentwickler - auch bei sich ändernden Randbedingungen - ist eine automatische Wissensakquisition für wissensbasierte Systeme unabdingbar. Im Rahmen des Teilprojektes B1 des SFB Transregio 73 wird ein selbstlernendes Assistenzsystem entwickelt, das mit Hilfe von Methoden des Data Mining Wissen automatisch aus Daten akquiriert. Um die in Frage kommenden Verfahren aus den Bereichen der Statistik, des maschinellen Lernens sowie der künstlichen Intelligenz, wie z. B. Künstliche Neuronale Netze, Entscheidungsbäume, Support Vector Machine oder k-Nearest Neighbour, vergleichend gegenüberstellen und bewerten zu können, werden in diesem Beitrag Anforderungen an diese Methoden erhoben.

2 Wissensakquisition im Kontext wissensbasierter Systeme

Wissensbasierte Systeme, häufig in der Literatur als Expertensysteme oder Assistenzsysteme bezeichnet, stellen Softwaresysteme dar, die infolge ihres zugrunde liegenden Domänenwissens in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten für die verschiedensten Problemlösungsklassen herangezogen werden. In der Produktentwicklung leisten diese bspw. Hilfestellung bei Dimensionierungsberechnungen sowie beim fertigungs- und montagegerechten Konstruieren. [3]

2.1 Methoden der Wissensakquisition

Die bestehenden Methoden zur Akquirierung von Wissen können prinzipiell der direkten, indirekten oder automatische Wissensakquisition zugeordnet werden. Bei der direkten Wissensakquisition synthetisiert der Experte sein Wissen mit Hilfe einer intelligenten Akquisitionskomponente, wohingegen bei der indirekten Wissensakquisition ein Wissensingenieur den Part des Akquisitionswerkzeugs übernimmt. Der Wissensingenieur bzw. die Akquisitionskomponente besitzt die Aufgabe Wissen zu erheben, zu strukturieren und in eine rechnerverarbeitbare Form überzuführen. Im Gegensatz zur direkten und indirekten Wissensakquisition wird bei einer automatischen Wissensakquisition das Wissen nicht von einem Experten erworben, sondern aus Fallbeispielen oder aus einer textuellen Wissensquelle, wie z. B. Texte, Bücher, usw. extrahiert. [4]

2.2 Problematik der Wissensakquisition

Ein methodenübergreifendes Problem besteht in der Schwierigkeit der Identifikation und Verfügbarkeit von Wissensquellen. Dies wird bei der Erhebung von personengebundenem Wissen durch die Tatsache verstärkt, das eine Bereitschaft beim Wissensträger zur Wissensoffenbarung vorliegen muss. Dies kann er aus Gründen der Unsicherheit bzgl. seiner Wissensqualität, der Angst vor Ideenraub oder Angst vor Austauschbarkeit verweigern. [5]

Eine weitere Schwierigkeit bei der Akquisition von menschlichem Wissen liegt in der Tatsache, dass lediglich ein begrenzter Teil des Wissens in expliziter, d. h. in formalisierbarer und strukturierter, Form vorliegt. Ein Großteil des Wissens ist implizit und somit nur bedingt formalisierbar, da dieses auf Erfahrungen sowie Kenntnissen basiert und meist nur situationsbedingt abrufbar ist. [3, 5] Die hieraus hervorgehende Problematik der Verbalisierbarkeit und Formalisierbarkeit von Wissen führt zu einer unvollständigen und inkonsistenten Wissensakquisition, wobei dies zusätzlich bei der indirekten Wissensakquisition Verständnisprobleme zwischen Wissensingenieur und Experte hervorrufen kann.

Weiterhin sind die Methoden der direkten und indirekten Wissensakquisition im Vergleich zu denen der automatischen Wissensakquisition als sehr zeit- und kostenaufwendig anzusehen, da diese einen oder mehrere Wissensträger erfordern. Der Kosten- und Zeitfaktor wird zudem bei der indirekten Wissensakquisition durch die Notwendigkeit eines Wissensingenieurs erhöht.

2.3 Automatische Wissensakquisition via Data Mining

Im Rahmen des SFB Transregio 73 wird eine neue Fertigungstechnologie, die Blechmassivumformung, zur Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen aus Feinblechen entwickelt. Eine solche Verfahrensentwicklung bedingt die Durchführung von numerischen und experimentellen Versuchsreihen. Die hierfür notwendigen Simulationsmodelle und Versuchsaufbauten werden von Fertigungsspezialisten unter Anwendung ihres Wissens, das sich aus theoretischem Fachwissen und heuristischem Erfahrungswissen zusammensetzt, erstellt. Die aus den Versuchsstudien hervorgehenden Versuchsdaten resultieren daher aus den Erfahrungen und Kenntnissen der Fertigungsexperten und repräsentieren somit das Expertenwissen implizit.

Die Extraktion dieses Expertenwissens und dessen Transformation in explizites Wissen ist die Aufgabe des selbstlernenden Assistenzsystems, welches simultan zu den Fertigungsprozessen der Blechmassivumformung entwickelt wird. Diesen Aufgaben wird das Assistenzsystem infolge seines Selbstlernaspektes gerecht. Das Selbstlernen, das als automatische Akquisition, Aktualisierung sowie Anpassung von Informationen und Wissen zu verstehen ist, wird mit Hilfe von Data-Mining-Methoden realisiert. Diese Methoden sind infolge einer Datenanalyse zu einer automatischen Wissensakquisition fähig. (vgl. Bild 1)

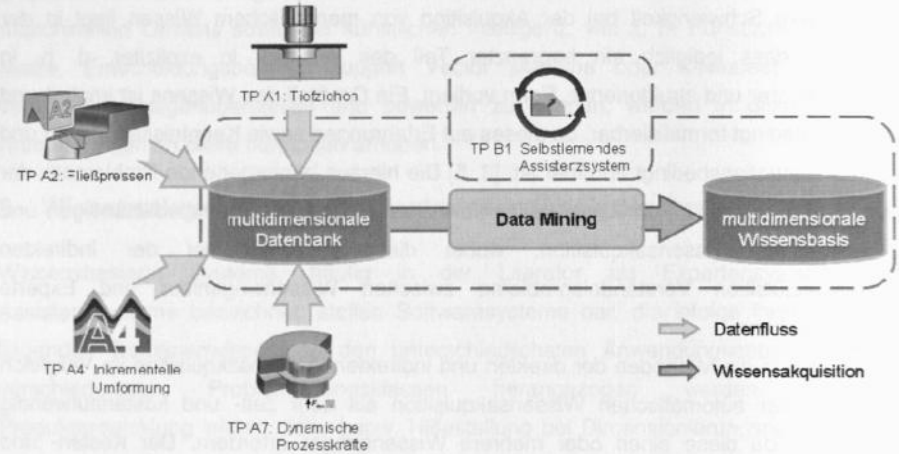


Bild 1: Datenfluss im SFB Transregio 73 und Wissensakquisition via Data Mining

Data Mining Methoden stammen aus den Disziplinen der Statistik, des maschinellen Lernens sowie der künstlichen Intelligenz. Das Aufgabenspektrum dieser Methoden umfasst prädiktive und beschreibende Analysen. Prognosemethoden sind in der Lage infolge einer Datenanalyse ein Modell zu entwickeln, das aufgrund der Analyse eines Eingabevektors eine Ergebnisvariable prognostiziert. Beschreibende Methoden hingegen zielen darauf ab, vorher unbekannte Muster im Datensatz oder Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Datenobjekten zu erkennen. [6]

3 Anforderungen an eine automatische Wissensakquisitionskomponente (WAK)

Die in 2.2 genannten Nachteile der direkten und indirekten Wissensakquisition sind als wesentliche Gründe für das bisherige Scheitern wissensbasierter Systeme in der Produktentwicklung aufzufassen, da mit diesen Methoden eine notwendige Wissenspflege zu zeit- und kostenaufwendig sowie zu fehleranfällig ist. Lediglich eine automatische Wissensakquisition bietet Potential dieser Problematik entgegenzuwirken. Vorraussetzung hierfür ist jedoch die Verfügbarkeit von Fallbeispielen sowie die permanente Durchführung der Wissensakquisition. Infolge der Forschungsaktivitäten im Rahmen des SFB Transregio 73 wird die Forderung nach der Verfügbarkeit von Fallbeispielen erfüllt, da mit der Entwicklung von Fertigungsverfahren die Generierung von Versuchsdaten einhergeht. Die Realisierung einer permanenten Wissensakquisition ist die Aufgabe des selbstlernenden Assistenzsystems, welches verschiedene Methoden des Data Mining als Wissensakquisitionskomponente (WAK) nutzt. Die WAK muss folgende tolerierten (TF) und festen (FF) Forderungen erfüllen:

automatischer Wissenserwerb (FF): Die WAK muss in der Lage sein infolge einer Analyse von Fallbeispielen Wissen automatisch zu extrahieren.

Prognose von qualitativen und quantitativen Ergebnisgrößen (FF): Infolge des akquirierten Wissens müssen bei gegebenen Eingabedaten Aussagen bspw. hinsichtlich Herstellbarkeit, maximalen Umformgrad oder Formfüllungsgrad getroffen werden können.

Ableitung von Gestaltungshinweisen bzw. Gestaltungsregeln (TF): Die WAK muss infolge der Analyse von Fallbeispielen Gestaltungshinweise bzw. Gestaltungsregeln extrahieren.

Unterstützung bei den Phasen des Wissenserwerb (FF): Die WAK muss dem Benutzer bei den verschiedenen Phasen des Wissenserwerbs assistieren, d. h. von der Lokalisierung der Wissensquellen über die Erhebung, Strukturierung und Formalisierung des Wissens bis hin zur Implementierung in der Wissensbasis.

Unterstützung bei der Wissensbasispflege (FF): Um einer Wissensalterung entgegenzuwirken, muss die WAK dem Benutzer bei der Wissensbasispflege, d. h. bei deren Erweiterung, Modifikation sowie Aktualisierung, unterstützen.

Aussagen bzgl. Wissensgüte (FF): Es müssen quantifizierbare Aussagen über die Qualität des in der Wissensbasis abgelegten Wissens getroffen werden können.

Robustheit gegenüber Ausreißern und Fehlwerten (FF): Die WAK muss Robustheit gegenüber Ausreißern und Fehlwerten in den Daten aufweisen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Während eines Produktentwicklungsprozesses können wissensbasierte Systeme dem Produktentwickler bei Tätigkeiten wie bspw. Wissensbeschaffung entlasten. Der Erfolg dieser Systeme in der Praxis ist infolge der Problematik bei der Wissenspflege, trotz der Bedeutung von Wissen in der heutigen Zeit, nicht eingetreten. Diese Tatsache ist auf die angewandten Methoden der Wissensakquisition zurückzuführen. Mit einer automatischen Wissensakquisition in Form von Datenanalysen via Data Mining kann dieser Problematik jedoch begegnet werden. In diesem Beitrag wurden Anforderungen an die Wissensakquisitionskomponente eines selbstlernenden Assistenzsystems erhoben, um im nächsten Schritt die verschiedenen Data Mining Methoden vergleichend gegenüberstellen und letztendlich die bestmöglichste Auswahl von Methoden treffen zu können.

Danksagung

Dieser Beitrag ist im Rahmen des SFB Transregio 73 „Umformtechnische Herstellung von komplexen Funktionsbauteilen mit Nebenformelementen aus Feinblechen – Blechmassivumformung" entstanden, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

Literatur

[1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[2] Kohler, Rudolph: *Strukturierung von Konstruktionswissen.* In: Konstruktion, 42, 1990, S. 85-90

[3] Wartzack, Sandro: *Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte.* Universität Erlangen- Nürnberg, Dissertation, 2000. – ISBN 3-18-333601-4

[4] Spur, Günter; Krause, Frank-Lothar: *Das virtuelle Produkt : Management der CAD-Technik.* 1. Aufl. München, Wien: Hanser, 1997. – ISBN 3-446-19176-3

[5] VDI 5610 Teil 1 04.09: *Wissensmanagement im Ingenieurswesen : Grundlagen, Konzepte, Vorgehen.*

[6] Tan, Pang-Ning; Steinbach, Michael; Kumar, Vipin: *Introduction to Data Mining.* 1. Aufl. Boston: Pearson Education, 2006. – ISBN 978-031321367

Ein rechnerunterstützter Produktentwicklungsprozess für flächige Blechbauteile mit Verzweigungen

Anselm Schüle, Thomas Rollmann, Reiner Anderl

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion
Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt
Email:{schuele, rollmann, anderl}@dik.tu-darmstadt.de; Internet: http://www.dik.tu-darmstadt.de/

Inhalt: *Im Sonderforschungsbereich 666 wird seit 2005 die Technologie des linearen Spaltprofilierens entwickelt. Bei diesem neuartigen Fertigungsverfahren wird die Kante eines Blechbandes so umgeformt, dass ein Y-Profil entsteht. In der ersten Phase lag der Forschungsschwerpunkt auf der Entwicklung, Fertigung und Bewertung integral verzweigter Blechprofile. In der zweiten Förderperiode werden nun flächige Blechbauteile mit Verzweigungen entwickelt. In diesem Beitrag wird eine Modellierungsmethodik für derartige Blechbauteile vorgestellt.*

Abstract: *Within the Collaborative Research Center 666 the technology of linear flow splitting is topic of research since 2005. This manufacturing method enables the cleaving of sheet metal strips by plastic deformation. This article describes a modeling method for bifurcated sheet metal products based on modeling features.*

Stichwörter: *Spaltprofilieren, Algorithmenbasierte Produktentwicklung, 3D-CAD*

Keywords: *Linear flow splitting, algorithm-based product development, 3D-CAD*

1 Einleitung

Im Sonderforschungsbereich 666 werden seit 2005 Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung, Produktion und Prüfung integral verzweigter Blechbauweisen entwickelt. Grundlage dieser Forschungsarbeit stellt das am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) entwickelte Spaltprofilieren dar. Bei diesem Verfahren der Druckumformung wird ein Blechband durch hintereinander angeordnete Umformgerüste von der Blechkante aus schrittweise zu einem Profil umgeformt. Der Umformprozess erfolgt dabei in diskreten Schritten und kann theoretisch beliebig fortgesetzt werden (Bild 1 links).

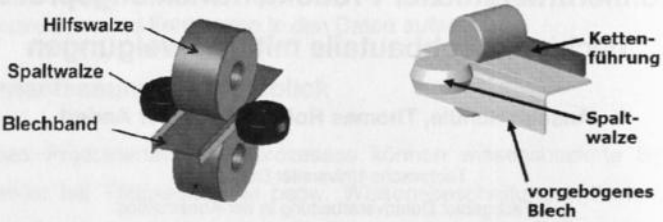


Bild 1: Spalprofilieren und Spaltbiegen

Jedes Gerüst besteht aus einer Gruppe von Walzen, je einer Spaltwalze und zwei Hilfswalzen. Zwischen der Spaltwalze und den Hilfswalzen wird der isostatische Druck aufgebaut der zum Fließen des Materials und letztlich zur Ausprägung der Flansche führt. Dem Sonderforschungsbereich 666 steht eine Anlage zur Verfügung, die es erlaubt an 10 Spaltprofiliergerüsten Spalttiefen von bis zu 15 mm zu erreichen. Durch nachgeschaltete Prozesse, wie dem Walzprofilieren, spanenden Verfahren und Laserschweißen können Blechprofile mit mehreren Kammern in Integralbauweise hergestellt werden [1].

In der zweiten Förderperiode des Sonderforschungsbereichs 666 sollen neben Blechprofilen auch flächige Bauteile entwickelt und gefertigt werden. Dabei kommt das Spaltbiegen, ein dem Spaltprofilieren sehr ähnliches Verfahren zum Einsatz. Hierbei wird ein Blechband zunächst um 90° abgekantet. Am entstandenen Biegefalz wird nun mit Hilfe von Spalt- und Hilfswalzen schrittweise ein Flansch ausgeformt (Bild 1 rechts).

Durch zurückbiegen des unteren, vorher abgewinkelten Blechteils, können auf diese Weise Stege und Versteifungen auf der Materialoberseite erzeugt werden. Durch Abfräsen der Flansche im Randbereich der Bleche werden Dichtzonen hergestellt, die es ermöglichen, das mit mehreren Stegen versehene Halbzeug anschließend durch wirkmedienbasierte Hochdruckumformung multiaxial zu verformen.

Einsatzgebiete für diese neue Generation von Blechprodukten stellen beispielsweise Architektur und Bauwesen dar. Dort können die Blechbauteile als selbsttragende Hüllenkonstruktionen oder als Sandwichelemente eingesetzt werden. Die Integralbauweise und die Verwendung hochfester Stähle prädestinieren die Bauteile jedoch ebenso für den Einsatz im Leichtbau.

2 Algorithmenbasierte Produktentwicklung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 666 wurde für integral verzweigte Blechprofile bereits ein algorithmenbasierter Produktentwicklungsprozess vorgestellt [2]. Der Generierung des CAD-Modells ist dazu im Konstruktionsprozess eine algorithmengetriebene Lösungsfindung vorgeschaltet. Dabei werden nach der Anforderungsermittlung aus Produktanforderungen und technologischen Randbedingungen Parameter für die mathematische Optimierung generiert. Die technologischen Randbedingungen, insbesondere aus der Fertigung werden auf diese Weise schon in den frühen Phasen der Produktentstehung berücksichtigt. Das Ergebnis der mathematischen Optimierung ist die hinsichtlich der Eingangsgrößen optimierte Profiltopologie und –geometrie. Die erzeugten Daten werden anschließend in Form eines Lösungsbaumes, bestehend aus Knoten und Kanten, Informationstechnisch weiterverarbeitet. Die Knoten entsprechen dabei den Verzweigungen und die Kanten den Flanschen der Spaltprofile. Um aus dem Lösungsbaum automatisiert ein CAD-Modell zu generieren, wurden verschiedene Demonstratoren auf Basis von CAD-Systemen entwickelt, die aus dem Lösungsbaum automatisiert 3D-Modelle generieren. Neben einem featurebasierten Ansatz, bei dem das CAD-Modell aus einem Baukasten von parametrisierten Teilmodellen zusammengesetzt wird, wurde auch ein Demonstrator entwickelt, bei dem die BREP-Topologie der Modelle direkt manipuliert wird [3, 4].

In der zweiten Phase des SFB 666 sind flächige Bauteile mit Verzweigungen Gegenstand der Forschung. Für diese Bauteile soll ebenfalls ein algorithmenbasierter Entwicklungsprozess erarbeitet werden. Die Eingangsgrößen für den Optimierungsprozess sind hier jedoch neben den klassischen Produktanforderungen zusätzlich die Informationen, die aus dem Produktdesign bereitgestellt werden. Dies sind Freiformflächen, die die äußere Gestalt der Produkte definieren. Diese Daten fließen zusätzlich zu den Produktanforderungen bereits in die mathematische Optimierung ein und werden in der Generierung der 3D-Modelle als Eingangsgröße verarbeitet.

Um die algorithmenbasierte Modellierung der flächigen Bauteile zu ermöglichen muss zunächst eine Methode entwickelt werden, um die Spaltbiegeoperationen im 3D-Modell auf mehrachsig gekrümmte Flächen anzuwenden.

3 Spaltbiegefeature

Ein Feature ist im Kontext der geometrischen Modellierung eine Aggregation von geometrischen Elementen hinsichtlich einer technischen Anwendung. Neben geometrischen Informationen können Feature auch nicht-geometrische Informationen enthalten. Dies können Parameter, mathematische Regeln und Zusammenhänge oder semantische Informationen sein. Bei der Produktmodellierung mit Features wird ein Produktmodell sukzessive aus Konstruktionsfeatures aufgebaut. Die technischen Daten des Features werden dabei während der Generierung spezifiziert, können jedoch nachträglich verändert werden [5].

Um ein allgemeines Feature für das Spaltbiegen zu erstellen müssen zunächst die Parameter, deren Abhängigkeiten und Grenzen definiert werden. Beim Spaltbiegen wird das Blech zunächst abgekantet, um anschließend vom Biegefalz ausgehend umgeformt zu werden. In der 3D-Modellierung soll ausschließlich die Zielgeometrie modelliert werden, da das Abkanten und Rückbiegen zwar relevante Prozessschritte darstellen, in der eigentlichen Produktgestalt jedoch nicht zu erkennen sind. Die relevanten technologischen und geometrischen Größen für das Spaltbiegen sind (Bild 2):

Gesamtspalttiefe **t**
Arbeitsradius **h** der Hilfswalzen
Arbeitsradius **R** der Spaltwalze
Blechdicke $\mathbf{s_0}$ des Ausgangsmaterials

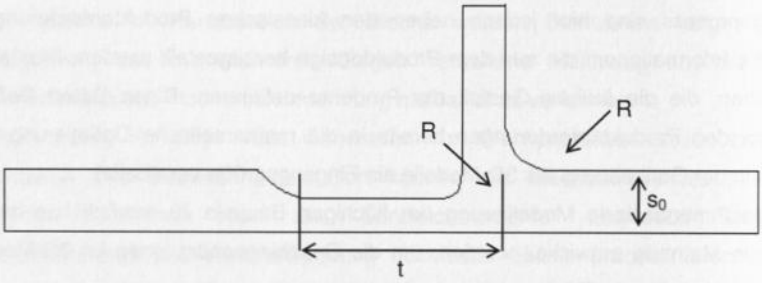


Bild 2: Spaltbiegeprofil mit relevanten Parametern

Zusätzlich zu den offensichtlichen geometrischen Größen sind gewisse Regeln im Feature hinterlegt. Die Flanschlänge wird aus den anderen Parametern berechnet und so angepasst, dass vor- und nach dem Einfügen des Features das Volumen des Modells und damit des Bauteils konstant bleibt. Da es sich beim Spaltprofilieren um ein Verfahren der Druckumformung handelt kann Volumenkonsistenz angenommen werden

Neben den technologischen Größen sind vor allem die Informationen zur Positionierung eines Spaltbiegefeatures relevant. Um ein allgemeingültiges Feature zu erzeugen, welches auf beliebigen Bauteilgeometrien angewendet werden kann. Also auch auf den tiefgezogenen, verformten Blechen, soll das Spaltbiegefeature nur durch Anfangs- und Endpunkt, die Öffnungsrichtung sowie durch die Zielfläche referenziert werden.

Zur Erzeugung eines Spaltbiegefeatures wurde zunächst das CAD-System NX7 von Siemens PLM verwendet. Die Möglichkeit sogenannte User-Defined Feature, also benutzerdefinierte Formelemente zu erzeugen, stellt eine gute Möglichkeit dar Modellierungsmethoden zu validieren ehe diese direkt auf der Ebene eines Modellierkernels umgesetzt werden.

Das erzeugte Feature erlaubt es auf beliebig gekrümmten Oberflächen einen Flansch zu erzeugen wie er mit Spaltbiegeoperationen hergestellt werden kann. Neben den geometrischen Eingangsgrößen werden nur zwei Punkte und die Zielfläche vom Benutzer abgefragt. In einer späteren Anwendung, die die Freiformgeometrie und die Lage und Dimensionierung der Flansche automatisiert zusammenfügt, wird die Parameterübernahme automatisiert erfolgen.

4 Ausblick und Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die Modellierung mehrachsig verformter Blechbauteile mit Verzweigungen prinzipiell möglich ist. Darüber hinaus wurden die Parameter für ein Modellierungsfeature für das Spaltbiegen ermittelt und vorgestellt. In einem nächsten Schritt wird das Modellierungsfeature auf Kernelebene implementiert. Hier ist die direkte Manipulation der Modelltopologie möglich, was große Vorteile hinsichtlich der Modellintegrität und der Parametrik bzw. Bauteilhistorie hat. Anschließend muss die Schnittstelle zwischen der mathematischen Optimierung und der Bauteilmodellierung definiert werden. Sind die Übergabedaten klar definiert, kann die Produktmodellierung automatisiert erfolgen. Letztlich können auf diese Weise in kurzer Zeit 3D-Modelle mit

unterschiedlichen Ausgangsgeometrien und Produktanforderungen generiert werden, ohne dass ein Konstrukteur am CAD-System eingreifen muss.

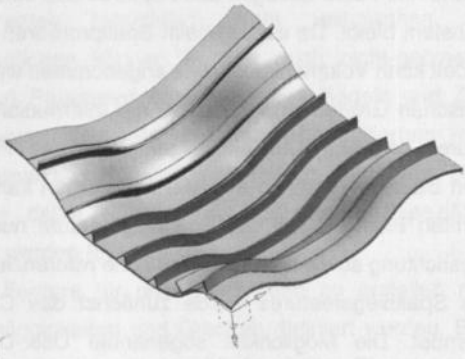


Bild 3: Antiklastisch gekrümmtes Blechbauteil mit Verzweigungen

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Teilprojektes A4 – „Modellierungsfunktionen für flächige verzweigte Blechbauteile" des Sonderforschungsbereichs 666.

Literatur

[1] Jöckel, Michael: Grundlagen des Spaltprofilierens von Blechplatinen, Berichte aus Produktion und Umformtechnik, Band 64. Dissertation Technische Universität Darmstadt 2005, Shaker Verlag, Aachen, 2005

[2] Anderl, Reiner; Rollmann, Thomas; Chahadi, Youssef; Wu, Zhenyu: Algorithm-based product development – refined concepts and example applications, Proceedings of the ASME 2008 IDETC/CIE 2008, New York USA, 2008

[3] Anderl, Reiner; Rollmann, Thomas; Schüle, Anselm: Three-Dimensional kernel development with Parasolid for integral sheet metal design with higher order bifurcations. Proceedings of the ASME 2009 IDETC/CIE, San Diego USA, 2009

[4] Anderl, Reiner; Schüle, Anselm; Rollmann, Thomas: Realization of Design Features for Linear Flow Splitting in NX 6. World Academy of Science, Engineering and Technology 58, 2009

[5] VDI Richtline 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie, VDI, Düsseldorf, 2008.

Intelligent Engineering Templates in der innovativen Produktentwicklung

Ingo Schulz[1], Henning Kern[1], Christoph Warkotsch[2]

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

[2]RWTH Aachen
Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt)
Steinbachstr. 54 B, D-52074 Aachen
Email: warkotsch@ikt.rwth-aachen.de; Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

Inhalt: *Der Beitrag behandelt die Entwicklung eines so genannten Intelligent Engineering Templates IET am Beispiel einer hochbelasteten, verschraubten Flanschverbindung mit einer Reibscheibe als Zwischenlage. Die Berechnung aller notwendigen Parameter der Schraubenflanschverbindung erfolgt in einer Exceldatei nach den Berechnungsvorschriften der VDI 2230. Als Eingabewerte dienen die äußeren Lasten. Das CAD-Modell des Flanschs wird in Pro/ENGINEER automatisiert aus Excel heraus generiert. Dieses CAD-Modell wird dann als Grundlage für das FE-Modell in Pro/MECHANICA verwendet. Nach Aufbringung der äußeren Lasten und Randbedingungen kann das FE-Modell schließlich berechnet werden.*

Abstract: *This paper deals with the development of an Intelligent Engineering Template IET using the example of a high duty bolted flange coupling with a friction disc between the two flanges. A fully parameterized CAD model has been developed which is coupled to an Excel sheet. The Excel sheet uses the external loads on the bolted flange coupling as input for the calculation of the entire flange geometry including number, kind and size of the required bolts. The calculation is based on the guideline VDI 2230. Out of Excel the CAD model is then automatically generated using Pro/ENGINEER. The CAD model is converted into a FE model for Pro/MECHANICA. Loads and restrictions are applied and the FE model is finally solved.*

Stichwörter: *Intelligent Engineering Template, Reibscheibe, Schraubenberechnung, Flanschverbindung*

Keywords: *Intelligent Engineering Template, Friction Disc, Calculation of Bolted Joints, Flange Coupling*

1 Einleitung

Der Produktentstehungsprozess kann in die beiden Bereiche des Innovations- und des Produktmanagements unterteilt werden [1]. Beim Innovationsmanagement geht es darum,

angeregt durch den Markt, neue Technologien oder strategische Überlegungen Produktkonzepte zu entwickeln.

Beim Produktmanagement wird unter Berücksichtigung insbesondere von produktionstechnischen Beschränkungen das innovative Konzept ausgestaltet und detailliert, sodass es gefertigt und schließlich an den Kunden ausgeliefert werden kann. Häufig sind für das Innovations- und das Produktmanagement unterschiedliche organisatorische Bereiche zuständig, sodass die Gefahr eines erheblichen Informationsverlusts besteht. Um dies zu vermeiden, werden bei der SKF GmbH unter anderem so genannte *Intelligent Engineering Templates IET* verwendet.

Diese IETs bilden die wesentlichen Gestaltungsregeln des neuen Produkts ab, sodass auch an der eigentlichen Entwicklung unbeteiligte Ingenieure erste Grobauslegungen effektiv und effizient durchführen können. Der Einsatz eines solchen IET wird in diesem Beitrag anhand des Produkts *FrictionDisc* der SKF GmbH dargestellt. Die *FrictionDisc* ist ein Zwischenelement für hoch beanspruchte Flanschverbindungen z. B. in Antriebsanlagen des Schwermaschinenbaus oder bei Schiffsantrieben. Hierbei werden bei Teilkreisdurchmessern von mehr als einem Meter Torsionsmomente von über 1000 kNm übertragen. Die *FrictionDisc* ermöglicht es dabei, den Reibwert μ der Flanschverbindung um den Faktor 4 auf bis über $\mu = 0{,}65$ zu steigern.

Das IET wurde zusammen mit dem Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH Aachen im Rahmen zweier Studienarbeiten [2][3] entwickelt. Es besteht aus einer komplexen Berechnungsvorschrift, einem daraus automatisch generierten vollparametrisierten CAD-Modell und einem vollständig integrierten, vollparametrisierten FEM-Modell. Es erlaubt basierend auf den Kundenanforderungen die Grobauslegung der Flanschkupplung, die unmittelbare Erstellung des CAD-Modells sowie, zur Absicherung und Optimierung, die automatisierte FE-Analyse.

2 Berechnungsgrundlagen

Im ersten Schritt wurden verschiedene Berechnungsansätze für geschraubte Flanschverbindungen evaluiert [4]-[6]. Die Auslegungskonzepte nach [4] und [5] erwiesen sich unter den gegebenen Anforderungen als ungeeignet, da keine Zwischenlage betrachtet wird und für alle Berechnungen von einem Reibwert $\mu = 0{,}12$ ausgegangen wird. Außerdem gelten die angegebenen Auslegungsformeln nur für sechs vorgespannte

Schrauben der Größe M10. Eine Axialkraftbelastung bleibt ebenfalls unberücksichtigt. Lediglich die Abschätzung des Flanschinnendurchmessers erfolgt daher nach [4] und [5]. Die VDI-Richtlinie 2230 [6] bietet dagegen den großen Vorteil, dass alle Randbedingungen berücksichtigt werden können. Lediglich ein auf die Flanschverbindung wirkendes Biegemoment wird standardmäßig nicht erfasst. Um dies auszugleichen, kann das Biegemoment als eine Axialkraft verteilt auf die einzelnen Schrauben betrachtet werden [7]. Die weitere Schraubenauslegung erfolgt dann wieder nach [6]. Der Nachteil ist, dass die Flanschverbindung für die Berechnung in mehrere Einschraubenverbindungen zerlegt werden muss, was nur zu einer Annäherung an die wirklichen Verhältnisse führt. Für die Bestimmung der Flanschabmessungen wurde auf allgemeine Gestaltungshinweise für Flanschverbindungen, beispielsweise nach [8], zurückgegriffen.

3 Beschreibung des CAD-Modells

Das Modell wurde mit dem CAD-System Pro/ENGINEER in der Version Wildfire 4.0 erstellt. Die gesamte Berechnung gemäß [6] zur Schraubenauslegung und zur Auslegung der Flanschgeometrie wurde in Microsoft Excel hinterlegt und über eine Excel-Analyse in Pro/ENGINEER mit dem CAD-Modell verknüpft.

Das CAD-Modell steht als Baugruppe zur Verfügung (Bild 1). Der Anwender kann zwischen einer Einschraubverbindung (ESV) und einer Durchsteckverbindung (DSV) wählen.

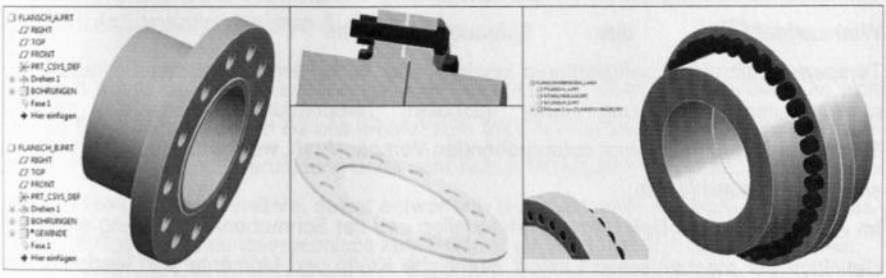


Bild 1: Flanschhälfte mit Modellbaum (links), Schnitt durch eine Schraube (Mitte, oben), Reibscheibe (Mitte, unten), vollständiges Flanschmodell mit Einschraubverbindung (rechts)

Um verschiedene Verschraubungsfälle berücksichtigen zu können, wurden Zylinderschrauben mit Innensechskant zur Verwendung als ESV und Sechskantschrauben

mit Sechskantmuttern zur Verwendung als DSV modelliert. Die Schrauben und Muttern sind als Muster in der Baugruppe eingefügt. Je nach Verschraubung werden die nicht benötigten Bauteile analog zum Einschraubgewinde unterdrückt. Das Gleiche gilt auch für die Reibscheibe als Zwischenlage (Bild 1, Mitte unten), sofern diese nicht verwendet werden soll, bzw. der für die Scheibendicke zuständige Parameter den Wert „0" zurückgibt. Insgesamt basiert das Modell auf 81 solcher Parameter.

4 Beschreibung des FE-Modells

Der Aufbau des Simulationsmodells erfolgt auf der Grundlage des oben vorgestellten CAD-Modells. Die bereits im CAD-Modell implementierte Excel-Analyse enthält hierfür weitere, FEM-spezifische Parameter. Zur Minimierung der Rechenzeit für Vorversuche, z. B. zur Einstellung der Temperaturlast zur Schraubenvorspannung, kann das 360°-Modell auf ein Segment reduziert werden, welches nur eine Schraubenverbindung enthält. Da die Kraft- und Druckverhältnisse an den Kontaktflächen von Flanschen und Reibscheibe von Interesse sind, wurden hier Kontakte mit einem parametergesteuerten Reibungskoeffizienten definiert (Bild 2).

Die Materialdefinition für sämtliche Bauteile, wie z. B. E-Modul, Querkontraktionszahl ν und Temperaturausdehnungskoeffizient α, sind durch Parameter gesteuert, die in der zentralen Exceltabelle verwaltet werden. Alle Werkstoffe werden mit Ausnahme des Schraubenmaterials als isotrop angenommen, da das Aufprägen der Vorspannkraft auf die Schraubenverbindung durch Temperaturdehnung erfolgt. Dabei wird in der orthotropen Werkstoffdefinition des Schraubenwerkstoffs dieser mit einem Temperaturdehnungskoeffizienten α ungleich null in Achsenrichtung der Schraube definiert. Durch Aufprägung einer globalen Temperaturlast führt die negative Schraubendehnung zu einer entsprechenden Vorspannkraft, welche nur in Achsenrichtung wirkt (Bild 2, oben rechts).

Im Anschluss an die Definition der Materialien und der Schraubenmodellierung erfolgt die Definition der mechanischen Lasten. Sämtliche Kräfte und Momente sind wiederum aus Excel importiert. Die Querkraft F_Q und Axialkraft F_A sind als Flächenlasten auf der Stirnfläche definiert (Bild 2, oben links).

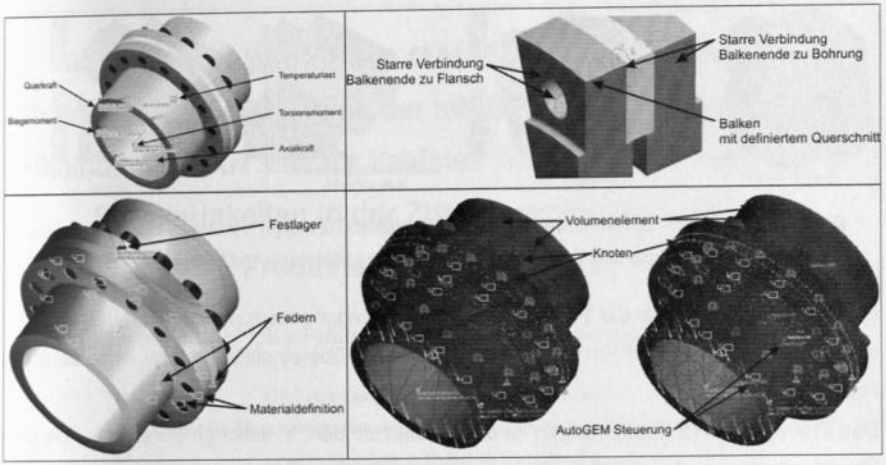


Bild 2: FEM-Modell mit Lastdefinitionen (oben links) und Lager- und Materialdefinition (unten links); volldefinierte Schraube als Balkenmodell (oben rechts); vernetztes FEM-Modell (unten rechts)

Zuletzt erfolgt die Netzgenerierung mittels der Programmfunktion „AutoGEM" ab, wobei ggf. die Voreinstellungen zu überprüfen und anzupassen sind (Bild 2, unten rechts).
Die endgültig im Simulationsmodell voreingestellten Analysen umfassen eine Vorspannungsanalyse, über welche die benötigte Vorspanntemperatur ermittelt wird, und eine Verbindungsanalyse, die das Gesamtmodell mit allen Lasten berechnet. Die Analyseergebnisse werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

5 Simulationsergebnisse & Ausblick

Überprüft wurde das Modell anhand von vier Beispielfällen. Zum einen handelte es sich um das Berechnungsbeispiel B2 aus [6] und zum anderen um einen bei SKF bereits realisierten Fall einer Flanschverbindung unter sehr hohen Belastungen. Ergänzt wurden diese beiden Fälle durch zwei weitere, selbst entworfene Beispiele unter ebenfalls hohen Belastungen. Einige Berechnungsergebnisse zum Beispiel B2 aus [6] sind in Bild 3 dargestellt.

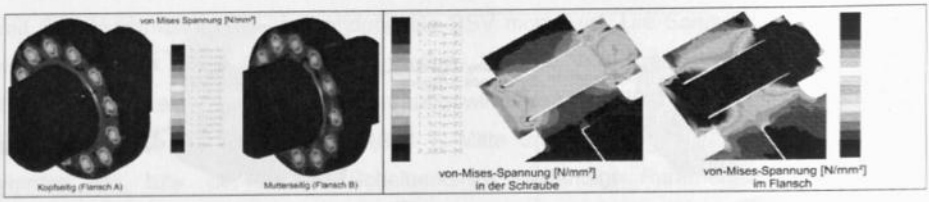


Bild 3: Ergebnisse der Simulation des Berechnungsbeispiels B2 aus [6]: von-Mises-Spannung auf der Flanschaußenseite (links); von-Mises-Spannung in Schraube und Flansch (rechts)

Die vier Testfälle zeigen die Tendenz, dass die Auslegung nach der Berechnungsvorschrift und die Ergebnisse der FE-Analyse gut miteinander übereinstimmen bzw. noch deutliche Reserven aufweisen.

Das Ziel weiterer Untersuchungen ist es, herauszufinden, in welchen Bereichen eine gute Übereinstimmung der FE-Berechnung mit der Berechnungsvorschrift besteht, wo die Vorschrift die Flanschverbindung überdimensioniert und wo sie möglicherweise zu kleine Dimensionen vorschlägt. Damit wird es möglich, bereits bei der ersten groben Auslegung eine den Enddimensionen sehr nahe kommende Flanschgeometrie festzulegen.

Literatur

[1] I. Schulz: Innovationsmanagement – Eine Strategie zur Verbindung von Ideen-, Technologie- und Produktentwicklung. Aachener Konstruktionstechnik – Mitteilungen, Aachen: Shaker, 2009.

[2] P. Berdel: *Entwicklung eines vollparametrisierten Modells hochbelasteter Flanschverbindungen.* Studienarbeit, Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik, RWTH Aachen 2010.

[3] C. Schleihs: Berechnung eines vollparametrisierten Modells hochbelasteter Flanschverbindungen mittels der Finite-Elemente-Methode. Studienarbeit, Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik, RWTH Aachen 2010.

[4] H. Gerber: Statisch überbestimmte Flanschverbindungen mit Reib- und Formschlusselementen unter Torsions-, Biege- und Querkraftbelastung. Dissertation, TU Berlin 1991.

[5] T. Kurzawa: Gestaltung und Berechnung von nichtschaltbaren reibschlüssigen Flanschkupplungen. Dissertation TU Berlin 1993.

[6] Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen, VDI 2230 Blatt 1, 2003.

[7] K. Matthias: *Schraubenkräfte in einer Flanschverbindung.* Maschinenbautechnik. 34 (1985), H. 11, S. 517-520

[8] K.-H. Grote, J. Feldhusen, H. Dubbel: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau,* 22. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007

Joint Venture der Firmen MAN Nutzfahrzeuge AG und Rheinmetall AG im Bereich der militärischen Radfahrzeuge zu Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH Möglichkeiten und Schwierigkeiten in der Zusammenführung zweier Produktentstehungszyklen

Tobias Bläßing[1,2], Karl-Heinrich Grote[1], Marco Nöding[2], Dieter Oley[2]

[1] Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg
Email: Tobias.Blaessing@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/
Email: Karl.Grote@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/

[2] Rheinmetall Radfahrzeuge GmbH, Betriebsstätte Kassel
Henschelplatz 1, D-34127 Kassel
Internet: http://www.rheinmetall-defence.com

Inhalt:

Inhaltlich wird eine wissenschaftliche Forschungstätigkeit vorgestellt, die sich mit der Neudefinition des Produktentstehungsprozesses (PEP) im Rahmen der aktuell laufenden Gründung des Unternehmens Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH (RMMV) befasst. Das PEP-Projekt ist ein Teil des Gesamtprojektes „Prozesse & IT", welches die schrittweise Zusammenführung der Firmen MAN Nutzfahrzeuge und der Rheinmetall AG beinhaltet.

Das Unternehmen RMMV stellt eine Bündelung der Aktivitäten und Kompetenzen beider Firmen im Sektor der militärischen Radfahrzeuge dar und leistet damit einen Beitrag zur Konsolidierung der deutschen Rüstungsbranche.

Rheinmetall und MAN wollen ihre Aktivitäten in zwei Stufen zusammenführen. In einem ersten Schritt werden Entwicklung und Vertrieb gebündelt und in einem zweiten Schritt die Produktionskapazitäten von Rheinmetall in Kassel und MAN in Wien in das Joint Venture eingebracht. Ende 2011 soll der Prozess abgeschlossen sein.

Der Technologiekonzern Rheinmetall zählt zu den führenden Anbietern von Systemen und Dienstleistungen im Militärsektor - vor allem für die Landstreitkräfte. Im Segment der geschützten Radfahrzeuge verfügt das

Unternehmen mit Fahrzeugen der unteren Gewichtsklasse bis 5 Tonnen bis zu Fahrzeugen von mehr als 30 Tonnen über ein breites Produktspektrum.

Rheinmetall legt den Schwerpunkt auf taktische Militärfahrzeuge, wobei das Fahrzeugspektrum breit gefächert ist. Es gibt geschützte Transportfahrzeuge, Aufklärungs- und Führungsfahrzeuge. Die Fahrzeuge müssen je nach Einsatzart, den jeweiligen Bedingungen und den gestellten Anforderungen variieren. Die Produktionskapazitäten dieser taktischen Fahrzeuge erscheinen mit etwa 100 Fahrzeugen pro Jahr eher gering, was jedoch aus der Variantenvielfalt und den dementsprechend hohen Konstruktions- und Fertigungsaufwand resultiert.

Der Schwerpunkt des Military Sektors der Firma MAN liegt vor allem in der Produktion von logistischen Militärfahrzeugen. Dabei bietet MAN sowohl Fahrzeuge für den leicht geländegängigen Einsatz – HX-Serie – als auch Fahrzeuge für den schwer geländegängigen Bereich – SX-Serie. Die Produktionskapazitäten dieses Bereiches sind mit circa 1000 Fahrzeugen pro Jahr deutlich höher als bei Rheinmetall.

Aufgrund der oben beschriebenen Unterschiede vor allem in den Produktionsbereichen und -kapazitäten sowie den konstruktiven und fertigungstechnischen Anforderungen haben sich in beiden Firmen auch unterschiedliche Produktentstehungsprozesse (PEP) etabliert und bewährt. Eine der Herausforderungen des Joint Venture ist nun, diese zwei Varianten zu einer für beide Firmenteile praktikablen Lösung zu vereinen. Diese Prozesszusammenführung begann mit der offiziellen Gründung der Firma RMMV im Mai dieses Jahres.

Abstract:

Concerning of the contents a scientific research activity is introduced, which deals with the definition of the product development process (PEP) within the scope of the current foundation of the company Rheinmetall MAN Military Vehicles GmbH (RMMV). The PEP-project is a subproject of the overall project „Process & IT", which contains the gradual consolidation of both companies.

The company represents the junction of the activities and competences of the Rheinmetall AG and MAN in the military sector and therewith it supports the consolidation of the German armament industry.

Rheinmetall and MAN will bring together their activities in two steps. In the first step the development and distribution part are bundled up and in a second step the production capacities by Rheinmetall in Kassel and MAN in Vienna will be sum up in the joint venture. These processes should be finished by the end of 2011

The technology group Rheinmetall counts to the worldwide leading suppliers of systems and services in the military sector and above all for the land armed forces. The company offers a fan product spectrum. In the segment of the protected wheeled vehicles there are vehicles of the lower weight class (5 tonnes) up to vehicles of more than 30 tonnes.

Rheinmetall focuses on the development of tactical military vehicles, whereby the vehicle spectrum is fanned out broadly. The spectrum contains protected transport vehicles, clarification vehicles and leadership vehicles.The vehicles must be varied in according to the application kind, the respective conditions and the made demands. The production capacities of these vehicles - about 100 vehicles per year - seem rather low

but, nevertheless, it's a result of the high construction and building effort according to the individual demands.

The military sector of the company MAN focuses on the production of logistic military vehicles. Besides, they offer vehicles for slightly cross-country application – SX - serie – as well as for the treacle cross-country area – SX - serie. The production capacities of MAN are definitely higher than Rheinmetall capacities by approximately 1000 vehicles per year.

On account of the differences described on the basement of the different production areas, capacities as well as constructive and technical requirements, different product development process (PEP) have been formed in both companies and have proved themselves. Now one of the great challenges of the joint venture is to built up a new practicable solution of these two different variations. The consolidation of the PEP processes started with the official setting up of the company RMMV in the may 2010.

Stichwörter: *Produktentstehungsprozess, Joint Venture, Variantenvielfalt, militärische Fahrzeuge.*

Keywords: *product development process, fusion, proliferation of options, military vehicles.*

1 Grundlage des Forschungsprojekts

Die Firma Rheinmetall Radfahrzeug (kurz: RRF) mit dem Sitz in Kassel ist auf die Entwicklung, Konstruktion und Produktion von taktischen Fahrzeugen im militärischen Sektor spezialisiert. Aufgrund der in den vergangenen Jahren erlangten Erfahrungen in den Bereichen Schutz, Einzelradaufhängung und Einsatzfähigkeiten unter widrigsten Bedingungen ist die Firma national und international hoch angesehen. Der Fokus der Firma MAN-Nutzfahrzeuge mit dem Sitz in Wien liegt auf der Konstruktion und Produktion logistischer Fahrzeuge. Diese Fahrzeuge sind mit keinem hohen Schutzniveau verbunden, da diese Fahrzeuge im Gegensatz zu den taktischen Fahrzeugen nicht für eine bestimmte Mission konzipiert wurden. Eine großer Vorteil der Firma MAN Nutzfahrzeug ist die Verknüpfung zum Mutterkonzern, da dadurch die Anwendung des Baukastenprinzips genutzt als auch gefordert wird. Durch diese Nutzung ist eine Vielzahl von gleichen Baugruppen und Bauteilen in unterschiedlichen Fahrzeugen gewährleistet. Weitere Vorteile ergeben sich in den nach gelagerten Bereichen, zum Beispiel im Bereich Service und After Sales. Der Kunde kann im späteren Einsatz auf gleiche Komponenten zurückgreifen und hat einen geringeren logistischen Aufwand.

Durch die Konsolidierung der beiden Firmen sollen die Kernkompetenzen gebündelt werden, um Fahrzeuge mit hohem Schutzniveau, sowie Fahrzeuge mit einem hohen Anteil an Gleichteilen zu entwickeln. Die Vorteile sind leicht erkennbar - eine Verbesserung der

Logistik und Lagerverwaltung sowie die vereinfachte Wartbarkeit der Fahrzeuge sind hierbei nur einige Punkte. Durch das schrittweise Zusammenführen der beiden Firmen, soll ein Zuwachsen gewährleistet werden. Die Zusammenführung der Entwicklung und Konstruktion ist dabei der erste Schritt.

2 Darstellung der Konstruktionsprozesse

Als Grundlage dieser Untersuchung sind die Produktlebenszyklen beider Firmen. Im Bild 1 ist das Schaubild des Lebenszyklusprozesses der Firma Rheinmetall dargestellt.

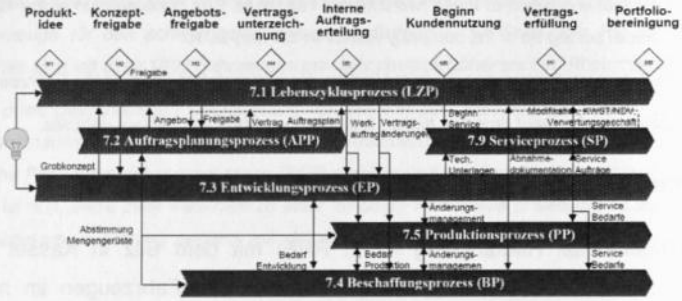


Bild 19: Lebenszyklusprozess (kurz: LZP) der Firma Rheinmetall [2]

Das zweite Schaubild (Bild 20) ist der PEP-Fibel der Firma MAN Nutzfahrzeuge entnommen. Die PEP-Fibel und der hier angeführte PEP wurden 2004 im MAN Unternehmen eingeführt und werden seitdem immer weiter optimiert. Mittlerweile ist dieser PEP in der Version 2.0 innerhalb der Firma MAN eingeführt und die Mitarbeiter wurden geschult.

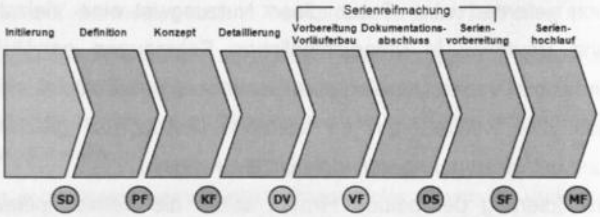


Bild 20: Produktentstehungsprozess (kurz: PEP) der Firma MAN Nutzfahrzeuge [4] / [6]

Aus beiden Prozessen werden anschließend als Beispiel speziell die Meilensteine der Entwicklung und Konstruktion herausgegriffen und betrachtet.

Die Firma Rheinmetall untergliedert ihre Entwicklung detaillierter in „Konzeptentwicklung" und in „Systementwicklung". Innerhalb dieser Entwicklungsabschnitte sind die Meilensteine M1 bis M4 wieder zu finden, wobei der Meilenstein M4 noch in die Unterkategorien M4.1 bis M4.10 untergliedert wurde. Die weitere Unterteilung ist größtenteils auf Freigabekriterien zurückzuführen. Ein Beispiel hierfür ist der Meilensteine M4.4 der für die Freigabe der Zeichnung zum Bau des Prototyps bzw. des Demonstrators steht.

Eine so genaue Untergliederung des MAN-PEP's ist im SE-Handbuch nicht aufgeführt [6]. Es wird lediglich eine Unterteilung nach der Entwicklungs- und Fertigungstiefe vorgenommen, die nach System bzw. Module aufgegliedert ist.

Der in dem vorherigen Abschnitt kurz beschriebene Entwicklungsaufwand anhand der Meilensteine der beiden Firmen scheint in erster Linie nicht so gravierend zu sein. Bei genauer Betrachtung und Analyse der Konstruktionsabläufe wird deutlich, dass hier aufgrund der unterschiedlichen Fahrzeugeinsatzkriterien und die damit verbundenen Anforderungen an die Fahrzeuge, doch erhebliche Unterschiede bestehen.

Aus den Prozessschaubildern sind die Arbeits- und Konstruktionsumfänge nicht direkt zu erkennen. Die MAN-Nutzfahrzeuge Wien nutzen zu einem großen Teil die Bauteile und Konstruktionen der zivilen MAN-Baureihe, wodurch sie häufiger auf fertige Lösungen und Module zurückzugreifen können. Sie haben Zugriff auf standardisierte Bauteile und können deshalb eine Serienproduktion gewährleisten.

Aus der Sicht der Konstruktionstechnik sind im PEP der MAN-Nutzfahrzeuge die Meilensteine „Definitionsphase" und „Konzeptphase" die wichtigsten Meilensteine. In diesen beiden Meilensteinen werden die Regeln der Konstruktionstechnik angewandt.

Im Gegensatz dazu entwickelt die Firma Rheinmetall Radfahrzeuge kundenspezifische Lösungen. Der damit verbundene Aufwand innerhalb der Konstruktion ist bedeutend höher. Es kann dabei nur selten auf Standardlösungen zurückgegriffen werden, die mit geringem Aufwand den jeweiligen Rahmenbedingungen angepasst werden können. Dies ist sicherlich auch ein Punkt, der sich in der Wertschöpfung der Fahrzeuge widerspiegelt.

In einem nächsten Schritt sollen noch deutlicher Synergien und Unterschiede in den Konstruktions- und Entwicklungsabteilung heraus gearbeitet werden. Es sollen die

Vorgehensweisen und Unterschiede in der Konstruktion betrachtet werden. Dazu gehört beispielsweise auch die Anwendung der Werksnormen, nach denen Toleranzen und Fertigungsabläufe beschrieben werden. Das Ziel soll es sein, bis Ende des Jahres einen gemeinsamen Konstruktions-- und Lebenszyklusprozess zu generieren, der für alle Standorte gut anwendbar ist. Nur so kann realisiert werden, dass einheitliche Produkte mit gleicher Qualität konstruiert und produziert werden können.
Der Abschluss des Gesamtprojekts, also die erfolgreiche Zusammenführung der Firmen, ist für Ende 2011 geplant. Die Prozesse zum Produktlebenszyklus und zur Konstruktion müssen bis Ende 2010 generiert werden, um dann am Anfang des kommenden Jahres mit den Schulungen der Mitarbeiter an den Standorten beginnen zu können.

3 Ausblick und weitere Schritte

In den nächsten Wochen wird eine detaillierte Analyse der Handbücher (Konstruktionshandbuch Rheinmetall Radfahrzeuge GmbH und SE-Handbuch MAN-Nutzfahrzeuge) durchgeführt. Des Weiteren wurden in allen Abteilungen Fragebögen ausgegeben, deren Inhalte zur Gestaltung des neuen Produktlebenszyklus beitragen. Nach der Auswertung der Fragebögen kann auf der Grundlage der Ergebnisse dann ein einheitlicher Produktlebenszyklus und Konstruktionsprozess aufgestellt und etabliert werden. Wichtig ist hierbei, dass die erstellen Prozesse bei den Mitarbeitern Akzeptanz und Verständnis für die Anwendung und Einhaltung der Prozesse hervorrufen, da die Anwendung der Prozesse grundlegend zur Erreichung der gesetzten Ziele ist.

4 Literatur

[1] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[2] Norm DIN EN ISO 9001:2008 und NATO Qualitätsanforderungen AQAP 2110 *Qualitätsmanagementhand der Firma Rheinmetall Defence*

[3] Konstruktionshandbuch der Firma Rheinmetall Defence

[4] PEP-Fibel MAN Nutzfahrzeuge

[5] Walitschek, Joachim, Anspach, Hubert F.: *Die Bundeswehr als Auftraggeber.* 2. Aufl. Bernard & Graefe Verlag, 1986 - ISBN 3763754598

[6] SE-Handbuch MAN-Nutzfahrzeuge

Produktinnovation am Beispiel der Suzlon 1.5MW LTV Windkraftanlage

Jan Brökel

Suzlon Energy GmbH
Kurt Dunkelmann Strasse, 18057 Rostock
Email: jan.broekel@suzlon.com; Internet: http://www.suzlon.com/

Inhalt: *Am Beispiel der Suzlon 1.5MW S82 Windkraftanlage wird gezeigt, wie durch Produktinnovation eine neue Produktvariante entsteht und wie diese, als Teil des Konstruktionsprozesses, im Windpark validiert wird. In Feldversuchen wurde das Cold-Start-up Verhalten und das Zusammenspiel von Isolation, Heizung und Kühlung bei extrem kalten Temperaturen überprüft.*

Abstract: *In 2010 the Suzlon 1.5MW S82 LTV wind energy converter was validated in China. The innovative isolation, heating and cooling concept was tested at temperatures around -20 °C. Critical turbine situations like grid loss and cold start up were successfully checked.*

Stichwörter: *Windkraftanlage, Produktvarianten, Prototypenabnahme, Feldversuch, LTV, CCV*

Keywords: *wind energy converter, low temperature variant, product variants, prototype validation*

1 Produktvarianten bei Windkraftanlagen

Produktinnovation dient einerseits der technischem Weiterentwicklung als auch andererseits der Marktanpassung. Gerade wenn sich das Marktumfeld von einem Verkäufer-Markt zu einem Käufer-Markt ändert, muss ein Unternehmen durch Produktinnovationen reagieren. Diese Marktentwicklung erlebte die international Windkraftindustrie in den letzten zwei Jahren. Auch die Firma Suzlon Ltd. reagierte auf die erschwerte Marktsituation mit verstärkter Produktentwicklung. Im Suzlon Heimatland Indien werden ausschließlich Windkraftanlagen (WKA) in der Standard-Temperatur-Variante (STV, Betriebstemperatur von -10 °C bis +40 °C) verkauft. Für den chinesischen Markt wurde von 2008 an eine Low-Temperature-Variant (LTV, Betriebstemperatur von -30 °C bis +40 °C) für die windigen mongolischen Steppen mit kaltem kontinentalem Klima entwickelt. So oder so ähnlich agieren nahezu alle Hersteller von Windkraftanlagen. So gibt's es bei Nordex die Cold-Climate-Version [2] und bei Vestas eine low temperature Option für die meisten Turbinentypen [3].

Angelehnt an Industriestandards wie der GL-Richtline [1] sind die Temperaturbereiche wie folgt definiert:

Tabelle 1: Windkraftanlagen Temperaturvarianten (Außentemperaturen)

	LTV - Tieftemperatur Variante	STV – Standard-temperatur Variante	HTV – Hochtemperatur Variante
Turbinen Betrieb (windabhängige Drehzahl)	-30°C bis +40°C	-10°C bis +40°C	+5°C bis +55°C
Turbinen Standby (Trudeln möglich)	-40°C bis +55°C	-20°C bis +50°C	-5°C bis +65°C

Neben den temperaturabhängigen Produktvarianten ergibt sich die Variation auch durch regionale Netzanforderungen. Als Bespiel sind die unterschiedlichen Netzfrequenzen von Deutschland (50Hz) und den USA (60Hz) zu nennen. Dieser Unterschied macht weitreichende elektrische Anpassungen nötig, aber auch im mechanischen Teil der WKA ergeben sich Änderungen im Design durch die höhere Generatordrehzahl und damit einer anderen Getriebeübersetzung. Vor allem steuerungstechnische und elektrische Anpassungen bieten Spielraum für Innovationen, da sich hier maßgeblich die Verfügbarkeit und die Energieausbeute optimieren lassen.
Aus den nationalen grid codes (Netzstandards) ergeben sich zusätzlich verschiedene Anforderungen wie LVRT (low voltage ride through) oder RCS (reactiv current source).
Alle diese Optionen und Möglichkeiten zu entwickeln, anzubieten und daraus das beste Paket für den Kunden zu schnüren, bedeutet für die WKA Hersteller Produktinnovation.

2 S82 Low Temperature Varinat (LTV)

Die S82 LTV WKA ist eine Produktvariante der S82 STV Turbine. Die maschinenbaulichen Veränderungen betreffen vor allem die Materialwahl der Gusswerkstoffe und erhöhte Anforderungen an die Kerbschlagzähigkeitsprüfung bei den Stahlbaustrukturen. Die veränderten Temperaturanforderungen (Heizen statt Kühlen) im Vergleich zur indischen Standardvariante schlagen sich in zahlreichen Heizungen und gezielter Wärmeisolation nieder. So sind im Getriebeölsumpf Heizstäbe eingebracht, es gibt vergrößerte Heizungen in allen Schaltschränken und einzelne Komponenten werden gezielt durch Heizlüfter erwärmt. Dazu werden Tieftemperatur geeignete Lagerschmierstoffe eingesetzt.

Systemsicherheitsrelevante Bauteile wie die Blattverstellbatteriekästen werden wärmeisoliert und beheizt.

All diese Einzelmaßnahmen stellen aber keine Innovation dar, sie sind in ihrer Art alle aus dem Maschinen- und Anlagenbau bekannt. Die Innovation ist das Zusammenspiel und Abstimmen der Heizungen, Lüfter und Komponenten aufeinander und die vielseitigen Turbinenzustände.

Als besondere Belastung für eine in arktischen Verhältnissen betriebene Windkraftanlage gilt der so genannte „cold start up". Hierbei ist die Anlage durch einen Netzfehler tagelang ohne Strom und folglich kann auch keine Heizung und keine Steuerung arbeiten.

3 Versuche und Erprobung

Von den LTV Komponenten werden vor allem das Getriebe, die Schaltschränke und die Batteriekästen intensiven Test unterzogen. Die Entwicklung eines Getriebes dauert in der Regel mindestens ein Jahr, da sowohl die Klimakammer- als auch die Lebensdauerversuche sehr zeitintensiv sind. Die Systemvalidierung solch komplexer Komponenten wird vom Zulieferer durchgeführt und vom WKA Hersteller als Kunden nur spezifiziert und begleitet.

Die Werkserprobung einer WKA umfasst die erste Prototypenmontage und somit die Kontrolle der Montageschnittstellen. Hinzu kommen die Optimierung der Zusammenbauprozesse und die Überprüfung der Dokumentation.

Nach Abschluss der Montage der Hauptbaugruppen Gondel und Nabe, werden beide Baugruppen elektrisch angeschlossen und die Steuerung und Software gestartet. Es werden relevante Turbinenzustände simuliert und die Parametrisierung der Sensorik kontrolliert. Das besondere Augenmerk liegt bei einer LTV WKA auf dem korrekten Ein- und Ausschalten der Heizungen und Lüfter.

Die Felderprobung der S82 LTV Prototypen Anlagen wurde in Februar 2010 bei Xilinhot in der Inneren Mongolei in China erfolgreich durchgeführt [4]. Zu diesem Zwecke wurden sowohl eine Auswertung der online verfügbaren Turbinenprotokolle (Ereignislisten, Temperatur- und Leistungskurven, Fehlerprotokolle) für die Wintersaison 2009/2010 erstellt, als auch vor Ort zusätzliche Langzeittemperaturverläufe erhoben.

Das spezielle Augenmerk der durchgeführten Produktabnahme lag dementsprechend auf dem Turbinen- und Steuerungsverhalten, wobei die kritischen Komponenten mittels zusätzlich installierter Temperatursensoren gezielt überwacht wurden.

In der zweiwöchigen Testphase wurden mehrere Szenarien durchgespielt. Als erstes wurde der Turbinenstatus "waiting for wind" erfasst, hierbei trudelt der Rotor frei bis 3 U/min um die Komponenten des Antriebsstranges warm zu halten. Alle Heizungen sind Temperatur gesteuert und an die Komponententemperatur gekoppelt. Bei steigender Windgeschwindigkeit geht die Turbine nach der Synchronisierung ans Netz und schaltet in den "reduced power" Modus. Wenn das Hauptlager und der Getriebeölsumpf ihre jeweilige Mindesttemperatur erreicht haben, schaltet die Anlage bei entsprechenden Windgeschwindigkeiten auf volle Leistung, Modus „Standard operation". Diese Steuerungsvorgänge mit den entsprechenden Komponententemperaturschwellen wurden erfolgreich überprüft. Als Beispiel so hier das Hauptlager genügen, welches als doppelreihiges Pendelrollenlager in einem Stahlgussgehäuse sitzt. Durch die externe Heizung und der Umwälzung von ca. 25 kg Fett steigt die Temperatur beim Trudeln von -20 °C bis zur Volllast auf ca. +15 °C.

Ab 12m/s Wind liefert die S82 Turbine als Windklasse IIIA Anlage 1500kW Nennleistung. Dabei wird soviel Abwärme produziert, dass die Komponenten des Antriebsstranges trotz tiefster Außentemperaturen gekühlt werden müssen. Die Turbinensteuerung überwacht daher jede einzelne Komponente und pendelt der Turbinenleistung folgend mithilfe von Heizung und Kühlung die Komponententemperatur im optimalen Bereich ein. Die Funktion dieser Regelkreise konnte nachgewiesen werden.

Ein weiterer kritischer Test ist der „Cold Start Up". Hierbei wird der Ausfall des Stromnetzes für zwei Tage simuliert, in denen die Anlage komplett auskühlt. Dafür wurde die Anlage T37 vom Netz genommen und alle Heizungen, Lüfter und Steuerungsprogramme manuell gestoppt. Nach 48h, bei ca. -22 °C Außentemperatur, wurde die Anlagensteuerung wieder auf Automatikbetrieb gesetzt und die Temperaturanstiege in und an den Komponenten mitgeschrieben. Noch bevor die Getriebeheizungen eine Wirkung zeigten, wurde das Getriebe geöffnet und der Schmierzustand der obersten Zahnräder erfasst. Trotz einer Öltemperatur von -11 °C wurde ausreichend Schmierstoff auf alle Zahnflanken und Schmierstellen gefördert. Das Hauptlager, welches in den 48h nahezu auf Außentemperatur auskühlte, erwärmte sich

relativ langsam durch die externe 9KW Lagergehäuseheizung. Wie in Bild 1 zu sehen erwärmt sich nach dem Einschalten der Heizung das Hauptlager innerhalb von 20h auf 10°C (mit Hysterese), erst dann startet die WKA mit reduzierter Leistung (zur Getriebeerwärmung) und geht anschließend auf die entsprechende Windleistung.

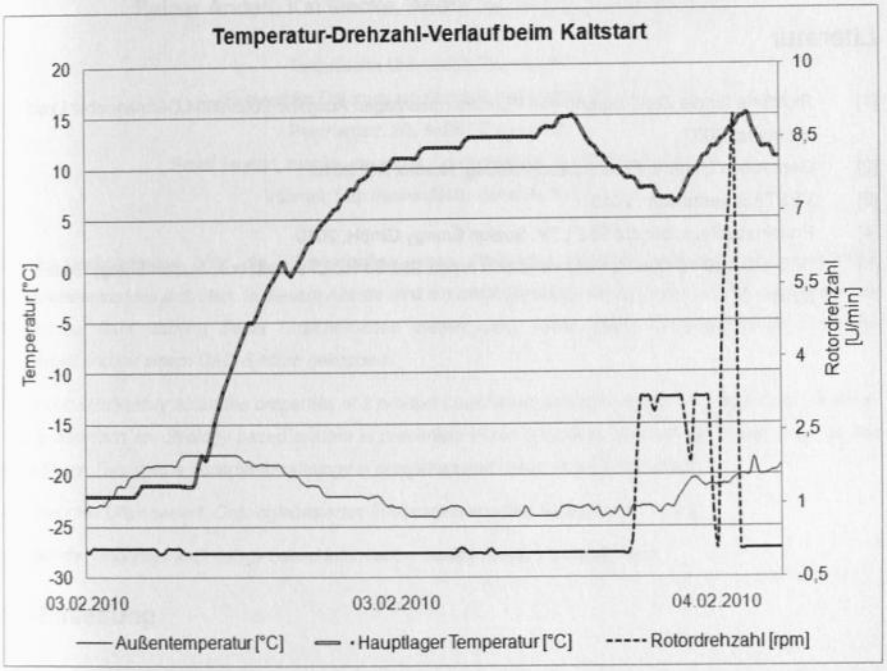


Bild 1: Kaltstart mit Hauptlager Temperatur und Rotordrehzahl

Als Teile der Sicherheitskette müssen sowohl das Hydraulikaggregat (für die hydraulische Scheibenbremse an der schnellen Getriebeseite) als auch die Nabenbatterien (zur Notfahrt der Blätter auf Fahnenstellung) Mindesttemperaturen aufweisen, um einen Anlagenstart zu erlauben.

Nach Abschluss der Versuche wurden alle Reaktionen der Steuerung ausgewertet. Zusätzlich sind Temperaturen an wichtigen Punkten in der Gondel, Nabe und Turm über drei Wintermonate aufgezeichnet worden. Durch das Zusammenfassen aller Ergebnisse ist das Gesamtbild der Funktionsweise der S82 LTV Turbine bei Temperaturen bis -35°C

ermittelt worden. Die Erprobung der neuen Turbinenvariante sowohl auf Zuliefererebene, als auch die Systemüberprüfung in der Fabrik und im Windpark, sind ein entscheidender Teil der Entwicklung der neuen Heiz- und Kühlsteuerung der S82 LTV Turbine. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in zukünftigen WKA- und Variantenentwicklungen berücksichtigt.

Literatur

[1] Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen Ausgabe 2003/2004,Germanischer Lloyd Hamburg, 2003

[2] Generation Gamma Produktbeschreibung; Nordex AG; 2010

[3] VESTAS; vetas.com, 2010

[4] Projektabschlussbericht S82 LTV, Suzlon Energy GmbH, 2010

[5] SEG-GB-110-10-00607, Field validation report S82 50 HZ LTV Gear box, Suzlon Energy GmbH, 2010

Beherrschung von Unsicherheit von lasttragenden Systemen im Maschinenbau durch Ontologie-basierte Informationsverarbeitung und Visualisierungstechnik.

Reiner Anderl, Kai Mecke, André Sprenger, Lucia Mosch

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion
Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt
Email:{anderl, mecke, sprenger, l.mosch}@dik.tu-darmstadt.de;
Internet: http://www.dik.tu-darmstadt.de/

Inhalt: *Unsicherheiten über die Eigenschaften eines Produktes können bezüglich des gesamten Produktlebenszyklus auftreten. In diesem Ansatz wird ein ontologiebasiertes System skizziert, welches einen Beitrag zur Beherrschung dieser Unsicherheiten leisten kann. Dazu wird eine Unsicherheits-Ontologie vorgestellt und mit einem CAD-System gekoppelt.*

Abstract: *Uncertainty about the properties of a product could arise according to the whole product life cycle. In this approach an ontology based system is presented which is able to support the containment of this uncertainty. Therefore a uncertainty ontology is presented and linked to a CAD-System.*

Stichwörter: *Unsicherheit, Ontologiebasiertes Informationsmodell, Produktentwicklung.*

Keywords: *Uncertainty, Ontology based information model, Product development.*

1 Einleitung

Im heutigen globalen Wettbewerb ist es notwendig die Entwicklung komplexer Produkte effizient durchzuführen. Die Unterstützung der Entwicklungsprozesse durch IT-gestützte Methoden kann in der Phase der Produktentstehung einen Beitrag zur Erfüllung dieser Anforderungen leisten. Während der Produktentwicklung entstehen Unsicherheiten bezüglich der Prozesseigenschaften von Produkten die sich nicht, oder nur schwer mit Hilfe bestehender Methoden und Modelle vorhersagen lassen. Die Gründe dafür sind vielfältig und reichen von fehlender Information, bis hin zu unzureichenden Modellen. Vorhandene Modelle bilden in den Prozessen auftretende Schwankungen aufgrund ihrer Komplexität oft nicht oder nur unzureichend ab.

Im Bereich der lasttragenden Systeme werden zur Beherrschung dieser Unsicherheiten heutzutage Konzepte („save-life", „fail-safe") gewählt welche sich durch große Sicherheitsbeiwerte auszeichnen [1].

Im Folgenden wird ein Konzept entwickelt, welches die virtuelle Produktentwicklung in Bezug auf Unsicherheiten in lasttragenden Systemen mit Hilfe eines ontologiebasierten Informationsmodells und einer passenden Visualisierungstechnik unterstützt.

2 Herausforderung

Der Beherrschung der eingangs beschriebenen Unsicherheit stehen umfangreiche und aufwendige Versuche unter realen Bedingungen gegenüber, die sehr zeit- und kostenintensiv sein können. Durch eine Betrachtung der Ursachen von Streuungen in den Prozessen lassen sich Produkte mit geringeren Sicherheitsbeiwerten entwickeln. Ein Problem in der heutigen Produktentwicklung ist, dass diese Informationen nicht verfügbar oder nicht zugänglich sind. Die Ursachen dafür liegen in der Komplexität der Zusammenhänge und der unzureichenden Unterstützung durch geeignete Methoden und IT-Systeme. Ziel ist es diese Informationen sachgerecht zu erfassen, aufzubereiten und letztendlich dem Konstrukteur zur Verfügung zu stellen.

Der SFB 805 - Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus - hat sich zum Ziel gesetzt die eingangs beschriebenen Unsicherheiten zu beherrschen. Das Teilprojekt A5 - Informationsmodell zur Repräsentation und Visualisierung von Unsicherheiten- hat sich zur Aufgabe gemacht ein Ontologie-basiertes Informationsmodell für Unsicherheiten in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus zu entwickeln.

Im Folgenden ist der aktuelle Stand der Technik dargestellt.

Eine Ontologie ist nach [2] eine formale explizite Spezifikation einer Konzeptualisierung. Ontologien dienen der Wissensrepräsentation. Als Vorstufen einer Ontologie können Taxonomien gesehen werden. EineTaxonomie stellt eine hierarchische und vertikale Struktur von Begriffen dar [5]. Mit der Web Ontology Language (OWL) [7] existiert eine formale Beschreibungssprache für Ontologien, welche automatisierte Schlussfolgerungen ermöglicht [6].

Als Ausgangspunkt der Repräsentation von Unsicherheit dienen die im SFB entwickelten Modelle und Methoden. In [4] wurde ein Unsicherheitsmodell vorgestellt, welches

Unsicherheiten anhand des Informationsstandes in drei verschiedene Kategorien unterteilt. Im Falle von Unwissen sind keinerlei Wirkungen auf einen betrachteten Prozess bekannt. Kann man Wirkungen von Unsicherheiten einem Effekt zuweisen und quantifizieren, so herrscht Ungewissheit. Kann man die Unsicherheit stochastisch quantifizieren, so herrscht stochastische Unsicherheit.
Unter der Visualisierung von Information versteht man die interpretierbare Darstellung von Daten und deren Zusammenhängen. Dabei können sowohl technische als auch wirschaftliche Daten visualisiert werden. Das Ziel ist es dem Betracher neue Einsichen zu vermitteln. Aus dem Stand der Technik resultiert folgender Handlungsbedarf:
Für die Abbildung von Unsicherheiten, die entlang des Produktlebenszyklus entstehen, deren Ursachen und Wirkungen, gibt es bisher keine entsprechenden Methoden und Modelle. Diese müssen entwickelt werden, um Beispielsweise folgende Frage beantworten zu können:

„Welche Prozesse beeinflussen die Materialkennwerte (Parameter) eines Produktes?"

Das Informationsmodell muss Anforderungen bezüglich Identifikation, Interpretation und Repräsentation der Daten respektieren. Damit werden Prozesse und Zustandsgrößen aus verschiedenen Phasen des Produktlebens abgebildet.
Die Anforderungen an das Gesamtsystem umfassen auf einer generellen Ebene die Architektur, die Anbindung, die Implementierung und der Leistung des Systems. Weiterhin soll die Implementierung, soweit möglich, durch freie Standards und quelloffenequelloffene Softwarelösungen realisiert werden. Die abgebildeten Daten müssen dem Kosntrukteur in der Produktentstehungsphase zugänglich gemacht werden. Dazu soll innerhalb eines 3D-CAD-Systems eine interaktive Visualisierung erfolgen.

3 Konzept

Ausgehend von der Fragestellung wird ein ontologiebasiertes Informationsmodell entwickelt, welches die Grundlage für ein Visualisierungskonzept bildet.
Das System ist für den Einsatz in der Produktentstehung konzipiert, und erreicht seinen vollen Funktionsumfang in den späteren Phasen der Produktentstehung.

Für die Repräsentation von Unsicherheit werden bestehende Ansätze in die Ontologie integriert, und weitere notwendige Informationen identifiziert und strukturiert. Zu diesem Zweck wird eine Trennung der Wissensbasis in eine einteilende Struktur (T-Box: Prozess-, Projekt- und Unsicherheitsontologie) und der erklärten Instanzen (A-Box: Fortschrittsontologie) vorgenommen. Durch die Abbildung der einteilenden Struktur in verschiedene Ontologien wird eine Modularisierung erreicht. Ausgehend von dem beschriebenen Prozess- und Unsicherheitsmodell werden Unterklassen von Parameter und Prozesse, sowie Unsicherheitsaspekte strukturiert. Exemplarisch wird in Bild 1 die definierte Geometrie aus der Produktentwicklung und Zustandsparameter in der Oberklasse Parameter zusammengefasst. Durch die Erstellung der entsprechenden Eigenschaften, also der Beziehungen der Konzepte zueinander, und Regeln wird eine Ontologie erzeugt. Unsicherheitsaspekte werden durch definierte Klassen abgebildet.

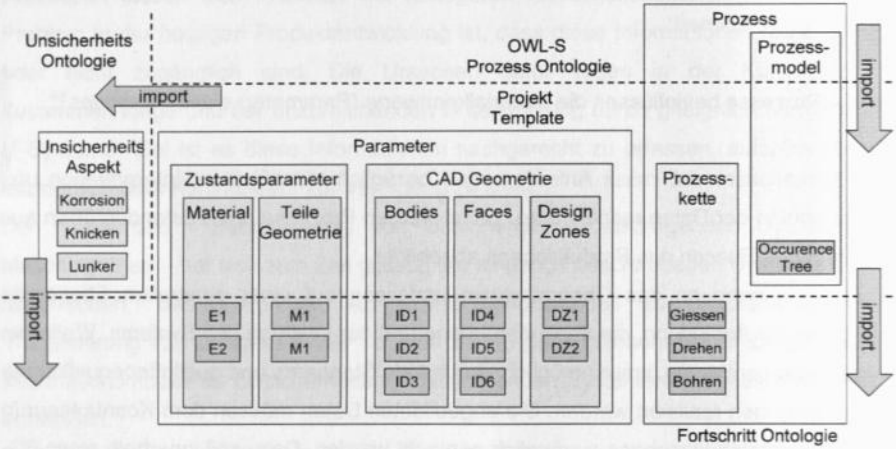


Bild 9: Struktur des ontologiebasierten Informationsmodels

In Abhängigkeit der Eigenschaften von Prozessen oder Geometrieelementen werden diese durch eine Interferenzmaschine zu einem bestimmten möglichen Aspekten zugeordnet.

Nur ein kleiner Teil dieser Datenmenge ist für automatisierte Schlussfolgerungen interessant. Aus Gründen der Performanz werden daher relational abbildbare Daten in eine Datenbank geschrieben. Eine effiziente Möglichkeit für die Überprüfung der

generierten Struktur ist die Überprüfung der Kernfragen. Alle zur Beantwortung nötigen Beziehungen müssen mindestens implizit enthalten sein.
Die Abbildung von möglichen Prozessabläufen erfolgt mit den Vorgaben der w3c Empfehlung für semantische Webservices OWL-S [7]. Reale Prozessketten werden als Sequenzen abgebildet. Die Instanzen der Fortschrittsontologie sind in die Klassen der Projektontologie eingeteilt und referenzieren Massendaten in einer Datenbank (zB. umfassende Parameter von Werkzeugmaschinen), Unsicherheitsaspekte werden durch Ihre Eigenschaften identifizeirt und dem entsprechenden Unsicherheitsaspekt zugeordnet.

Zur Beherrschung von Unsicherheiten ist die Visualisierung dieser Unsicherheiten notwendig. Sie werden kontextbezogen zu der jeweiligen Phase der Produktenstehung dargestellt. Als Basis dient ein dreidimensionales CAD-Modell des lasttragenden Systems. Dies erfordert die Existenz eines Unsicherheitsbrowsers, der die Informationen über die einzelnen Unsicherheiten und deren individuelle Auswirkung in einer tabellarischen Form beinhaltet. Der Aufbau dieses Browsers sieht ein Sichtenkonzept vor, welches z.B. Unsicherheiten darstellt, die ein bestimmtes Bauteil des lasttagenden Systems betreffen oder die in einer bestimmten Produktentstehungsphase ihren Ursprung haben.
Der Unsicherheitsbrowser dient zur Visualisierung der in der Ontologie gespeicherten Daten. Hierbei muss zunächst die Modellstruktur des CAD-Modells des lasttragenden Systems ausgelesen werden und in das Ontologie-Modell importiert werden. Hier wird es mit Informationen zu Unsicherheit angereichert. Beim Anwählen einer Information im Browser wird der Inhalt am 3D-CAD-Modell durch Kombination einer textbasierten Darstellung der Unsicherheitsinformationen und einer graphischen Hervorhebung des Wirkbereiches am 3D-CAD-Modell visualisiert.

Zur Umsetzung des im vorherigen Kapitel beschriebenen Konzeptes wird ein modulares System implementiert. Dieses System erlaubt die Nutzung Semantischer Technologien innerhalb eines Entwicklungswerkzeuges wie z.B. einem CAD-System. Realisiert wird diese Funktion durch die Kopplung des Ontologie Editors Protégé mit, einer relationalen Datenbank für Unsicherheitsdaten und einem Produktenwicklungswerkzeug, in diesem Fall das CAD-System NX aus dem Hause Siemens. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Elementen wird über die NX-open Schnittstelle und der OWL-API realisiert.

4 Fazit

In diesem Beitrag wurde ein ontologie-basiertes System vorgestellt, welches zum Ziel hat Unsicherheiten die ein Produkt betreffen, abzubilden und für den Produktenwicklungsprozess zu visualisieren. Dies ist ein wichtiger Beitrag für die Entwicklung sicherer und effizeienter Produkte. In weiteren Schritten muss das skizzierte System ausgebaut und weiter detailliert werden.

Danksagung
Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung des Projekts im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 805.

Literatur

[1] Misra, Krishna; *Handbook of Performability Engineering*, 1.Aufl. Berlin: Springer, 2008.

[2] Gruber, Thomas: A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. In: *Knowledge Acquisition*, 5(2):199-220, 1993.

[3] The W3C Consortium. OWL 2 Web Ontology Language Overview- W3C Recommendation 27. Oct 2009.

[4] Engelhardt, R.; Koenen, J.; et al. *A Model to Categorize Uncertainty in Load-Carrying Systems*. In MMEP Modelling and Management of Engineering Processes. 19-20.07.2010 in Cambridge/UK

[5] Thel, Michael: Wissensstrukturierung und –repräsentation im *Produktentwicklungsprozess*. Shaker Verlag, Aachen, 2007.

[6] Hitzler,Pascal; Krötzsch Markus; et. al: *Semantic Web: Grundlagen*. 1.Aufl., Springer Verlag, Berlin,2007

[7] World Wide Web Consortium: *All Standards and Drafts*. http://www.w3.org/TR/ Juli 2010.

[8] Card, S.K.; Mackinlay, J.D.; Shneiderman, B.: *Readings in Information Visualization. Using Vision to Think*. San Francisco, CA, Morgan Kaufmann, 1999

Einbindung von Verifizierungsmethoden in frühe Entwicklungsphasen am Beispiel von Hausgeräten

Andreas Meyer-Eschenbach

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Institut für Konstruktion und Produktentwicklung
Berliner Tor 21, 20099 Hamburg
Email: andreas.meyer-eschenbach@haw-hamburg.de
Internet: http://www.mp.haw-hamburg.de/

Inhalt: *In Entwicklungsprojekten spielt die Verifizierung von Komponenten und Systemen eine wesentliche Rolle, insbesondere dann, wenn hohe Sicherheits- und Lebensdaueranforderungen bestehen. In der Literatur sowie in Normen und Richtlinien findet man zahlreiche Verifizierungsmethoden. Die Verknüpfung dieser Methoden mit dem Entwicklungsprozess ist allerdings nicht konkret beschrieben. Die Einbindung in den Entwicklungsprozess ist oft nur in allgemeinen Ablaufdiagrammen dargestellt. Die erforderliche Einbindung von Verifizierungsmethoden in den Entwicklungsprozess wird hier am Beispiel der Entwicklung von Hausgeräten diskutiert. Die Empfehlungen und die Schlussfolgerungen sollen insbesondere Projektleitern und Entwicklungsingenieuren helfen.*

Abstract: *In particular when high demands are placed on safety and reliability, the verification of components or systems in the course of development projects can be crucial. There are many verification methods in the literature and in standards, but verification in combination with the development process is not described exactly. The integration in the design process is often only indicated in general flow charts. The needed integration of verification methods in the development process is discussed, with a focus on the development of household appliances. The recommendations and their conclusions can help project managers and product developers.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, Verifizierung, Versuch, Erprobung, Simulation, Konsumgüter.*

Keywords: *Product Development, Verification, Test, Computer Simulation, Consumer Products.*

1 Einleitung

In Entwicklungsprojekten erfordern Maßnahmen zur Absicherung der Produkteigenschaften oft erhebliche Zeit. Vielfach sind anschließend zumindest kleine konstruktive Änderungen notwendig, die in späten Entwicklungsphasen meist hohen ungeplanten Aufwand verursachen und den festgelegten Serienanlauftermin gefährden. Eine spürbare Prozessverbesserung wird bereits durch den intensiven Einsatz von unterschiedlichen

Simulationstechniken sowie durch Rapid Prototyping in frühen Entwicklungsphasen erreicht. Zahlreiche Versuche und Erprobungen an Komponenten, Systemen und kompletten Produkten sind allerdings immer noch in einem großen Umfang notwendig.
Besonders bedeutend ist der Einfluss der Verifizierung bei Komponenten und Systemen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen sowie bei komplexeren mechatronischen Systemen [1], [2]. Produkte für den öffentlichen Verkehr, wie z.B. Weichenantriebe oder Achsen in der Eisenbahnbranche, müssen strenge Sicherheitsvorschriften bestehen [3]. Auch Konsumgüter, wie z.B. Hausgeräte, die meist von nicht technisch ausgebildeten Personen betrieben werden, erfüllen zahlreiche Sicherheitsvorschriften und sicherheitsrelevante Anforderungen [4].
Spätere Produktmängel, die zu Garantieansprüchen oder zu Rückrufaktionen führen, verursachen meist hohe Kosten und schaden dem Ruf des Unternehmens. Andererseits verzögern ungeplante zusätzliche Entwicklungsschleifen die erforderliche Serienfreigabe um mehrere Monate. Daher müssen Projektleiter und Konstrukteure in jeder Projektphase den aktuellen Stand der Verifizierung kennen. Eine besondere Rolle spielt die Verifizierung bei Projekten mit kurzen Entwicklungszeiten, bei der verstärkten Einbindung von Zulieferern und Dienstleistern, mit denen definierte Abnahmebedingungen vereinbart werden und bei einer verteilten standortübergreifenden Produktentwicklung.
Bei der Suche nach Literatur zu Konstruktionsmethoden und deren Anwendung findet der Produktentwickler meist deutlich einfacher geeignete Quellen als bei der Suche nach Verifizierungsmethoden. Nach Erfahrungen des Autors gibt es in großen Unternehmen der Branchen Automobile und Automobilzulieferer, Hausgeräte und Bahntechnik detaillierte Handbücher, in denen Verifizierungsmethoden genau beschrieben sind. Diese Handbücher sind allerdings nicht frei verfügbar und selbst auszugsweise nur selten veröffentlicht.

2 Verifizierung im Produktentwicklungsprojekt

Der Ablauf von Verifizierungsprozessen wird durch konventionelle Methoden, wie z.B. durch QM-Tools zur Prozesssteuerung nach ISO 9000 ff oder durch Abläufe nach VDI 2206 [2] unterstützt. Weiterhin helfen klassische Konstruktionsmethoden, die zu einer eindeutigen Gestaltung und zu berechenbaren Komponenten führen [5]. Schließlich

müssen jedoch zahlreiche quantifizierte Anforderungen mit den Ergebnissen aus Berechnung und Versuch verglichen und Maßnahmen definiert werden.
Diese vielschichtigen Verifizierungsprozesse werden bereits seit den 90er Jahren durch zahlreiche Methoden und Programme unterstützt, wie z.B. Geometrieprüfungen mit Digital Mock-Up, frühe Tests mit Prototypen mit Komponenten aus Rapid Prototyping Verfahren, Schwingungsberechnung mit Mehrkörpersimulation (MKS), Festigkeitsberechnung mit der Finiten Elemente Methode (FEM), Lebensdauerversuche mit seriennahen Bauteilen [6].
Bei der Entwicklung von Hausgeräten, wie z.B. Waschmaschinen, erfolgen zahlreiche zum Teil zeitaufwändige Verifizierungsprozesse. Neben der Zuverlässigkeit über Lebensdauer ist ein zuverlässiger und gefahrloser Betrieb auch unter verschiedenen Extrembedingungen gefordert. Darüber hinaus müssen die angekündigten Produkteigenschaften eingehalten werden. Die hierzu notwendigen Erprobungen dauern oft Monate. Nach der Interpretation der Ergebnisse kommt es häufig zu Änderungen bei der Gestaltung von Komponenten.

2.1 Verifizierung als Prozess

In industriellen Produktentwicklungsprozessen findet man immer wiederkehrende Prozessabläufe, s. Bild 1, die sich aus dem allgemeinen Lösungsprozess ableiten [5].

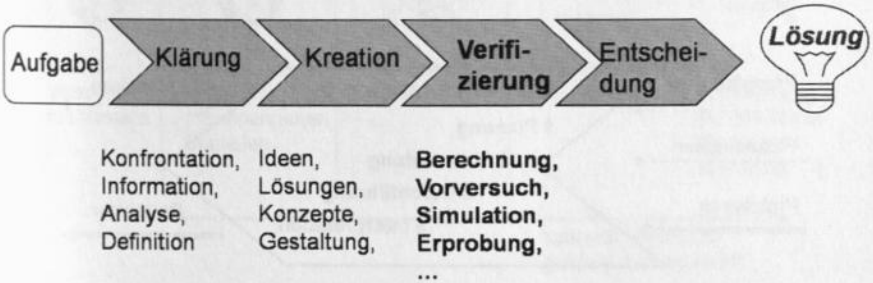


Bild 1: Verifizierung in Prozessabläufen der Produktentwicklung

Die oben dargestellte Verifizierung beinhaltet im Kern typische Durchführungs-Prozesse, wie z.B. Berechnung, Vorversuch, Simulation und Erprobung.

2.2 Arbeitsschritte der Verifizierung

Eine Verifizierungsmethode kann in vier typische Arbeitsschritte gegliedert werden.

Tabelle 1: Typische Arbeitsschritte einer Verifizierungsmethode

Arbeitsschritte	Ausgewählte Arbeiten in diesen Arbeitsschritten
1 Planung	Einordnung in die Projektplanung, Systemanalyse, Ermittlung der Eingangsdaten, Grobplanung von Zeit, Ressourcen und Kosten
2 Vorbereitung	Anpassung der Mess- und Prüftechnik, Detailfestlegung der Versuchs- oder Simulationsmethode, Feinplanung der Versuchs- oder Berechnungsparameter, Klärung der Beurteilungskriterien
3 Durchführung	Durchführung von Versuchsreihen oder Berechnungen, begleitende Auswertung
4 Interpretation	Abschließende Auswertung, Vergleich mit anderen Ergebnissen, Interpretation, Aufbereitung der Ergebnisse zur geeigneten Kommunikation

Nach der Projekterfahrung des Autors betrachten die beteiligten Projektingenieure oftmals den Arbeitsschritt „Durchführung" und unterschätzen dabei die anderen Arbeitsschritte. Dies kann z.B. dazu führen, dass eine Verifizierung nach Projektplan begonnen werden soll, allerdings die erforderlichen Vorbereitungen noch fehlen. Bild 2 zeigt den groben Ablauf einer Verifizierungsmethode.

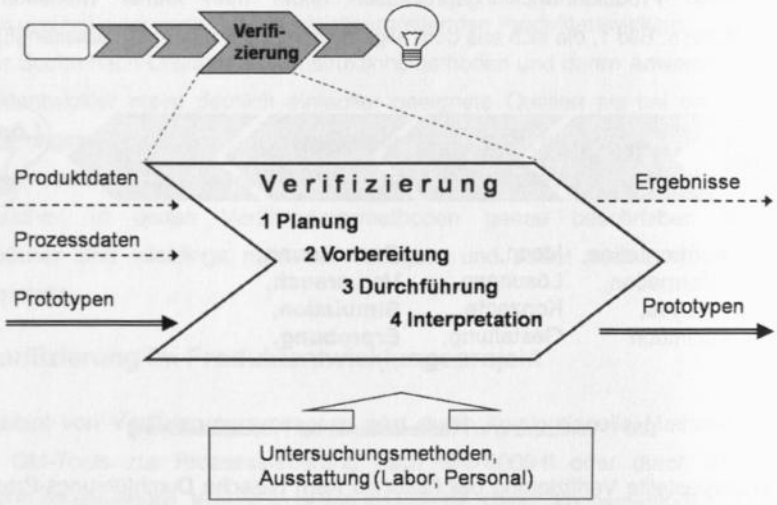


Bild 2: Ablauf der Verifizierung in der Produktentwicklung

In Bild 2 ist der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen (INPUT) und Ausgangsgrößen (OUTPUT) erkennbar. Zur Diskussion werden zwei ausgewählte Probleme aufgeführt die in der Praxis auftreten können:

Während größere Verifizierungen, wie z.B. zeitintensive Lebensdauerversuche, bereits zu Beginn in der Projektplanung berücksichtigt werden, werden einige kleinere Verifizierungsmethoden nicht von Beginn an eingeplant.

Zum vereinbarten Start der FEM-Berechnungen liegen die Daten zu den auftretenden Betriebslasten und die tatsächlichen Werkstoffdaten noch nicht vor.

3 Lebensdauerversuche bei Hausgeräten

Vor der Serienfreigabe sind bei Hausgeräten, ebenso wie bei Automobilen oder anderen technischen Produkten, Erprobungen notwendig, die eine Aussage zur „Zuverlässigkeit über Lebensdauer" ermöglichen. Bei Waschmaschinen ist eine Lebensdauer von mindestens 10 bis 12 Betriebsjahren üblich, was z.B. durch die 2000-fache Wiederholung des „härtesten" Waschprogrammes (meist Kochwäsche) nachgewiesen werden kann.

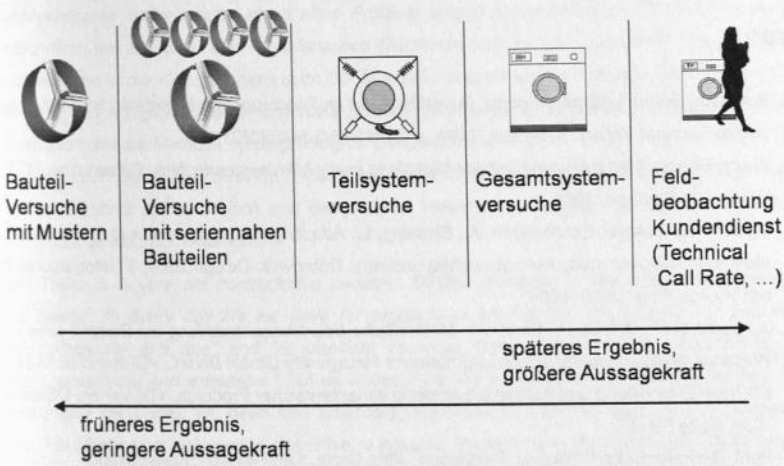


Bild 3: Auswahl geeigneter Lebensdauerversuche

Diese Erprobung dauert selbst im Dauerbetrieb meist sechs bis sieben Monate. Aussagekräftig ist diese Erprobung erst dann, wenn überwiegend Serienbauteile

verwendet wurden. Bei einer Projektdauer von weniger als 20 Monaten bedeutet dies theoretisch, dass das Produkt bereits nach zwei Drittel der Projektlaufzeit fertig entwickelt ist und mit Serienwerkzeugen hergestellt wurde, deren Anfertigung bereits drei bis sechs Monate dauerte. Bild 3 zeigt hierbei folgenden Konflikt: Versuche mit Mustern liefern frühe Ergebnisse aber eine geringere Aussagekraft, Versuche mit Maschinen aus Serienbauteilen liefern eine größere Aussagekraft, aber die Ergebnisse kommen meist zu spät, um in die Entwicklungsschleifen vor dem Serienstart einzufließen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Bei Projekten mit kurzen Entwicklungszeiten müssen verifizierende Methoden oft sehr früh beginnen und schnell erfolgen. Hierzu ist die gründliche Planung und Vorbereitung der Verifizierung entscheidend. In mehreren Projekten hat es sich bewährt, dass bereits in frühen Entwicklungsphasen ein projekterfahrener Versuchs- und Berechnungsingenieur die unterschiedlichen Verifizierungsmethoden plant und die Rahmenbedingungen klärt. Verifizierungspläne, die zum großen Teil auch für Folgeprojekte verwendet werden können, erweisen sich dabei als sehr gutes Planungsinstrument.

Literatur

[1] Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau.* 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, New York, 2004. – ISBN 978-3-540-20871-6

[2] Watty, Robert: *Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik.* Dissertation, IKTD, Universität Stuttgart, 2006.

[3] Meissner, M.; Meyer-Eschenbach, A.; Blessing, L.: *Adapting a design process to a new set of standards – A case study from the railway industry.* Dubrovnik: Design 2004, 8th international design conference. May 18-20, 2004.

[4] Jungerberg, H., Brandt, R., Beitz, W.: *Methodische Baureihenentwicklung am Beispiel einer neuen Waschgerätebaureihe der Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH Berlin* . VDI-Berichte 1434: Effektive Entwicklung und Auftragsabwicklung variantenreicher Produkte. VDI-Verlag, Düsseldorf 1998, Seite 69 –82.

[5] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung.* 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7

[6] Ehrlenspiel, Klaus: Integrierte Produktentwicklung; *Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.* 3. Aufl. München: Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978-3-446-40733-6

Methoden des Industrial Designs als Herausforderung für die Produkt- und Prozessinnovation im klassischen Maschinen- und Anlagenbau“

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
FB Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik, Philipp-Müller-Str. 14, 19352 Wismar
Email: henrik.schnegas@hs-wismar.de

Inhalt: *Eine schöne Form, ein gestyltes Aussehen oder eine ansprechende Farbgebung gehören heute zum Selbstverständnis von Produkten im Privatbereich. Im klassischen Maschinen- und Anlagenbau scheint es jedoch noch immer eine breite Kluft zwischen herrkömmlichen Konstruktionsauffassungen und designerischen Wünschen und Forderungen zu geben. Während die reinen Maschinenbau-Produkte mit den Eigenschaften „Quadratisch, praktisch, gut und preiswert“ umschrieben werden können, werden einer reinen designerischen Leistung oft die Adjektive „schön, extravagant, abgehoben und vor allem kaum bezahlbar und schwer zu fertigen“ zugewiesen. Zur Verringerung dieses Widerspruches können in den klassischen Konstruktionsprozess designerische Ideen ohne Problem aufgenommen werden. Durch Anwendung von Zeichentechniken wie Scribblen oder künstlerisches Skizzieren können z.B. ungeahnte kreative Freiheiten bei der Ideensuche in der Konzeptphase auch bei Maschinenbauern erweckt werden, was mit dem Einsatz vieler 3D-CAD-Technologien so leider nicht mehr möglich ist. Möglich ist auch eine Kombination von Design und Konstruktion, die als Methode vordergründig im Rahmen des Design for X während der Entwurfsphase angewendet werden kann, ohne dass dem Maschinenbauer neue künstlerische Fertigkeiten aufgezwungen werden. Das Ergebnis sind technisch und designerisch verfeinerte Produkte, die gleichzeitig einen individuellen Kundengeschmack entprechen.*

Abstract: *There is a very old contradiction between Design methods of Mechanical Engineering and Industrial Design. In every day life we have for products of Mechanical engineering the pseudonyms "quadratic, practically and fine" and for classical Industrial Design Products the pseudonyms "Nice, extravagant, eccentrical and expensive." But we know, if we like to sell products we need not only Safety, Functionality and low prices, we need also artistically properties for example shape, color, proportion or ergonomy. For Mechanical engineers it's possible to integrate these facts in the classical Design Process. In the following text you find any marks to this topic.*

Stichwörter: *Produktdesign, Konstruktionsprozess, Design for X, Form, Farbe, Ergonomie*

Keywords: *Industrial Design, Design Process, Design for X, Shape, Color, Ergonomy.*

1 Widerspruch zwischen Konstruktion und Design

Schöne, ansprechende und ästhetisch auf den Anwender wirkende Maschinen und Anlagen sind nicht erst in der Gegenwart eine Forderung an die Konstrukteure. In einem der ersten Konstruktionsbücher von Moll und Reuleaux aus dem Jahr 1862 finden wir die designerisch geprägte Textpassage: „ Das Streben nach Schönheit der Form liegt auch im Maschinenbau so nahe, dass man es fast überall bethätigt findet, ja, es verleiht demselben ein eigenes Interesse, welches den Construirenden für manche mühsame und abspannende Kopfarbeit zu entschädigen vermag und seine ganze Thätigkeit auf eine höhere Stufe erhebt."

Während in den folgenden Jahrzehnten eine Einheit von maschinenbaulichen und künstlerischen Gestaltungstätigkeiten in allen Konstruktionsbereichen bestand, hat sich eine rein maschinenbauliche und rein designerische Tätigkeit in der jüngeren Zeit herausgebildet. Entstanden sind zwei scheinbar voneinander strikt getrennte Wissensgebiete, die eine Reihe von konträren Ansichten hervorbringen, die scheinbar einen unüberbrückbaren Widerspruch zwischen Design und klassischer Konstruktion offenlegen. In der nachfolgenden Tabelle sind einige der vordergründigsten, zum Teil vorurteilsbehafteten Eigenschaften für Produkte aus Konstruktion und Design gegenübergestellt.

Tabelle 1: Meinungen und „Vorurteile" zu Design und Konstruktion

Maschinenbau =	Design =
Quadratisch, praktisch, gut aber unansehnlich.	Extravagant, abgehoben, luxuriös und teuer.

Aus Sicht des Maschinenbaus gilt gemäß Tabelle 1 das klassische Design demzufolge als zu teuer und unbrauchbar für den Alltag. Designer werden lediglich als oberflächliche Produktkosmetiker bzw. Stylisten gesehen. Entgegen dieser Meinung wird aber auch bewusst wahrgenommen, dass rein maschinenbaulich gestaltete Produkte zwar funktionell beim Kunden anerkannt sind, ein ästhetisches, formschönes und in das jeweilige Umfeld eingepasstes Produkt aber mit zunehmenden Maß ein Garant für den Markterfolg ist. Aus diesem Grund erscheint eine engere Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Design als angebracht. Die Frage, ob Maschinenbauer designerische Fähigkeiten und Fertig-

keiten ergänzend zu ihrem bisherigen Arbeitsfeld verwenden sollten, ist eindeutig mit ja zu beantworten.

Neben der Realisierung von *praktischen Funktionen*, die auf der Anwenderebene während der Nutzung des Produktes körperlich erfahrbar sind, sollten auch verstärkt ergonomische, sowie taktile und haptische Empfindungen erlebbar gestaltet werden.

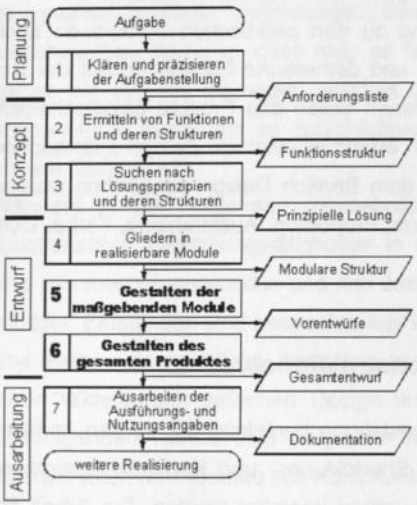
Aus dem Bereich des Designs sind ergänzend zu den praktischen Funktionen auch *symbolische* Funktionen auf der Besitzerebene und *ästhetische* Funktionen auf der Betrachterebene umzusetzen. Symbolische Funktionen sollen das Produkt gesellschaftlich und ästhetische Funktionen das Produkt sinnlich erfahrbar machen. Zu den ästhetischen Funktionen gehören Eigenschaften, die bisher dem Bereich Design zugeordnet worden sind. Dazu zählen Produkteigenschaften wie Form, Proportion, Ausstrahlung, Farbe, Licht und Oberfläche.

2 Industrial Design im klassischen Konstruktionsprozess

Sollen designerische Aspekte bei der Produktgestaltung berücksichtigt werden, müssen notwendige Arbeitsschritte in den klassischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess gleichberechtigt neben den bisherigen Arbeitsschritten integriert werden. Die Arbeit am Design darf dabei nicht als Zusatzlast oder „Fremdkörper" verstanden werden sondern muss eine Selbstverständlichkeit werden.

Dazu gehört in der Planungsphase das Erfassen von anwenderspezifischen, mode-, zielgruppen-, form-, farb- und ästhetikbezogenen Forderungen bzw. Wünschen. In der Konzeptphase sollten nicht PC- und CAD-generierte, sondern gefühlsbetonte Konzepte händisch generiert werden. Wenn aus einem Gefühl heraus Gedanken über die Hand auf das Papier gebracht werden, können zwangshaft durch den PC vorgegebene Formen vermieden und der Kreativität freien Lauf gelassen werden, was jedoch eine höhere Qualität an händischem Darstellungsvermögen verlangt. Verbunden mit computergestützten Verfeinerungen und Nacharbeiten z.B. mit Programmen wie Freehand, Photoshop oder GIMP entstehen Konzepte, die auch einem potenziellen Kunden zwecks Diskussion präsentiert werden können. Der Hauptarbeit des designerischen Gestaltens wird dann in der Entwurfsphase geleistet. Hier finden wir im Rahmen der Gestaltungsphase und hier besonders im Rahmen des Design for X den geeigneten Arbeitsschritt.

Tabelle 2: Einordnung des Industrial Designs in den Konstruktionsprozess

EKP nach VDI 2221	Schwerpunkte hinsichtlich Gestaltung
	Für die Anforderungsliste: praktische, symbolische und ästhetische Funktionen, vorhandene Fertigungsverfahren, Werkstoffwünsche, Formwünsche, Ästhetik, Ergonomieforderungen, ... Gestaltforderungen als Suchkriterien beim Generieren von Lösungen. Gestaltanforderungen als Bewertungskriterien. Scribblen und Handskizzen als Ideenwerkzeug. Design for X mit designgerechtem Gestalten Anwendung gestaltungsrelevanter Präsentations- und Darstellungstechniken

3 Scribblen – eine Skizziertechnik auch für Ingenieure?

Das händische Zeichnen bereitet im Computerzeitalter immer mehr Probleme. Stattdessen werden vektororientierte Zeichenprogramme genutzt, die nicht immer eine ordentliche und vor allem verständliche Zeichnung gewährleisten. Oft genug zwingt der PC dem Nutzer seine Eigenarten auf. Gewünschte Formen und Gestalten werden zugunsten der computerbedingt umsetzbaren Gestalten geopfert. Der VDI hat diesen Mangel erkannt und bietet wieder verstärkt Schulungskurse im Skizzieren an, denn trotz der Computertechnik können spontane Ideen und im Gespräch gewonnene Erkenntnisse am besten händisch zu Papier gebracht werden. Eine Nachbearbeitung der Handskizzen nach dem Einscannen mit dem PC z.B. mit Programmen wie Photoshop, Freehand, Sketcher oder GIMP erscheint als sinnvoll und qualitätshebend. Für eine verbesserte Darstellungstechnik ist es ratsam, designerische Techniken anzuwenden. Maschinenbaulich geprägte Darstellungen in 2- und Mehrtafelprojektion bzw. Isometrie, Dimetrie, Kavalier- und

Kabinettperspektive sind durch Zentralperspektiven mit einem oder mehreren Fluchtpunkten unter Berücksichtigung von Licht und Schatten zu ergänzen. Abbildung 1 zeigt diesbezüglich einen Vergleich zwischen herkömmlicher Darstellungstechnik und designerisch geprägter Scribble-Technik.

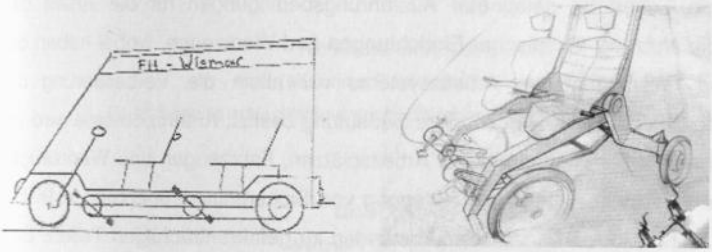


Bild 1: Vergleich Skizziertechnik Maschinenbau und Design

4 Farbempfindung und Farbpsychologie bei der Produktentwicklung

Im Rahmen des Design for X spielt im Bereich des designgerechten Gestaltens die Farbgebung eine große Rolle. Farben können die verschiedensten Reaktionen und Assoziationen im Menschen auslösen. Die einzelnen Bedeutungen der Farben mit Schwerpunkt Europa sind aus der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Farbbedeutung und -wirkungen auf Menschen und Umgebung

Rot	Vitalität, Aktivität, Dynamik, Gefahr, Leidenschaft, Liebe, Wärme, stimulierend, aktivierend, aufregend, unruhig, aggressiv
Orange	Freude, Lebhaftigkeit, Spaß, Tatkraft, Ausgelassenheit, heiter, freundlich, optimistisch
Gelb	Reife, Kraft, erfolg, Glück, heiter, freundlich, optimistisch
Grün	Hoffnung, Entspannung, Ruhe, Natürlichkeit, ausgleichend, regenerierend, beruhigend
Blau	Ruhe, Unendlichkeit, Frische, Kühle, lösend, harmonisierend, entspannend
Braun	Bequemlichkeit, Anpassung, Schwere, konservativ
Weiß	Reinheit, Sauberkeit, Ordnung, Unschuld, Vollkommnheit
Schwarz	Trauer, Einengung, Abgeschlossenheit, Pessimismus, Hoffnungslosigkeit, Schwere

5 Ergonomie und Anthropometrie bei der Produktentwicklung

Im klassischen Konstruktionsprozess ebenfalls unzureichend berücksichtigt werden derzeit ergonometrische und besonders anthropometrische Restriktionen. Zentrales Ziel der *Ergonomie* ist die Schaffung geeigneter Ausführungsbedingungen für die Arbeit des Menschen und die Nutzung technischer Einrichtungen und Werkzeuge, wobei neben der menschgerechten Gestaltung des Arbeitssystems vor allem die Verbesserung der Mensch-Maschine-Beziehung eine besondere Bedeutung besitzt. Anthropometrie wird vor allem in der Ergonomie zur Gestaltung von Arbeitsplätzen, Fahrzeugen und Werkzeugen gebraucht, sowie im Arbeitsschutz zur Festlegung von Sicherheitsmaßnahmen z. B. Bemessungen von Schutzabdeckungen oder Abständen zu gefahrenträchtigen Teilen. Eine Empfehlung für den Konstrukteur ist die Verwendung von Normen wie EN ISO 7250: Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung, DIN 33402: Körpermaße des Menschen, DIN 33408: Körperumrissschablone und die DIN 33411: Körperkräfte des Menschen. Neben diesen allgemeinen Informationen können z.B. auch Ergonomie-Programme mit integrierten Anthropometrie-Datenbanken verwendet werden, wie es z.B. mit dem Menschmodell RAMSIS in CATIA V5 der Fall ist.

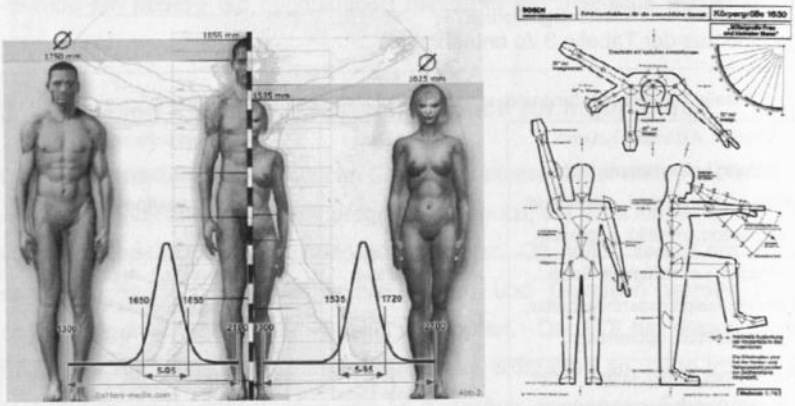


Bild 2: Anthropometriemodell und Körperumrissschablone

Literatur

[1] Zölch, Volker; Schnegas, Henrik: Industrial Design für den Maschinenbau. HSW, 2010.

[2] Heufler, Gerhard; Design Basics – Von der Idee zum Produkt, Niggli AG, 2009

Auslegung & Optimierung von mehrstufigen Getrieben

Berthold Schlecht, Tobias Schulze, Christian Hartmann-Gerlach*

Technische Universität Dresden
Münchner Platz 3, 01067 Dresden
Email: berthold.schlecht@tu-dresden.de; Internet: http:// www.me.tu-dresden.de

DriveConcepts GmbH
Wettiner Platz 10, 01067 Dresden
Email: contact@driveconcepts.com; Internet: http://www.driveconcepts.com

Inhalt: *Die Globalisierung und die stetig wachsenden Kundenanforderungen stellen die Unternehmen vor immer neue Herausforderungen. Um dem wachsenden Kostendruck bei steigenden Qualitätsanforderungen gerecht zur werden, sind die Unternehmen zu grundlegenden Umstellungen im Entwicklungsprozess gezwungen. Für den Maschinenbau spielen Getriebe mit ihrer Drehmoment- und Drehzahlübertragung eine enorm wichtige Rolle. Die Auslegung und Optimierung eines kompletten Getriebes als Produkt stellt dabei hohe Anforderungen an Konstrukteur und Berechnungsingenieur. Das komplexe Modell eines Getriebes, welches aus einer Vielzahl von Maschinenelementen (Wellen, Zahnräder, Lager, Gehäuse, Dichtung, Welle-Nabe-Verbindungen,...) besteht, muss als System verstanden werden, dessen Einzelelemente mehr oder weniger starken Abhängigkeiten unterliegen. Neben der Berechnung der Getriebekinematik, dem Nachweis der Tragfähigkeit und Lebensdauer der Einzelelemente, treten zunehmend Aspekte wie Wirkungsgrad, Geräuschentwicklung sowie Lastverteilung der Verzahnung in den Vordergrund.*

Abstract: *Gear Boxes play an important role in mechanical engineering because of their moment and speed transmission possibilities. Design and optimization of a complete gearbox provide a lot of requirements to the designer. The complex gear box model consists of a large number of machine elements (shafts, gears, bearings, housing, seals, shaft-hub connections). The gearbox must be understood as a system with interactive partners. Next to calculation of kinematics, load capacities and life times of single elements aspects of load distribution and effective and noisy gear boxes become important.*

Stichwörter: *Getriebeauslegung und -optimierung, Verzahnung, Wellen, Lager, Lastverteilung, Gehäusesteifigkeit*

Keywords: *Gearbox design, gearbox optimization, gears, shafts, bearings, load distribution, housing stiffness*

1 Einleitung

Die Entwicklung der Getriebe mit der ständigen Forderung nach leichten Konstruktionen, Ressourcen schonenden Materialeinsatz bei gleichzeitig hohen Übertragungsleistungen führt zwangsweise zu immer größeren Leistungsdichten und zu höheren Anforderungen an die Zuverlässigkeit. Hierbei kommen aufgrund der konstruktiven Vielfalt und Anwendbarkeit immer mehr Planetengetriebe in der gesamten Antriebstechnik zum Einsatz. Es werden ein- und mehrstufige Lösungen realisiert, mit einem oder mehreren An- bzw. Abtrieben. Weiterhin unterscheidet man nach der Art der Verzahnung in geradverzahnt, einfachschrägverzahnt und doppelschrägverzahnt, sowie nach der Art der Lagerung in wälz- oder gleitgelagert. Planetengetriebe werden in einem enorm großen Anwendungsbereich zur Übertragung von Drehmoment eingesetzt. Die zu übertragende Leistung variiert je nach Anwendungsgebiet von einigen Watt bis zu 100 MW, Bild 10.

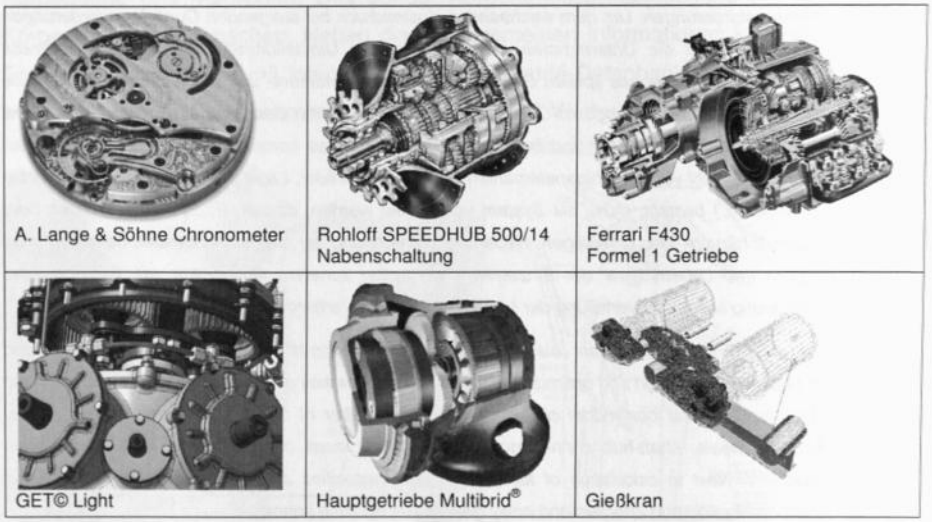


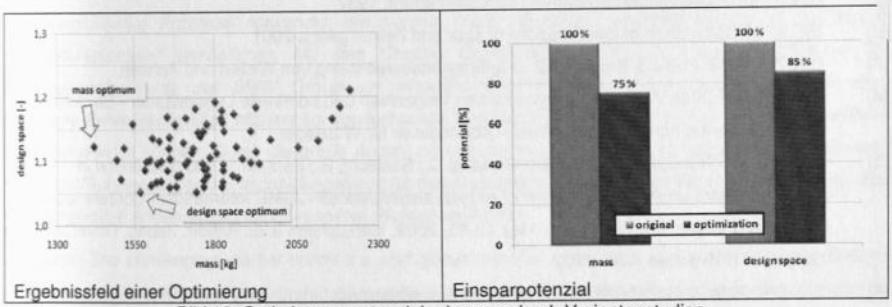
Bild 10: Anwendungsbeispiele von Planetengetrieben

Die Vorteile von Planetengetrieben gegenüber anderen Getriebebauarten zur Drehzahl- und Momentenwandlung liegen einerseits in der Möglichkeit einer Änderung des Übersetzungsverhältnisses unter Last, d.h. ohne Unterbrechung des Kraftflusses, und

Berechnung kann die Messkampagnen und Prüfläufe nicht ersetzen, jedoch können unnötige Iterationsschleifen bereits im Vorfeld kostengünstig reduziert werden.

4 Softwareunterstütze Getriebeberechnung und -optimierung

Gemäß den gestiegenen Anforderungen an heutige Getriebekonstruktionen ist nicht nur eine einwandfreie Auslegung und Nachrechnung der Planetengetriebe von vordergründiger Bedeutung. Es werden der Optimierung hinsichtlich Masse und Bauraumbedarf zusehends mehr Notwendigkeit beigemessen. Daher gilt es, mit Hilfe leistungsfähiger Software dem Konstrukteur ein verlässliches Werkzeug zur Seite zu stellen. Dabei geht es zunächst um die normgerechte Berechnung der relevanten Maschinenelemente. Jedoch benötigt der Konstrukteur gleichzeitig ein Werkzeug zur innovativen Auslegung von Getrieben. Eine rechnergestützte optimierte Auslegung stellt dabei die effizienteste Vorgehensweise im Entwurfsstadium dar.



Ergebnissfeld einer Optimierung | Einsparpotenzial

Bild 13: Optimierungspotenzial erkennen durch Variantenstudien

Die Betrachtungen können sowohl zur Verbesserung bestehender Getriebelösungen, als auch zur Neuauslegung herangezogen werden. Anschließend ermöglicht der fertige Getriebeentwurf vielfältige Optimierungsmöglichkeiten der Makrogeometrie sowie der Mikrogeometrie. Die Festlegung der Verzahnungsmodifikationen unter Berücksichtigung der Getriebeelastizitäten sowie die teilautomatische Berechnung der Gehäusesteifigkeiten [9] stellen das Spektrum der Möglichkeiten der Software MDESIGN® gearbox sowie MDESIGN® LVR und MDESIGN® LVR^{planet} dar.

Aussagen zu den dynamischen Belastungen liefern, um eine sichere Auslegung der Antriebsstrangkomponenten zu ermöglichen.

3 Getriebeentwicklung nach Stand der Technik

Speziell für die Entwicklung von Planeten- und Stirnradgetrieben wurde von der Firma DriveConcepts GmbH das Produkt MDESIGN® gearbox entwickelt [7,8]. Die Software ermöglicht dem Anwender eine intuitive Gestaltung des Entwicklungsprozesses vom Entwurf bis zur Nachrechnung aller Maschinenelemente eines Getriebes nach den aktuellen Normen. [1,2,3,4] . Mithilfe der Software kann das gesamte Getriebe in einem Schritt berechnet und anschließend eine komplette Dokumentation erzeugt werden (PDF/A Dokument nach ISO 19005-1:2005), Bild 12.

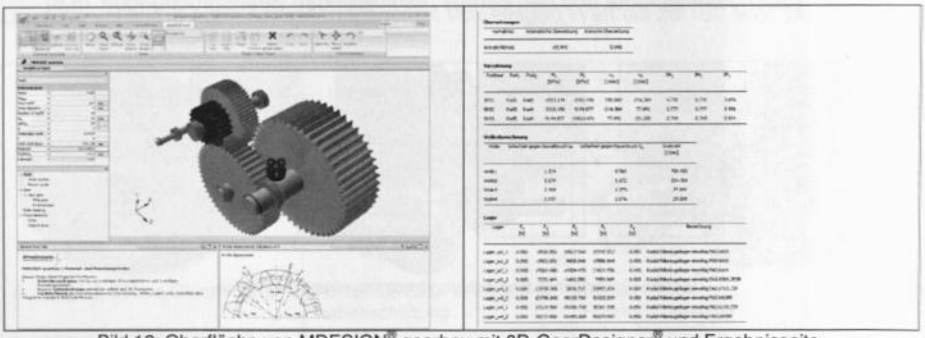


Bild 12: Oberfläche von MDESIGN® gearbox mit 3D-GearDesigner® und Ergebnisseite

Einerseits sind alle notwendigen Berechnungen der Maschinenelemente: Zahnrad, Welle, Lager, Welle-Nabe-Verbindung, Schraubenverbindung, usw. entsprechend der jeweiligen Berechnungsnormen durchzuführen. Diese müssen ergänzt werden durch detaillierte Betrachtungen zur Lastverteilung, Lastaufteilung bis hin zur Optimierung einzelner Zielgrößen (Masse, Steifigkeit,...).

Diesem Ziel verpflichtet, entwickelt DriveConcepts Berechnungssoftware unter der Benutzeroberfläche MDESIGN®. Diese zeichnet sich durch eine intuitive, anwenderorientierte Benutzerführung, Mehrsprachigkeit, automatische Dokumentation, Datenverwaltung in Datenbänken und Transparenz der Berechnung aus.

Der Einsatz der Berechnungssoftware bereits in der frühen Phase des PEP ermöglicht weit vor der Fertigung von Prototypen abgesicherte Aussagen zum fertigen Produkt. Die

Berechnung kann die Messkampagnen und Prüfläufe nicht ersetzen, jedoch können unnötige Iterationsschleifen bereits im Vorfeld kostengünstig reduziert werden.

4 Softwareunterstütze Getriebeberechnung und -optimierung

Gemäß den gestiegenen Anforderungen an heutige Getriebekonstruktionen ist nicht nur eine einwandfreie Auslegung und Nachrechnung der Planetengetriebe von vordergründiger Bedeutung. Es werden der Optimierung hinsichtlich Masse und Bauraumbedarf zusehends mehr Notwendigkeit beigemessen. Daher gilt es, mit Hilfe leistungsfähiger Software dem Konstrukteur ein verlässliches Werkzeug zur Seite zu stellen. Dabei geht es zunächst um die normgerechte Berechnung der relevanten Maschinenelemente. Jedoch benötigt der Konstrukteur gleichzeitig ein Werkzeug zur innovativen Auslegung von Getrieben. Eine rechnergestützte optimierte Auslegung stellt dabei die effizienteste Vorgehensweise im Entwurfsstadium dar.

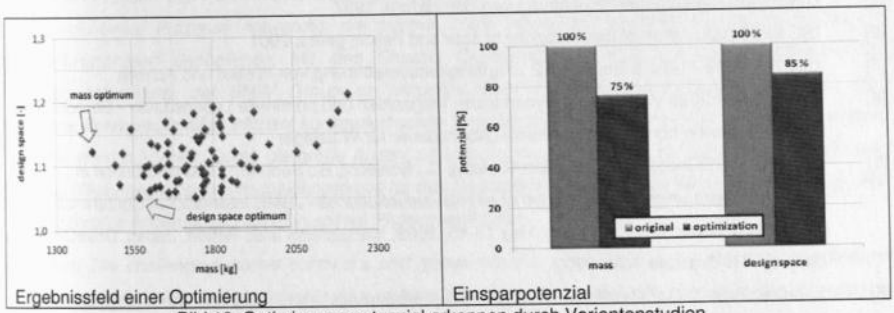
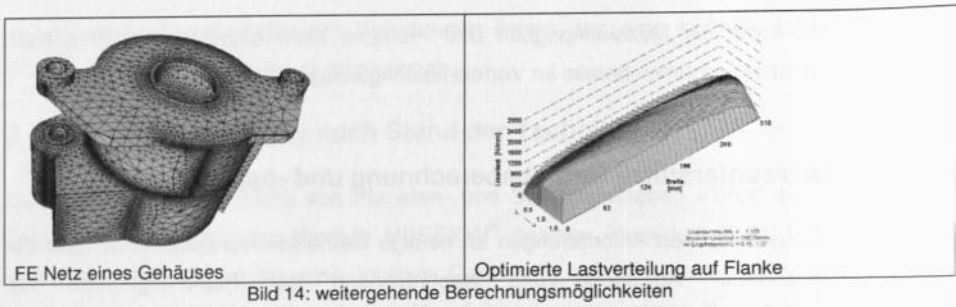


Bild 13: Optimierungspotenzial erkennen durch Variantenstudien

Die Betrachtungen können sowohl zur Verbesserung bestehender Getriebelösungen, als auch zur Neuauslegung herangezogen werden. Anschließend ermöglicht der fertige Getriebeentwurf vielfältige Optimierungsmöglichkeiten der Makrogeometrie sowie der Mikrogeometrie. Die Festlegung der Verzahnungsmodifikationen unter Berücksichtigung der Getriebeelastizitäten sowie die teilautomatische Berechnung der Gehäusesteifigkeiten [9] stellen das Spektrum der Möglichkeiten der Software MDESIGN® gearbox sowie MDESIGN® LVR und MDESIGN® LVR^{planet} dar.



FE Netz eines Gehäuses | Optimierte Lastverteilung auf Flanke

Bild 14: weitergehende Berechnungsmöglichkeiten

Somit bietet MDESIGN® gearbox einen ganzheitlichen Ansatz für die Auslegung, Nachrechnung und Optimierung nicht nur von Planetengetrieben. Dabei werden sowohl die Sicherheitsnachweise nach Norm erbracht, als auch weiterführende Berechnungen zur Lastverteilung, Lastaufteilung und Optimierung einzelner Kriterien ermöglicht.

Literatur

[1] DIN 3990 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, 1987

[2] ISO 6336 Calculation of load capacity of spur and helical gears, 2001

[3] DIN 743:2008 T1-T4 & Beiblatt 1,2 Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen

[4] DIN ISO 281:2009 Wälzlager – Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer - Berechnung der modifizierten nominellen Referenz-Lebensdauer für Wälzlager

[5] Schulze, T.; Gründer, W.; Hartmann-Gerlach, C.; Schlecht, B.; Senf, M.: *Load distribution in planetary gears under consideration of all relevant influences* - JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, May 13-15, 2009, Matsushima Isles Resort, Japan, DriveConcepts GmbH – TU Dresden IMM, 2009

[6] Schulze, Tobias: Ganzheitliche dynamische Antriebsstrangsbetrachtung von Windenergieanlagen. Sierke Verlag 2008, Dissertation TU Dresden

[7] Hartmann-Gerlach,C.; Theoretische Untersuchung zur Auslegung und Dimensionierung von Planetengetrieben, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH, 2008

[8] Bulligk, Chr.: Theoretische Untersuchung zur modularisierten Berechnung und Auslegung von Getrieben, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH, 2009

[9] Polyakov, D..; Entwicklung eines durchgängigen Rechenmodells zur Bestimmung der Gehäusesteifigkeit unter Verwendung der FE Methode, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH

Effiziente Generierung von virtuellen Produktfamilien in den frühen Entwicklungsphasen am Beispiel Fahrwerk

Marcel Böttrich, Ralph H. Stelzer*, Dirk Berkan

BMW AG, Forschungs- und Innovationszentrum
Knorrstr. 147, D-80788 München
Email: Marcel.Boettrich@bmw.de, Dirk.Berkan@bmw.de

* Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
George-Bähr-Str. 3c, D-01062 Dresden
Email: Ralph.Stelzer@tu-dresden.de; Internet: http://tu-dresden.de/mw/imm/ktc

Inhalt: *Die anspruchsvollen Marktbedingungen und globalen Herausforderungen in der Automobilindustrie erfordern immer neue innovative und nachhaltige Fahrzeugkonzepte. Zur Beherrschung der dadurch steigenden Produkt- und Funktionsvielfalt bei gleichzeitiger Reduzierung von Entwicklungszeit und -kosten sind revolutionäre Prozesse notwendig, die sichere sowie belastbare Konzepte bereits in den frühen Entwicklungsphasen ermöglichen. Mit dem Chassis Configuration Tool (CCT) wird am Beispiel der Fahrwerksentwicklung der BMW Group ein virtuelles Entwicklungswerkzeug bereitgestellt, mit dem komplexe Fahrwerksfamilien effizient konfiguriert sowie hinsichtlich Package und Funktion hochautomatisiert bewertet werden können. Durch die große Anzahl an Untersuchungsszenarien in kürzester Zeit ergibt sich eine signifikant gesteigerte Entscheidungsbasis für das Gesamtkonzept bereits in der Definitionsphase, was kostenintensive Änderungsschleifen in späten Phasen verhindert.*

Abstract: *The challenging market conditions and global requirements of the automotive industry demand increasingly innovative and sustainable new vehicle concepts. To control the corresponding increase in product and functional complexity, while reducing development time and costs, revolutionary processes are necessary in order to enable safe and reliable concepts in the early stage of development. The Chassis Configuration Tool (CCT) arms BMW Group's chassis development with a virtual development tool that enables a highly automated evaluation and efficient configuration of suspension families with respect to package and functional requirements. The large number of design scenarios that can be researched in the shortest of times results in a significantly increased decision basis for the complete concept early on in the definition phase. This in turn limits cost intensive changes in later phases of development.*

Stichwörter: *Frontloading, Virtuelle Produktentwicklung, Fahrwerk, Automobilindustrie.*

Keywords: *frontloading, virtual product development, chassis, automotive industry.*

1 Motivation und Zielstellung

Die globalen Herausforderungen in der Automobilbranche erfordern eine verstärkte Ausrichtung der Produkte auf unterschiedlichste Kundenwünsche und -anforderungen. Der Trend einer individuellen Mobilität bedingt dabei eine erhebliche Ausweitung der Modellvielfalt und Individualisierung der Produkte. Ziel der Unternehmen ist es, Marktnischen oder neue Marktsegmente mit innovativen und nachhaltigen Konzepten zu besetzen, um sich gezielt von konkurrierenden Firmen zu differenzieren. Aus dieser wachsenden Marktfragmentierung resultiert eine Varianten- und Komplexitätsexplosion, wodurch das Risiko für Ertragseinbußen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg steigen kann [1]. Um die Profitabilität eines Unternehmens unter den genannten Herausforderungen langfristig sicher zu stellen, ist die Beherrschung der zunehmenden Komplexität sowie eine gezielte Effizienzsteigerung durch Reduzierung von Entwicklungszeit und -kosten von entscheidender Bedeutung.

Dieser Artikel befasst sich am Beispiel der virtuellen Fahrwerksentwicklung der BMW Group mit einer Strategie zur Beherrschung der Variantenvielfalt bereits in den sehr frühen Entwicklungsphasen. Das Ziel der erarbeiteten Methodik ist es, mit geringem Kapazitätseinsatz qualitativ hochwertige Fahrwerke effizient zu konzipieren und zu optimierten Fahrwerksfamilien zu verknüpfen. Der Begriff Fahrwerksfamilie umfasst in diesem Zusammenhang eine Gruppe von Fahrwerken, die durch gezielte Mehrfachverwendung von Bauteilen hohe Skaleneffekte erzielen, um dadurch eine Senkung von Produkt- sowie Entwicklungskosten zu bewirken. Hierzu werden die geometrischen und funktionalen Zusammenhänge in der für diese Entwicklungsphase richtigen Qualität dargestellt. Dadurch ist es möglich, eine große Anzahl an komplexen Szenarien automatisiert zu erstellen und hinsichtlich Package, Fahrzeuggene und Fahrdynamik innerhalb kurzer Zeit virtuell abzusichern.

2 Frontloading in der virtuellen Fahrwerksentwicklung

Der Produktentstehungsprozess (PEP) lässt sich bis zum Beginn der Produktion (SOP) in drei Haupthasen gliedern. Die Definitionsphase umfasst neben der Festlegung von grundlegenden Produktanforderungen und technischen Vorgaben auch die Erarbeitung

verschiedener Szenarien über eine mögliche Baukastenstrategie innerhalb der Produktfamilie zur Reduktion der Komplexität und Variantenvielfalt.

Hierzu basieren die Definition des Backbone-Fahrzeuges sowie die Ableitungsstrategie von Derivaten zunächst vorwiegend auf Expertenwissen und den Erfahrungen aus Vorgängerprojekten. Der Virtualisierungsgrad in diesem Stadium ist bis heute nicht ausreichend vollzogen, da geeignete Entwicklungsmethoden fehlen. Erst in der nachfolgenden Konzeptphase werden die erarbeiteten Szenarien mit Hilfe von CAD-, MKS-, FEM- und CAO-Systemen[1] detailliert untersucht und abgestimmt. Ziel dieses Abschnittes ist ein virtuell abgesichertes Konzept, das allen strategischen und technischen Vorgaben entspricht sowie den Anforderungen der sich anschließenden Serienentwicklungsphase gerecht wird. Wie in Bild 1 prinzipiell dargestellt, steigt die Konzeptreife während dieser Hauptphasen nicht linear. Zum Zeitpunkt erster Hardwareprototypen ist das Produktwissen häufig noch nicht ausreichend, was vielfach späte Änderungsschleifen und hohe Kosten nach sich ziehen kann. Verstärkt wird dieses Problem mit zunehmender Anzahl an Derivaten in einer Produktfamilie. Bei gleicher Entwicklungskapazität und Produktivität reduziert sich der Reifegrad zum Zeitpunkt erster Hardwareprototypen massiv, die Kostenverantwortung hingegen steigt.

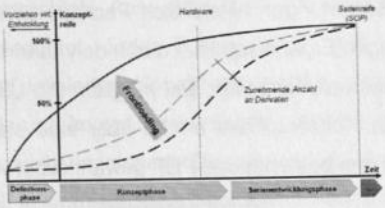


Bild 1: Konzeptreife in der virtuellen Fahrwerksentwicklung bei gleicher Entwicklungskapazität

Zur signifikanten Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess ist es daher notwendig, ein möglichst großes Produktwissen bereits in den frühen Phasen zu schaffen, in denen der Großteil der späteren Produktkosten definiert wird. Dieser als **Frontloading** bezeichnete Ansatz bewirkt eine hohe Konzeptreife und sichere Aussagen über die Komponentenausplanung einer Produktfamilie, wodurch Änderungsschleifen in den nachfolgenden Phasen verringert und Entwicklungszeit sowie -kosten reduziert werden können.

Innerhalb der Fahrwerksentwicklung der BMW Group greift das Projektteam **Advanced Chassis Engineering (ACE)** diese Grundidee auf und erarbeitet einen hoch-

[1] CAD = Computer Aided Design, MKS = Mehrkörpersimulation, FEM = Finite-Elemente-Methode, CAO = Computer Aided Optimization

automatisierten, virtuellen Prozess zur effizienten Entwicklung technisch stimmiger Fahrwerkskonzepte (vgl. [2] und [3]). Ein Teilansatz dazu ist die modulbasierte und baukastenorientierte Generierung von komplexen Fahrwerksfamilien mit Hilfe des hier vorgestellten **Chassis Configuration Tools (CCT)**.

3 Effiziente Generierung von virtuellen Fahrwerksfamilien

3.1 Gesamtprozess des Chassis Configuration Tools

Von entschiedener Bedeutung für die Steigerung des Produktwisssens und die Beherrschung der Variantenvielfalt ist ein effizienter Prozess, der es ermöglicht, viele Szenarien in kürzester Zeit zu validieren. Der Ansatz des Chassis Configuration Tools basiert hierzu auf dem CAD-System CATIA V5 entsprechend dem in Bild 2 dargestellten Prozess. Mit Hilfe der CCT-Engine können Fahrwerkskonzepte ausgehend von vorhandenen Komponenten, welche in der CCT-Database verwaltet werden, modular konfiguriert werden. Die interaktive Anpassung der Konzepte sowie die assoziative Ableitung von Derivaten entsprechend der strategischen und technischen Zielvorgaben sind ebenso sichergestellt wie die durchgängige virtuelle Absicherung der Fahrwerksfamilie. Hierzu sind die Bewertungen hinsichtlich Package sowie Fahrdynamik in der für die Definitionsphase richtigen Ergebnisqualität durch den hohen Automatisierungsgrad der CCT-Analyseverfahren innerhalb kürzester Zeit möglich. Die Überführung der generierten Szenarien in die folgende Konzeptphase erfolgt über eine standardisierte Schnittstelle, wodurch die Integration in den bestehenden PEP gewährleistet wird.

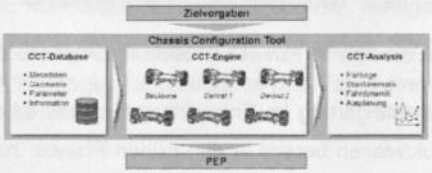


Bild 2: Gesamtprozess des Chassis Configuration Tools

3.2 CCT-Database

Zur Realisierung der gestellten Anforderungen ist eine speziell auf das frühe Entwicklungsstadium zugeschnittene Datenhaltung von entscheidender Bedeutung, welche die

Flexibilität bezüglich der Inhalte sowie eine hohe Automatisierbarkeit von Konfigurationsprozessen gewährleistet. In der CCT-Database werden dazu neben Serien- und Entwicklungsbauteilen auch Komponenten aus Industriebaukästen verwaltet. Jeder Datensatz umfasst dabei Meta-, Geometrie-, Parameter- und Informationsdaten, welche die in Tabelle 1 gezeigten Inhalte aufweisen.

Tabelle 1: Inhalte und Eigenschaften eines Datensatzes

Metadaten:	Geometriedaten:	Parameterdaten:	Informationsdaten:
• Bezeichnung • Variante u. Projekt • PLM-Sachnummer[2]	• Reduziertes Datenformat • Keine Kleinteile u. Intelligenz • Definiertes Koordinatensystem	• Geometrieparameter • Funktionsparameter	• Kommentare • Diagramme u. Bilder • Dokumente

Die eindeutige Identifizierung, Klassifizierung und Beschreibung des Datensatzes erfolgt vergleichbar mit der Dokumentenverwaltung eines PLM-Systems durch die Metadaten [4]. Mit Hilfe der Geometriedaten wird dagegen die 3D-Geometrie des Bauteils durch ein reduziertes Datenformat (z.B. CGR- oder VRML-Format[3]) beschrieben. Für frühe Bauraumuntersuchungen ist hierfür vor allem die Hauptgeometrie des Bauteils von Bedeutung. Kleinteile wie Verbindungselemente, Lager und Schläuche werden zugunsten der Datengröße nicht betrachtet. Aus diesem Grund wird auch auf die gesamte Konstruktionsintelligenz verzichtet. Jedes Bauteil besitzt weiterhin ein speziell für die jeweilige Komponentenart definiertes Koordinatensystem, welches die eindeutige und automatisierbare Positionierung im späteren Integrationsprozess ermöglicht. Die Gruppe der Parameterdaten beschreibt in diesem Zusammenhang zum einen die Geometrieparameter, die das Bauteil abstrahiert durch Punktinformationen definieren. Zum anderen beinhalten die Funktionsparameter die funktionalen Eigenschaften, wie beispielsweise die maximal ertragbaren Gelenkwinkel oder Belastungen, welche in späteren Analyseprozessen verwendet werden können. Die Informationsdaten umfassen schließlich Dokumentenanhänge und Kommentare, welche vor allem zur Beurteilung der Bauteileigenschaften dienen.

3.3 CCT-Engine

Ausgehend von diesen Datensätzen ermöglicht es das als CCT-Engine bezeichnete Konfigurationstool, komplexe Fahrwerksfamilien innerhalb des CAD-Systems automatisiert

[2] PLM = Product Lifecycle Management
[3] CGR = CATIA Graphical Representation, VRML = Virtual Reality Modeling Language

(VB-Programmierung) zu generieren. Nimmt man als Fallbeispiel die Konfiguration der Vorderachse eines Fahrzeuges, ist zunächst das gewünschte Fahrwerksprinzip zu definieren (Federbein-, Doppelquerlenker-, Mehrlenkerachse etc.). Alle zur kinematischen Darstellung des Fahrwerks benötigten Komponenten, wie Achsträger, Lenker, Radträger, Dämpfer und Räder, werden dann in der CCT-Engine in Form von Ersatzmodellen beschrieben. Diese abstrahierten Linien- und Punktmodelle sind vollparametrisch sowie nach einer standardisierten Struktur aufgebaut und können modular verwendet werden. Sie besitzen aber zunächst keinen expliziten Bezug zu bereits bestehenden Bauteilen. Erst durch die Verknüpfung dieser Templates mit der CCT-Database durch den Anwender übernehmen die Ersatzmodelle alle benötigten Eigenschaften. Anschließend können die Komponenten zu einem kinematisch vollständigen Fahrwerk automatisch positioniert werden. Dies erfolgt über eine mathematische Berechnungsmethode, welche ausgehend von den geometrischen Eigenschaften aller Bauteile deren richtige Position eindeutig bestimmt und die Ersatzmodelle entsprechend ausrichtet. Diese Methode ermöglicht neben der Konfiguration von Fahrwerken aus vorhandenen Bauteilen (Baukastenstrategie) auch die starrkinematische Bewegungssimulation wie Federn und Lenken innerhalb des CAD-Systems. Nach dem beschriebenen Verfahren können weitere Fahrwerke in der CCT-Engine konfiguriert und so die Produktfamilie schrittweise erweitert werden. Dabei erlaubt eine Logik, die technischen Zusammenhänge zwischen Backbone und Derivaten assoziativ im CAD-System abzubilden. Das Bild 3 zeigt hierzu beispielhaft eine konfigurierte Produktfamilie mit Vorder- und Hinterachsen von drei Fahrzeugen.

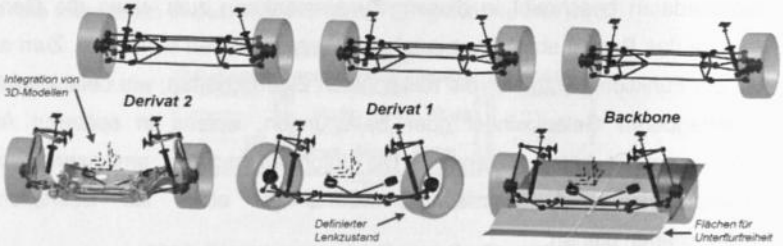


Bild 3: Produktfamilie mit drei Fahrzeugen in der CCT-Engine

Der Vorderachsträger des Backbone-Fahrzeuges wird dabei exemplarisch als neu zu entwickelndes Teil definiert und soll für alle Derivate in der Familie wiederverwendet werden. Die CCT-Engine gleicht dann automatisch die Parameterwerte der Ersatzmodelle

aller Derivate mit denen des Backbone auch bei Bauteilanpassungen ab. Neben der Integration und Modifikation von Komponenten eines Fahrwerks sind in der CCT-Engine auch technische und gesetzliche Vorgaben integriert. Hierzu können beispielsweise die Richtlinien zur Unterflurfreiheit in Form von Flächenelementen eingeblendet werden (siehe Backbone-Fahrzeug in Bild 3).

3.4 CCT-Analysis

Die entstehende Fahrwerksfamilie kann zu jedem Zeitpunkt sowohl geometrisch als auch funktional analysiert werden. Die geometrische Untersuchung ist vor allem geprägt durch Bauraum- und Freigangsanalysen. Hierfür erlaubt ein Automatismus die Integration der zur jeweiligen Komponente gehörenden 3D-Geometrie aus der Datenbank (Bild 3 links). Durch die richtige Positionierung entsprechend der Ersatzmodelle können definierte Feder- und Lenkpositionen angefahren werden. Dabei ermöglichen es die geringen Datenmengen der reduzierten 3D-Modelle (CGR, VRML) und die ständig wachsende Rechnerleistung, eine große Anzahl an Fahrzeugen in einer Produktfamilie gleichzeitig abzubilden. Neben der geometrischen Integration ist die funktionale Untersuchung der Fahrwerke hinsichtlich wichtiger fahrdynamischer Kennwerte von entscheidender Bedeutung. Erstmals können mit Hilfe einer vektoranalytischen Methode nach Matschinsky [5] alle Fahrwerke in einer Familie gleichzeitig sowohl in Konstruktionslage als auch über alle Feder- und Lenkzustände berechnet werden. Das Bild 4 zeigt beispielhaft die Kinematikkennwerte in Konstruktionslage sowie die Spur- und Sturzverläufe über dem Federweg der drei Vorderachsen in der Produktfamilie.

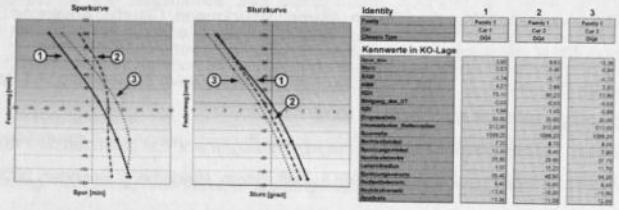


Bild 4: Kinematikkennwerte der Vorderachsen (Beispielwerte ohne BMW-Fahrzeugbezug)

Alle benötigten Daten können anschließend für die nachfolgende Konzeptphase über ein standardisiertes Austauschformat exportiert werden, welches alle Punkte sowie Parameter beinhaltet und von den virtuellen Tools weiterverwendet werden kann (vgl. [2] und [3]).

4 Zusammenfassung

Die sich stetig verändernden Marktbedingungen in der Automobilindustrie erfordern einen effizienten Entwicklungsprozess mit speziell auf die jeweiligen Phasen angepassten Methoden. Die Potentiale durch Frontloading mehr Produktwissen in den frühen Entwicklungsphasen zu generieren tragen dazu bei, kürzere Entwicklungszeiten und individuelle Produkte kostengünstig zu realisieren. Das Chassis Configuration Tool ist hierzu ein für den Fahrwerksbereich zugeschnittenes Entwicklungswerkzeug, mit dem komplexe Fahrwerksfamilien effizient konfiguriert und mit einem für diese Phase notwendigen Detaillierungsgrad abgesichert werden können. Im Vordergrund steht dabei die assoziative Betrachtung mehrerer Fahrwerke mit allen Wechselwirkungen, wodurch frühzeitig sichere Aussagen über die erarbeitete Gleichteilestrategie getroffen werden können. Die Konzentration der funktionalen und geometrischen Untersuchungen auf die wesentlichen, konzeptkritischen Auslegungskriterien ermöglicht es, eine Vielzahl an Szenarien in kürzester Zeit bewerten zu können. Dadurch sind innovative Fahrwerkskonzepte auch bei sukzessiver Verschlankung des PEP und Reduzierung von Hardware-Absicherungen realisierbar.

Literatur

[1] Becker, Helmut: *Auf Crashkurs: Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb.* 1. Aufl. Berlin: Springer, 2005. – ISBN 978-3-540-25823-0, S. 27-30

[2] Berkan, Dirk; Struckmann, Claudio; Ertlmaier, Stephan; Balling, Jochen; Zimmerhackl, Dietmar: *Virtual Design Process for Advanced Chassis Engineering.* In: ATZ autotechnology 9 (2009)

[3] Berkan, Dirk; Andersson, Henrik; Böttrich, Marcel; Struckmann, Claudio: *Advanced Chassis Engineering: Neue Wege bei der automatisierten Ableitung von FE-Modellen im Entwicklungsprozess.* In: 2. Tagung für parametrisch assoziative Entwicklung von Baugruppen der Fahrzeugkarosserie. Haus der Technik, 2009

[4] Eigner, Martin; Stelzer, Ralph: *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management.* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-44373-5 S. 133

[5] Matschinsky, Wolfgang: *Radführungen der Straßenfahrzeuge: Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion.* 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-71196-4

Funktionsorientierte Produktmodellierung in frühen Phasen von Entwicklungsprozessen

Albert Albers, Eike Sadowski, Andreas Braun

Universität Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
IPEK - Institut für Produktentwicklung
Kaiserstr. 10, 76131 Karlsruhe
Email: albers@ipek.uka.de; sadowski@ipek.uka.de; braun@ipek.uka.de
Internet: http://www.ipek.uni-karlsruhe.de

Inhalt: *Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einem computergestützten Ansatz zur iterativen Modellierung komplexer mechatronischer Systeme. Dabei wird gezeigt, wie in frühen Phasen der Produktentwicklung die Vernetzung einzelner Systemelemente durch ihre technischen Funktionen über Grenzen einzelner Baugruppen hinweg abgebildet werden kann. Der vorgestellte Ansatz ist in einem Softwaretool implementiert, das insbesondere ein an typische Problemstellungen der Produktentwicklung angepasstes Vorgehen bei der grafischen Modellierung technischer Systeme und der Funktionen der darin abgebildeten Baugruppen und Bauteile unterstützt. In einer exemplarischen Anwendung im Projekt KI2 - Karlsruher Innovative Individualmobilität werden Möglichkeiten der Weiterentwicklung des bisherigen Ansatzes der qualitativen Funktionsmodellierung durch quantifizierbare Größen untersucht.*

Abstract: *This paper deals with a computer-based approach to iterative modeling of complex mechatronic systems. It is shown how the networking of individual system elements can be represented in early stages of product development by their technical functions across boundaries of individual assemblies. The presented approach is implemented in a software tool that particularly supports graphical modeling of technical systems and of the functions of the assemblies and components, adapted to typical problems of product development. In an exemplary application in the project KI2 - Karlsruhe Innovative Individual Mobility we examine opportunities for further work on the actual approach of qualitative function modeling by quantifiable variables.*

Stichwörter: *Modellierung, Funktionen, mechatronische Systeme, C&C-M, KI2.*

Keywords: *Modelling, Functions, Mechatronic Systems, C&C-M, KI2.*

1 Einleitung

Die Produktentwicklung ist heute durch eine eng vernetzte, interdisziplinäre Bearbeitung von vielfältigen Aufgaben gekennzeichnet, bei der vor allem ein gemeinsames Verständnis der oftmals komplexen technischen Zusammenhänge wichtig ist. Aus Sicht von

Konstrukteuren basiert ein gemeinsames Systemverständnis zunächst auf der Klärung der Frage, welche Funktionen das Produkt erfüllen soll (Kundenwünsche und Technik). Erfahrungen aus empirischen Studien wie auch theoretische Erkenntnisse zeigen, dass technische Funktionen immer im Zusammenhang mit gestalteten Elementen von (Teil-)Systemen bzw. mit deren Repräsentation in Modellen gesehen werden sollten (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

1.1 Technische Funktionen in der Produktentwicklung

Technische Funktionen spielen nach Hirtz et al. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** eine fundamentale Rolle bei der Modellierung technischer Systeme. Die Konkretisierung der Hauptfunktionen und die schrittweise Zuordnung von Teilfunktionen zu einzelnen oder mehreren Teilsystemen bzw. Komponenten beeinflusst den Grad der Modularität und damit die Systemstruktur. Pahl und Beitz **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zufolge sollten diese Schritte direkt von einer abstrakten, lösungsneutralen Formulierung der Konstruktionsaufgabe ausgehen. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass eine von Lösungsvorschlägen losgelöste, abstrakte Funktionsstruktur solche funktionalen Anforderungen nicht berücksichtigt, die sich erst aus der konkreten lösungs- und gestaltspezifischen Kombination von Komponenten ergeben. Eine Beschreibung funktionaler Zusammenhänge sollte daher insbesondere bei der Produktmodellierung in frühen Entwicklungsphasen generische, lösungsneutrale technische Funktionen erfassen können. Ergänzende Methoden und Werkzeuge sollten die schrittweise Konkretisierung der Zusammenhänge zwischen Funktionen und der realen Gestalt in einem Modell unterstützen.

1.2 Ansätze der funktionsorientierten Konstruktion

Vor diesem Hintergrund unterscheiden sich Ansätze zur Funktionsmodellierung insbesondere hinsichtlich des Grads des algorithmischen **Fehler! Verweisquelle konnte icht gefunden werden.**, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bzw. stärker heuristisch geprägten **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, REF _Ref266790859 \n \h **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Vorgehens, sowie im Bezug auf die Bereitstellung von Werkzeugen zur Anwendung der jeweils vorgeschlagenen Methoden. Software-basierte Ansätze konnten bisher über die

automatische Generierung einer Vielzahl „optimaler Konfigurationen" hinaus keine durchgängige Unterstützung bei der Modellierung und Validierung detaillierter Lösungsansätze liefern **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**. Ein normiertes Modellsystem zur Darstellung verschiedener Konkretisierungsgrade beim Übergang von der theoretischen Modellierung technischer Funktionen zur konkreten Gestalt konnte bis heute nicht zufriedenstellend etabliert werden (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Das Contact & Channel Model (C&C-M) **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** adressiert diese unzureichende Unterstützung der Produktentwicklung. Als einheitliche Modellierungssprache ermöglicht C&C-M eine eindeutige Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Funktion und Gestalt bei systematisch-problemangepasstem Vorgehen. Bislang existiert jedoch noch kein Werkzeug, das die durchgängig konsistente Anwendung dieser Modellierungssprache durch verschiedene Benutzer unterstützt. De vorgestellte Ansatz widmet sich der Aufgabe, eine Software-basierte Werkzeugunterstützung für die Analyse und Synthese mechatronischer Systeme mit C&C-M zu entwickeln.

2 Funktionsorientierte Produktmodellierung mit C&C-M

In einem Gesamtsystem werden technische Funktionen durch eine geeignete Gestaltung gemeinsamer Wirkflächenpaare (WFP) einzelner Teilsysteme, und der diese WFP verbindenden Leitstützstrukturen (LSS) realisiert **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**. Ein WFP beschreibt dabei den geometrischen Ort eines Funktionskontakts zwischen den Wirkflächen zweier Teilsysteme. Bei der Gestaltung müssen neben den beabsichtigten auch unerwünschte Funktionen (z.B. Getrieberasseln) berücksichtigt werden. C&C-M kann dazu eingesetzt werden, derartige Funktions-Gestalt-Zusammenhänge auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus zu analysieren und die gewonnenen Erkenntnisse systematisch zu erfassen und in die Umsetzung von Lösungsvorschlägen für die Konstruktion einfließen zu lassen.

In einer Forschungskooperation mit dem Engineering Design Centre EDC der Universität Cambridge (UK) entsteht im Rahmen der vorgestellten Arbeit ein Softwaretool **Fehler!**

erweisquelle konnte nicht gefunden werden., **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, mit dem in frühen Phasen der Produktentwicklung Prinziplösungen für technische Systeme mit Hilfe von C&C-M dargestellt werden können. Es soll als Werkzeug für die Modellierung komplexer technischer Systeme eingesetzt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Unterstützung von Konstrukteuren bei der Modellierung eines technischen Systems, die sich auf Komponentenebene an funktionalen Anforderungen orientiert. Unter solchen funktionalen Anforderungen werden Funktionen verstanden, die im Kontext des Zwecks des Gesamtsystems durch Teilsysteme oder das Zusammenwirken einzelner Komponenten erfüllt werden sollen. Sie werden zusammenhängenden Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen zugewiesen. Ein solches Netzwerk aus WFP und LSS bildet die funktionalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Komponenten eines Gesamtsystems ab. Wirkflächen und LSS werden entsprechend dem jeweiligen Kenntnisstand im Konstruktionsprozess entweder generischen Teilsystemen (Modulen) oder konkret einzelnen Systemkomponenten zugeordnet.

Funktionen werden im vorgestellten Ansatz mit Hilfe einer von Hirtz et al. entwickelten Taxonomie **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben und sind in Datenbanken hinterlegt. Benutzer werden bei der Modellierung durch die Möglichkeit zur Auswahl und Kombination formalisierter Funktionsbegriffe (Funktionsdatenbank), wie auch bekannter Konstruktionslösungen, die auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus dem jeweiligen Entwicklungsstand des Modells angepasst werden können (Bauteilbibliothek), unterstützt. Zur Modellierung von Funktionen werden den entsprechenden WFP Flussgrößen als Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen eines Teilsystems zugeordnet und mit einem Begriff zur Funktionsbeschreibung verknüpft. Er beschreibt eine Operation zur Umwandlung oder Leitung der teilsystemspezifischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Im vorgestellten Ansatz werden Funktionen bislang rein qualitativ beschrieben, z.B. „Convert: Electrical Energy → Mechanical Rotational Energy" für einen Elektromotor.

3 Bewertung des Ansatzes anhand einer Fallstudie in KI2

Im Projekt KI2 – *Karlsruher Innovative Individualmobilität* wird am Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (IPEK) ein neuartiges Fahrzeugkonzept im Team von 24 Assistenten und Studierenden entwickelt. Das ermittelte Produktprofil adressiert Märkte in

urbanen Ballungsräumen und soll mit einem modularen Fahrzeugaufbau erfüllt werden. Dadurch können verschiedene Kundenwünsche bei gleichzeitig hohem Anbieternutzen flexibel befriedigt werden. Darüber hinaus können am IPEK anhand der Entwicklung dieses modularen Technologieträgers Methoden der Produktentwicklung, sowie verschiedenste Antriebskonzepte auf dem Fahrzeug als fahrbarem Prüfstand erprobt werden.

3.1 C&C-Modellierung eines komplexen mechatronischen Systems

Das KI2-Projekt eignet sich für die Erprobung des vorgestellten Ansatzes sehr gut, da insbesondere die ausgeprägte Modularität des Gesamtsystems hohe Anforderungen an die teaminterne Kommunikation und Verständigung stellt. Dies kann durch die vorgestellte C&C-M-Implementierung deutlich erleichtert werden. In den frühen Phasen der Produktentstehung gilt es, vor allem bei mechatronischen Produkten, ein umfassendes gemeinsames Verständnis von Funktionen und dem konzeptionellen Aufbau des Systems herzustellen, um Missverständnisse und Fehler möglichst auszuschließen. Bild 1 verdeutlicht, dass das hierarchisch aufgebaute C&C-Modell in der Software dazu genutzt werden kann, um einzelne Teilsysteme zu repräsentieren. Daraus können weiterführend einzelne an die Teilsysteme gekoppelte Arbeitspakete und deren Schnittstellen formuliert werden. Allen Systemelementen (Komponenten, WFP und LSS) können funktionsrelevante Attribute zugewiesen werden, die wichtige Informationen für den Produktentstehungsprozess beinhalten. Dadurch kann die Entwicklungsarbeit koordiniert werden wobei sichergestellt wird, dass alle relevanten Schnittstelleninformationen auf einen Blick verfügbar sind. Die einzelnen Funktionen, die im Modell durch die Informationen zu WFP und LSS hinterlegt sind, können beispielsweise als .xml-Datei exportiert und weiterverwendet werden.

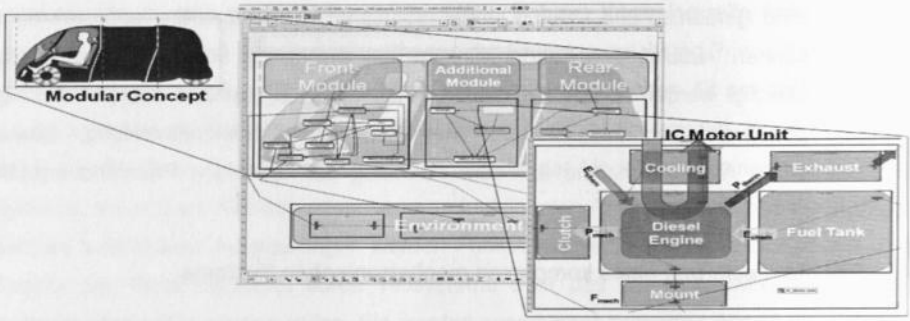


Bild 15: Hierarchische Modellierung des KI2-Fahrzeugkonzepts mit Fokus auf das Teilsystem „Internal Combustion Unit"

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines softwarebasierten Werkzeugs zur funktionsorientierten Modellierung technischer Systeme mit Hilfe von C&C-M. Die Anwendung des Ansatzes im Projekt KI2 zeigt große Potentiale zur Unterstützung der Produktentwicklung in Teams auf, da insbesondere in frühen Entwicklungsphasen Ideen und Konzepte einfach visualisiert und kommunizierbar gemacht werden können. Dabei zeigt sich die Möglichkeit zur Erweiterung des Ansatzes durch quantifizierbare physikalische Attribute mit konkreten Werten, wodurch zusätzliche wichtige Informationen gespeichert und für weitere Aufgaben bereitgestellt werden könnten (z.B. Simulation, Detailkonstruktion etc.). Die direkte Anbindung von Werkzeugen nachgelagerter Entwicklungsaktivitäten ist ein langfristiges Ziel dieser Forschungsarbeit.

Literatur

[1] Hacker W.: Denken in der Produktentwicklung, VDF Hochschulverlag, Zürich, 2002.

[2] Hirtz, J., Stone, R., McAdams, D., Szykman, S., and Wood, K.: "A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts", Technical Note 1447, National Institute of Standards and Technology, USA, 2002.

[3] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.

[4] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 1, 2. Auflage, Springer, 1994.

[5] Hutcheson, R.S., McAdams, D. A., Stone R.B., Tumer I.Y.: Function Based Systems Engineering. In: Proceedings of International Conference on Engineering Design, 2007.

[6] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, Hanser, München, Wien, 2003.

[7] Antonsson, E. K., and Cagan, J., *Formal Engineering Design Synthesis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.

[8] Chakrabarti, A.: Engineering Design Synthesis: Understanding, Approaches and Tools, Springer-Verlag, London, UK, 2002.

[9] Bender, B.: Erfolgreiche Individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung, Dissertation, Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, 2004.

[10] Franke, H.-J.: Bilder und Begriffe beim konstruktiven Denken – Diskussionen und Ergebnisse eines Workshops, In: Effizienter Entwickeln und Konstruieren, Tagung München, VDI Berichte Nr.:1169, VDI Verlag, 1995.

[11] Albers, A., Alink, T., Thau, S., Matthiesen, S.: *Support of Design Engineering Activity through C&CM –Temporal Decomposition of Design Problems.* International Design Conference 2008, Dubrovnik, Croatia, 2008.

[12] Albers, A., Braun, A., Clarkson, P. J., Enkler, H., and Wynn, D. C.: "Contact and Channel Modelling to Support Early Design of Technical Systems", *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Stanford, California, USA, 2009.

[13] Albers, A., Braun, A., Sadowski, E., Wynn, D., Wyatt D., Clarkson, P.-J.: Contact and Channel Modeling using part and function libraries in a function-based design approach. Proceedings of the IDETC/CIE 2010, ASME 2010, Montreal, Quebec, Canada, 2010 (im Druck).

Prozesse und Unternehmenskooperationen in der Praxis - Von der Identifikation zur Integration -

Christian Kubisch

Porsche Aktiengesellschaft
Porscheplatz 1, 70435 Stuttgart - Zuffenhausen
Email: christian.kubisch@porsche.de

Inhalt: *Im Zuge der Forderung nach einer prozessorientierten Organisationsgestaltung wird im vorliegenden Beitrag die Notwendigkeit der Ausweitung des Paradigmas bei der Konzeption und Umsetzung von Unternehmenskooperationen betont. Handlungsbedarf zeigt sich insbesondere bei der Suche nach und der Vernetzung von kooperativ genutzten Prozessen der Produktentwicklung. Die in diesem Umfeld anzutreffende hohe Prozessspontaneität in Verbindung mit zumeist nur sehr abstrakt modellierten Prozessmodellen stellt Kooperationsprojekte mit dem Auftrag der effizienten Integration der Arbeitswelten vor große Herausforderungen. In diesem Beitrag wird einerseits die Schwachstelle heutiger Kooperationsgestaltungsmodelle aufgezeigt und andererseits ein Vorgehensmodell entwickelt, welches existierende Lösungen des Kooperationsmanagements um die erfolgsentscheidenden Komponenten interorganisationale „Prozessidentifikation" und „Prozessintegration" erweitert.*

Abstract: *In the course of the persistent call for a process-orientated organizational design the article points out the necessity of expanding this paradigm in terms of planning and implementing cooperation networks. Need for action is particularly shown in activities of searching and integrating cooperatively used product development processes. In this context a high degree of process spontaneity in relation with mostly far too abstract designed process models set high requirements on cooperation projects having the mission to realize an efficient connection of differing working environments. In this paper on the one hand the weakness of today's cooperation designing approaches gets identified and on the other hand a procedure is developed enriching existing solutions of cooperation management by adding success-determining components named interorganisational 'Process Identification' and 'Process Integration'.*

Stichwörter: *Kooperation, Prozessidentifikation, Prozessintegration, Prozessintegrationseignung*

Keywords: *cooperation, process identification, process integration, ability to process integration*

1 Prozesse kooperativer Produktentwicklung

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Diesem aristotelischen Grundsatz folgend gehen seit jeher wertschöpfende Organisationen die unterschiedlichsten Formen

von Zusammenarbeiten ein. Ziel ist die Generierung von Synergieeffekten, mit anderen Worten, die Mehrung von Vorteilen durch die unternehmensübergreifende Verknüpfung zuvor separierter Bestandteile der Leistungserstellung. Entscheidend für die Realisierung und Maximierung der angestrebten Synergieeffekte ist die Art und Weise der Vernetzung der betroffenen Kooperationsprozesse. Entsprechende Projekte richten sich nach einer in Phasen unterteilten Herangehensweise bei der Planung, Umsetzung und Durchführung einer Kooperation. Die Kooperationsforschung hat Vorgehensmodelle (VGM) in großer Varianz hervorgebracht und bietet so industrienahen Kooperationsvorhaben den wissenschaftlich begründeten, übergeordneten Rahmen. Dennoch ergeben sich zusätzliche Anforderungen, die durch bestehende Lösungsansätze nur rudimentär abgedeckt werden.

2 Kooperationsprozesse - Identifikation vor Integration

Ziel des Beitrages ist es, den oben angedeuteten Handlungsbedarf bei der überbetrieblichen Prozessintegration ausgehend von folgender These nachzuweisen:
„Die interorganisationale Prozessintegration in Kooperationsprojekten ist bezüglich der Identifikation von Kooperationsprozessen und der darauf aufbauenden Ausprägung, Bewertung und Umsetzung unterschiedlicher Integrationsszenarien unzureichend durch Methoden aktueller Vorgehensmodelle des Kooperationsmanagements unterstützt."
Die Verifikation der These orientiert sich an der in Bild 1 dargestellten Struktur.

	Problemstellung	**Lösungsangebot** heute	**Soll-Zustand** morgen
Prozessidentifikation	Identifikation direkt oder indirekt betroffener Kooperationsprozesse		
Prozessauswahl	Priorisierung und Auswahl projektkritischer Kooperationsprozesse		
Prozessintegration	Entwicklung, Bewertung und Umsetzung von Prozessintegrationsszenarien		
Vorgehensmodelle	Lösungsintegration in einem ganzheitlichen Vorgehensmodell		

Bild 1: Analyseschwerpunkte und -struktur zum Stand der Technik Prozessidentifikation und -integration

Prozessidentifikation

Problemstellung: Die Identifikation von Kooperationsprozessen im Vorfeld einer Kooperation wird heute von nahezu allen Arbeiten zur Gestaltung einer Kooperation

zumindest ansatzweise thematisiert. Auffällig ist jedoch, dass nur wenige Methoden eine systematische Suche nach Kooperationsprozessen anbieten. Häufig werden zu diesem Zweck Empfehlungen zur Durchführung von Interviews oder der Anwendung von Checklisten und Fragebögen gegeben. Allerdings sind die zu erwartenden Ergebnisse stark von der Prozessmanagementerfahrung und -kompetenz des Projektteams abhängig. Als eine weitere Möglichkeit wird der betriebsübergreifende Abgleich vorhandener Prozessmodelle vorgeschlagen [3, 4]. Dabei wird vernachlässigt, dass solche Modelle in der unternehmerischen Praxis in den wenigsten Fällen detailliert vorhanden bzw. zielführend interorganisational vergleichbar sind. Zu koordinierende Kooperationsprozesse finden sich auf sehr operativen, arbeitsnahen Ebenen solcher Modelle. Einen derart hohen Dekompositionsgrad erreichen diese, aufgrund des hohen Aufwandes für Erstellung und Konsistenzhaltung, zumeist in der Praxis nicht. Zwar gelingen vielfach Lösungen für die kooperationsspezifische Modellerweiterung und -vernetzung, jedoch fehlt stets der notwendige vorgelagerte Schritt der Identifikation, der bis dato weder modellierten noch beschriebenen und somit versteckten Arbeitsabläufe.

Lösungsangebot: Will man diese konzeptionelle Lücke heutiger Ansätze schließen, ist die Auseinandersetzung mit bekannten, allgemeinen Methoden der Prozessidentifikation und eine Interpretation vor dem Hintergrund der Koordination von Kooperationsprozessen unumgänglich. Die Untersuchung vorliegender Ansätze zeigt, dass Verfahren in der Literatur zwar hinreichend und in einiger Varianz diskutiert werden, es allerdings in den wenigsten Fällen zu einer Ableitung von praxisorientierten VGMen kommt.

Soll-Zustand: Vergleicht man Problemstellung und Lösungsangebot miteinander, zeigen sich die Charakteristiken einer optimierten Identifikation von Kooperationsprozessen:

- Suche anhand von kooperationsspezifisch betroffenen Kooperationsobjekten
- Suche in Prozesslandschaften aller beteiligten Kooperationspartner
- Suche nach operativen Prozessen nach dem Bottom-Up-Prinzip
- Dokumentation und Wiederverwendbarkeit des Suchverlaufes und der -ergebnisse

Eine Suche, gestaltet nach den genannten Randbedingungen, offenbart eine Menge an Kooperationsprozessen, welche die Gesamtheit aller betroffenen Abläufe beider Unternehmen beinhaltet und deren einzelne Prozesse jeweils aus der Kombination eines Objekts (z.B. Prototypenstückliste) und einer Tätigkeit (z.B. konfigurieren) bestehen.

Prozessauswahl

Problemstellung: In der kooperativen Produktentwicklung ist aufgrund der Spontaneität und Komplexität vieler Prozesse eine hohe Tätigkeiten- und Objektdichte zu erwarten. Die identifizierte Prozessmenge wäre geprägt durch Inkonsistenzen, Redundanzen und Fehlidentifikationen. Sinnvolle Integrationsszenarien sind in dieser inhomogenen Prozessmenge nur mit sehr hohem Aufwand bewertbar. So muss angesichts der zu erwartenden Prozessflut vor, während und nach der Identifikationsphase eine kontinuierliche Reduzierung des Betrachtungsumfanges anhand von vorgegebenen Kriterien erfolgen. In erster Linie sollen diejenigen Abläufe hervorgehoben werden, die sich kritisch auf die terminlichen, budgetären oder qualitativen Kooperationsprojektziele auswirken. Wird das Projektteam frühzeitig auf potenzielle Schwierigkeiten bei der anstehenden Prozessintegration hingewiesen, können bereits in der Entstehungsphase der Zusammenarbeit notwendige Gegenmaßnahmen konzipiert und umgesetzt werden. Hierfür ist es notwendig, Prozesse nach einem Maß für den zu erwartenden Integrationsaufwand bewerten zu können.

Lösungsangebot: In Analogie zur Integrationseignung werden in der Literatur inhaltlich ähnliche Begriffe wie Netzwerkfähigkeit [6] oder Kooperationskompetenz [7] verwendet. Die semasiologische Untersuchung zeigt aber, dass das jeweilige Begriffsverständnis die hier vorliegenden Fragestellungen allenfalls tangiert.

Soll-Zustand: Im Rahmen dieser Arbeit soll daher der Begriff „Prozessintegrationseignung" (PIE) definitorisch wie folgt festgelegt werden: *Die Prozessintegrationseignung ist im Umkehrschluss ein Maß für den zu erwartenden Aufwand der interorganisationalen Integration eines in einem Unternehmen etablierten Arbeitsablaufes. Die Integration umfasst dabei die effiziente Herstellung und Koordination der prozessualen Vernetzung nach Maßgabe der vereinbarten Kooperationsinhalte.*

Das Ausmaß der Integrationseignung eines identifizierten Prozesses lässt sich anhand von vordefinierten Messgrößen vom Kooperationsteam aufwandsarm ermitteln. Das Wissen über PIE eröffnet die Möglichkeit, durch Vergleichen einen Integrationsprozess gezielt und frühzeitig in das engere Betrachtungsfeld des Kooperationsprojekts zu rücken. So werden besonders kritische Prozesse aus der undefinierbaren Masse an Kooperationsprozessen herausgefiltert und der Prozessintegration expliziert zugeführt.

Prozessintegration

Problemstellung: Im nächsten Schritt bestehen die primären Herausforderungen darin, alle sinnvollen Integrationsmöglichkeiten ausgewählter Abläufe zu bewerten, die Auswirkungen auf umliegende Prozesse darzustellen und das effiziente Maßnahmenpaket für die Umsetzung des gewählten Integrationsszenarios zu konfigurieren.

Lösungsangebot: Die Kooperationsforschung bietet eine Reihe von Alternativen für die intra- und interorganisationale Integration von Unternehmensabläufen [1, 2, 3]. Jedoch ist durch heutige Vorgehensweisen nicht sicher gestellt, dass kooperationsspezifisch die richtigen Schwerpunkte bei der Integration von Kooperationsprozessen gelegt werden.

Soll-Zustand: Vorliegende Alternativen der Prozessintegration müssen in einen durchgängigen, methodischen Zusammenhang mit der oben beschriebenen Identifikation und Auswahl von kritischen Kooperationsprozessen gebracht werden. Dieser muss einerseits den Anspruch an die aufwandsgerechte Umsetzbarkeit innerhalb eines zeitlich und budgetär begrenzten Projektrahmens erfüllen, andererseits eine ausreichend valide Bewertung von Alternativen anhand ihrer Potenziale zur prozessbezogenen Kostensenkung, Qualitätssicherung und Durchlaufzeitverkürzung [2] zulassen. Kooperierende Unternehmen werden so in die Lage versetzt, die Alternativen der prozessualen Vernetzung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Realisierbarkeit ex ante bewerten zu können. Das prozessbezogene Schnüren von Integrationslösungen geschieht methodisch unterstützt und liefert mit einer bewerteten Wahrscheinlichkeit idealer Weise diejenige Alternative, welche die angestrebten Synergien der Zusammenarbeit maximiert und somit die eigentliche Legitimation des Kooperationsvorhabens aufrecht erhält.

Vorgehensmodelle

Problemstellung: In diesem Abschnitt wird hinterfragt, inwieweit existierende Kooperationsgestaltungsmodelle die oben aufgeschlüsselten Problemstellungen der Prozessidentifikation, -auswahl und -integration aufnehmen und Lösungen bereitstellen.

Lösungsangebot: Hierzu werden die von Hofer [4] analysierten VGMe mit Blick auf das erweiterte Anforderungsspektrum untersucht. Dabei ist auffällig, dass sich lediglich Killich/Luczak [5] näher mit den Schwierigkeiten der Suche nach „verborgenen" Prozessen auseinandersetzen. Allerdings entwickeln sie vorrangig eine Methode für deren Visualisierung, nicht aber für die Suche nach ihnen unter Zuhilfenahme bestimmter

Kriterien, wie z.B. oben repräsentiert durch PIE. Keines der Vorgehensmodelle bietet eine systematische Prozessidentifikation als Teil einer ganzheitlichen Integrationsprozedur an.
Soll-Zustand: Notwendig ist daher eine nach Phasen gegliederte, generische Vorgehensbeschreibung, welche sowohl die Abläufe der Prozessidentifikation, -auswahl und -integration im Gesamtzusammenhang aufnimmt als auch die erfolgsorientierte Strukturierung, effiziente Durchführung und transparente sowie reproduzierbare Dokumentation von Projekten unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Kooperationsbedingungen unterstützt. Dabei verlieren die existierenden Ansätze des Kooperationsmanagements keinesfalls ihre Daseinsberechtigung, sondern werden um die Komponenten „Prozessidentifikation mit Kooperationsobjekten", „Prozessauswahl nach Prozessintegrationseignung" und „Bewertungsverfahren für Prozessintegrationsszenarien" erweitert.
Anhand der durchgeführten Untersuchungen lässt sich die eingangs aufgestellte These verifizieren und die Notwendigkeit der konzeptionellen Erweiterung bestehender VGMe nachweisen. Zusammenfassend wären dadurch folgende Vorteile realisierbar:

- frühzeitiges Abschätzen des zu erwartenden Integrationsaufwandes eines Prozesses
- frühzeitiges Erkennen und Einbeziehen von Verantwortlichen und Ansprechpartnern betroffener Kooperationsprozesse
- frühzeitiges Schaffen der Grundlage für die prozessorientierte Gestaltung nachfolgender Phasen des Kooperationslebensszyklus

3 Prozessidentifikation und -integration im Kooperationslebenszyklus

Aufbauend auf den erbrachten Nachweis einer methodischen Lücke in einer Reihe von VGMen wird vom Autor dieses Beitrags ein Vorgehen entwickelt, welches es zulässt, Kooperationsgestaltungsmaßnahmen gezielt auf die Anforderungen überbetrieblicher Prozesse ausrichten zu können. Ausgangspunkt sind die hergeleiteten Potenziale:

- Identifikation von inter- und intraorganisationalen Kooperationsprozessen
- Selektion von integrationskritischen Prozessen
- Ableitung und Bewertung von kooperationsspezifischen Prozessintegrationsszenarien
- Konfiguration von szenariospezifischen Umsetzungsmaßnahmen

In Anlehnung an Richtlinien zur Entwicklung eines VGMs [4] werden die vier Potenziale in abstrahierter Form einem integrierten Vorgehen unterworfen. Bild 2 deutet die zeitliche Einordnung des Erweiterungsansatzes in das autorenübergreifende VGM von Hofer [4] an und resümiert phasenbezogen zentrale Aktivitäten und Ergebnisse.

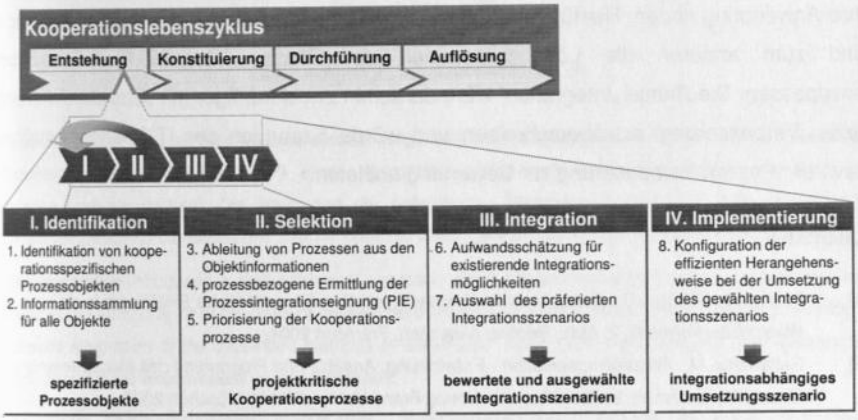


Bild 2: Prozessidentifikation und -integration im Kontext des Kooperationslebenszyklus

Die transparente Dokumentation und automatisierte Auswertung der in den Phasen gesammelten Informationen soll ein dem Vorgehen angepasstes informationstechnisches Werkzeug übernehmen. Es folgt inhaltlich den einzelnen Abschnitten des VGMs und führt den Anwender zielgerichtet von der Entscheidung für einen Kooperationsumfang bis hin zur Konfiguration von kooperationsspezifischen Umsetzungsszenarien. Die aufbereiteten Informationen werden zu Bestandteilen von vertraglichen Vereinbarungen und Projektunterlagen oder bilden die Grundlage für die Ausarbeitung von z.B. prozessorientierten Schulungsunterlagen für die ausführenden Fachbereiche.

4 Ausblick

Das gezeigte Vorgehen wird grob unterteilt in die Elemente Prozessidentifikation und Prozessintegration. Neben dieser Kombination ist aber auch eine davon abweichende Konstellation denkbar. So kann die entwickelte Methode der Identifikation von versteckten Prozessen auch bei der:

- Suche nach inter- und intraorganisational wiederkehrenden Prozessen zur Gestaltung von IT-Services im Rahmen der Service-Orientierten-Architekturbebauung und
- Suche nach Kooperationsprozessen zur Ausgestaltung von kooperationsbegleitenden inter- und intraorganisationalen Prozessverbesserungsmaßnahmen

ihre Anwendung finden. Hierfür sind zum einen die Auswahlkriterien der Phase „Selektion" und zum anderen die Lösungsszenarien der Phase „Integration" fallspezifisch anzupassen. Die Phase „Integration" wäre daraufhin zweckmäßiger mit „Standardisierung" bzw. „Verbesserung" zu überschreiben und würde Szenarien der IT-Servicegestaltung bzw. der Prozessverbesserung zur Bewertung anbieten.

Literatur

[1] Becker, J.; Schütte, R.: *Handelsinformationssysteme: Domänenorientierte Einführung in die Wirtschaftsinformatik*, 2. Aufl., Redline Wirtschaft, Frankfurt 2004.

[2] Gaitanides, M.: *Prozessorganisation - Entwicklung, Ansätze und Programme des Managements von Geschäftsprozessen*, 2. überarb. Aufl., Verlag Franz Vahlen GmbH, München 2007.

[3] Hirschmann, P.: *Kooperative Gestaltung unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*, Gabler Verlag, Wiesbaden 1998, zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 1998.

[4] Hofer, A.: *Prozessorientiertes Kooperationsmanagement - Methoden, Vorgehensmodell und Anwendungsszenario*, Logos Verlag, Berlin 2007, zugl. Diss., Univ. d. Saarlandes, 2007.

[5] Killich, S.; Luczak, H.: *Unternehmenskooperationen für kleine und mittelständische Unternehmen - Lösungen für die Praxis*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2003.

[6] Alt, R.; Fleisch, E.: *Netzwerkfähigkeit von Unternehmen: Beiträge des Business Engineering zum Business Networking*, in: Österle, H.; Winter, R.: *Business Engineering - Auf dem Weg zum Unternehmen des Informationszeitalters*, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin u.a. 2003.

[7] Zobolski, A.: *Kooperationskompetenz im dynamischen Wettbewerb: eine Analyse im Kontext der Automobilindustrie*, Gabler Verlag, Wiesbaden 2008.

Fertigungsgerechtes Konstruieren im Automobilbau

Wolfgang Meyer

Volkswagen AG
Brieffach 011/13830
38440 Wolfsburg
Email: wolfgang6.meyer@volkswagen.de

In diesem Referat wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, der es erlaubt, bereits in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses (PEP) eines Automobils fertigungsgerechte konstruktive Lösungen zu gestalten und abzusichern. Die Integration der entwickelten Methoden in den PEP wird, anhand von praktischen Beispielen, erläutert und ihre Wirksamkeit durch geeignete Kennzahlen nachgewiesen.

This presentation introduces a methodological approach which allows DFM solutions to be developed and verified in the early stages of the product development process for automobiles. Using practical examples, it discusses integration of the developed methods in the product development process and cites appropriate figures to prove the effectiveness of these methods.

Stichwörter: *Fertigungsgerechte Konstruktion, Wissensdatenbanken, Virtuelle Analysen, Seriennahe Fertigung*

Keywords: *Design for manufacturability (DFM), knowledge databases, virtual analysis, production under serial conditions.*

1 Späte Änderungen als Achillesferse erfolgreicher Neuanläufe

Einer internationalen Studie der Universität St. Gallen [1] zufolge, verfehlten im Jahr 2004 60% der durchgeführten Serienanläufe in der europäischen Automobilindustrie die gesetzten Ziele. Von den Teilnehmern der Studie wurden dabei späte Änderungen und, damit verbunden, verspätete Entwicklungsfreigaben als Achillesferse für erfolgreiche Anläufe genannt. Ca. 18 % der Entwicklungskosten wurden hierdurch in der Anlaufphase ausgelöst. Als ein wesentlicher Grund dafür kann die „tayloristische" Aufgabenteilung –die bei einem komplexen Produkt wie dem Automobil durchaus erforderlich sein kann– und die zeitliche Staffelung der Entwicklungs- und Planungsaufgaben im PEP angeführt werden. In der frühen Projektphase werden die Entwicklungsingenieure vorrangig die Hauptaufgabe verfolgen, die geforderten Produkteigenschaften in ihrer Konstruktion umzusetzen. Eine Verifizierung der geplanten Fertigungsprozesse erfolgt in der Regel erst

in den Vorserien mit den dann vorhandenen Serienbetriebsmitteln. Werden jetzt noch Produktänderungen erforderlich, ist deren Umsetzung, gemäß der 10er-Regel [2] mit überproportional hohen Kosten verbunden.

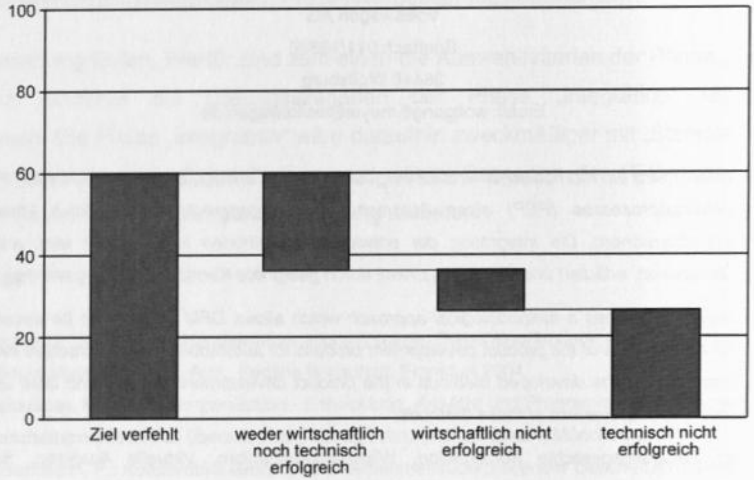


Bild 1: Serienanläufe in Europa

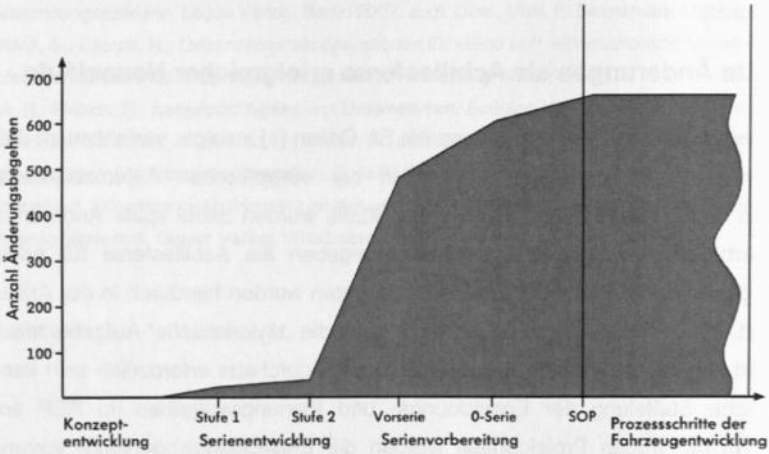


Bild 2: Späte Änderungsbegehren

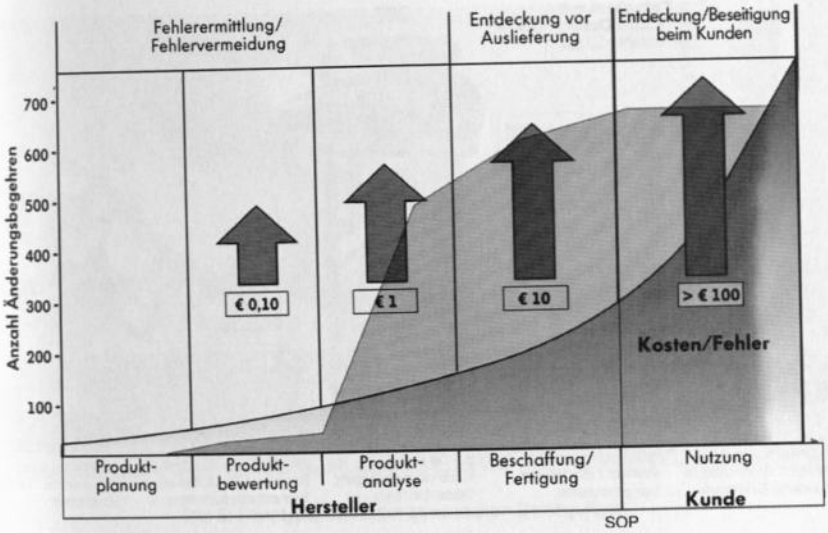


Bild 3: Die Zehnerregel der Fehlerkosten

2 Fertigungsgerechtes Konstruieren in der frühen Projektphase

Im Folgenden werden methodische Ansätze geschildert, die es Entwicklern und Planern erlauben, erprobte, fertigungsgerechte konstruktive Lösungen zum Einsatz zu bringen bzw. die Serienfähigkeit von Fertigungsverfahren bereits beim Prototypenbau, durch den Einsatz seriennaher Methoden abzusichern. Die entwickelten Methoden lassen sich wie folgt zusammenfassen:

2.1 Einsatz von Wissensdatenbanken

Bereitstellen von erprobten technischen Musterlösungen, die sowohl die geforderte Funktion einer Baugruppe als auch eine großserienfähige Fertigungstechnik beinhalten (z.B. Anbindung des Kotflügels an die Karosserie im Bereich der A-Säule).

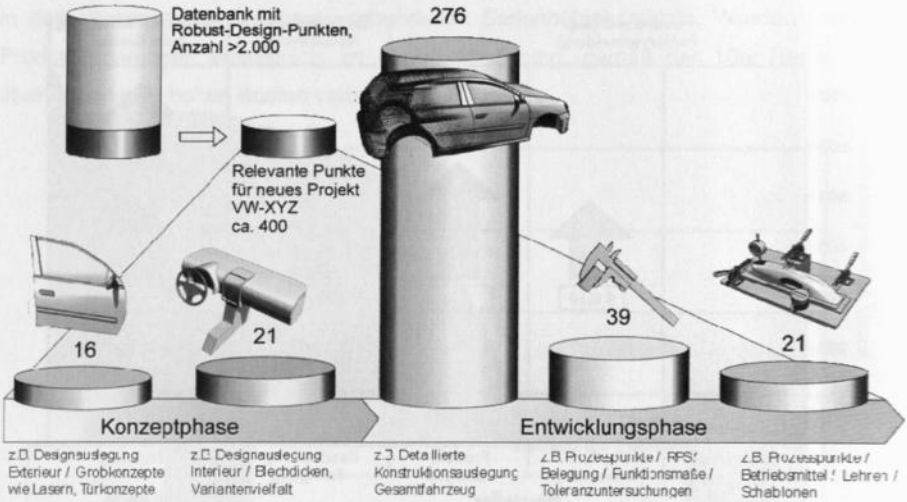


Bild 4: Einsatz von Wissensdatenbanken

2.2 Virtuelle Analysen

Prüfen des Fahrzeug-Datenmodells im Hinblick auf seine Baubarkeit unter den Bedingungen einer Großserienfertigung mit Hilfe eines Prüfkataloges (Beispiel).

2.3 Aufbau von Prototypen unter seriennahen Bedingungen

Prototypen dienen zuallererst der Verifizierung der geforderten Produkteigenschaften. Erfolgt die Anfertigung jedoch unter seriennahen Bedingungen (z. B. Einsatz von seriennahen Tiefziehwerkzeugen und seriennahen Karosseriebauvorrichten), können frühzeitig wichtige Erkenntnisse für die späte Serienfertigung gewonnen und evtl. erforderliche Produktänderungen kostengünstig umgesetzt werden.

Bild 5: Prototypenbau unter seriennahen Bedingungen

3 Erfahrungen aus der Praxis

Die geschilderten Methoden wurden in den vergangenen Jahren während der Projektarbeit bei Volkswagen entwickelt und laufend zum Einsatz gebracht. Auf Basis der mittlerweile vorliegenden Erfahrungen, ist, bei konsequentem Einsatz dieser Methoden, eine Reduzierung der späten Produktänderungen nachweisbar [3].

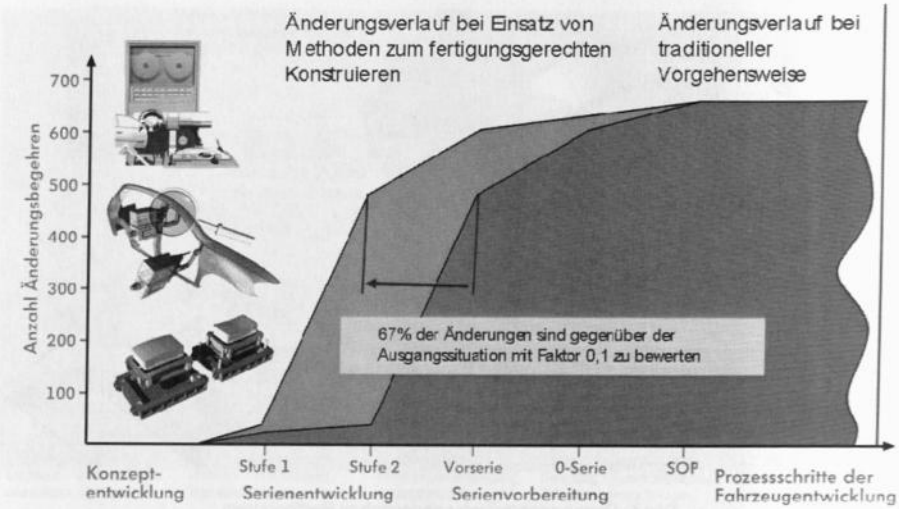


Bild 6: Vorgezogener Erkenntnisgewinn

Für die Zukunft scheint, neben der Pflege und Erweiterung der Wissensdatenbank, der Anfertigung von Prototypen unter möglichst seriengleichen Bedingungen eine besondere Bedeutung zuzukommen. Nachdem der Einsatz von seriennahen Betriebsmitteln im Prototypenbau mittlerweile hinreichend erprobt wurde, wird als nächster Schritt der Einsatz eines ersten Entwicklungsstandes der Serienbetriebsmittel für die Fertigung von Prototypen angestrebt.

Literatur

[1] Straube, Frank; Fitzek, Daniel: Handlungsfelder und Erfolgskonzepte für Automobilzulieferer, Studie des Kühne Instituts für Logistik der Universität St. Gallen, 2004.

[2] Tietjen, T.; Muller, D.; Die Zehnerregel der Fehlerkosten, Kap. 4.1 aus FMEA-Praxis, Hanser-Verlag, 2003.

[3] Meyer, Wolfgang; Beschleunigter Anlauf der Serienfertigung von Karosseriebauteilen durch frühzeitige Bereitstellung seriennaher Werkzeuge, Shaker Verlag, 2008.

Beiträge zum 8. Kolloquium

ohne Vortrag

Innovative 4-Wellen Umlaufgetriebe - ein industrielles Anwendungsbeispiel

Hans-Joachim Beyer

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Institut für Konstruktion und Produktentwicklung
Berliner Tor 21, 20099 Hamburg
Email: hans-joachim.beyer@haw-hamburg.de
www.haw-hamburg.de

Inhalt:

Auf dem Gebiet der Antriebstechnik der Dekanter-Zentrifugen wird intensiv geforscht und entwickelt. Die technische Aufgabenstellung wurde bisher durch unterschiedliche Antriebssysteme gelöst, die jedoch entweder einen schlechten Wirkungsgrad, eine eingeschränkte Einsetzbarkeit oder Nachteile bei der Regelung der Abtriebsdrehzahl des rotierenden Umlaufgetriebes aufweisen. Es wird die Entwicklung und die Funktion des innovativen „4-Wellen-Antriebs" vorgestellt, der eine Differentialstufe enthält. Dieser Antrieb hat in den letzten Jahren die Antriebstechnik der Dekanter revolutioniert und ist nun von den Technologieführern in den Markt gebracht worden.

Abstract:

Lot of research is done in the field of drive technology for decanter centrifuges. The common drive systems show an insufficient efficiency, limited functional range or disadvantages for the control of the speed at the output shaft of the rotation gear box. In this paper the function of the innovative 4-gear-drive is presented which owns a differential stage. This drive revolted the decanter drive technology and has been introduced by all leading decanter manufacturers.

Stichwörter: *Umlaufgetriebe, Planetenradgetriebe, Zykloidengetriebe, 4-Wellen-Antrieb, Dekanter, Vollmantelzentrifugen, Zentrifugen*

Keywords: *Planetary gear box, Cyclo gear box, 4-shaft-drive, decanter, decanter centrifuge, centrifuge*

1 Einleitung

Planetengetriebe und Zykloidengetriebe werden in der Industrie überall da eingesetzt, wo der Bauraum begrenzt ist und/oder die Funktion eine koaxiale Bauform erfordert.
In diesem Anwendungsbeitrag wird ein innovatives 4-Wellen-Getriebesystem vorgestellt, dass die Antriebstechnik der Dekanter-Zentrifugen (kurz: „Dekanter") revolutioniert hat.

Dekanter-Zentrifugen werden in fast allen Branchen der Investitionsgüterindustrie eingesetzt. Weltweit werden jährlich über 3.000 Dekanter verkauft. Der Weltmarkt beträgt ca. 1 Milliarde €/Jahr.

2 Anforderung der Dekanter-Zentrifugen an die Umlaufgetriebe

Dekanter [1], [2] sind kontinuierlich betriebene Zentrifugen zur Abscheidung von Feststoffen aus Flüssigkeiten. Ein Dekanter hat eine Trommel, die mit hoher Drehzahl rotiert, wodurch in der Trommel Fliehkräfte von bis zu 6.000-facher Erdbeschleunigung (6.000xg) erzeugt werden.

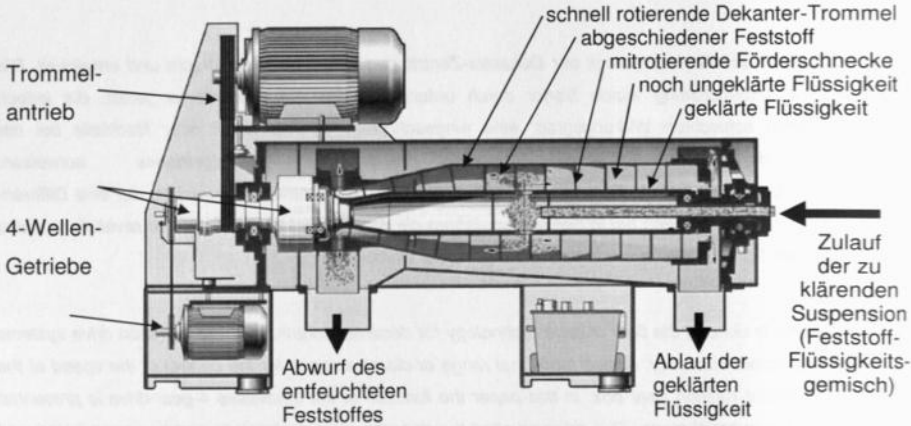


Bild 1: Dekanter-Zentrifuge (Quelle: Werksbild GEA [3])

Dieser Trommel wird die zu klärende Suspension zugeführt. Die Suspension bildet einen Flüssigkeitsring in der Trommel. Infolge der großen Fliehkräfte sedimentieren die Feststoffe an der Trommelinnenwand. Die geklärte Flüssigkeit fließt an einem Trommelende kontinuierlich über spezielle Austragssysteme ab. In der Trommel ist eine mitrotierende Förderschnecke gelagert, die sich mit etwas höherer Geschwindigkeit als die Trommel dreht, wodurch eine Differenzdrehzahl zwischen der Trommel und der Schnecke entsteht. Die Förderschnecke transportiert die abgeschiedenen Feststoffe zu speziellen Feststoff-austragsöffnungen, wo die Feststoffe abgeworfen werden.

Durch die Fliehkräfte auf die Feststoffe entstehen große Reibungskräfte zwischen der Trommel, den Feststoffen und der Förderschnecke, was zu einem sehr großen

Drehmoment zwischen der Förderschnecke und der Trommel führt. Für die Anwender in der Produktion ist es wichtig, dass die Differenzdrehzahl bei laufender Maschine immer an die aktuellen verfahrenstechnischen Prozessbedingungen angepasst werden kann [4].
Die technischen Herausforderungen für die mitrotierenden Getriebe bestehen aus folgenden Randbedingungen:

1. Das Abtriebsmoment ist gemessen am Bauraum sehr groß (bis zu 50.000 Nm)
2. Das Getriebe ist Bestandteil des schnell drehenden Rotors und muss leicht, kompakt und rotationssymmetrisch sein.
3. Alle Getriebeteile (Zahnräder, Lager, Schmierstoffe, Abdichtungen) sind großen Fliehkräften (1.500 – 5.000g) ausgesetzt.
4. Die Antriebsenergie und die Regelung der Differenzdrehzahl müssen von außen und mit gutem Wirkungsgrad in das drehende System eingebracht werden.
5. Die Differenzdrehzahl sollte nicht von der Trommeldrehzahl abhängig sein.

3 Konventionelle Antriebssysteme

Mit einer kurzen Rechnung wird veranschaulicht, warum eine Dekanter-Zentrifuge ein Getriebe benötigt. Im Bild 2 beträgt die Fliehkraft an der Trommelinnenwand das 3.500 fache der Erdanziehungskraft. Ein Teil, das normalerweise 1 kg wiegt, wiegt dort 3,5t. Die

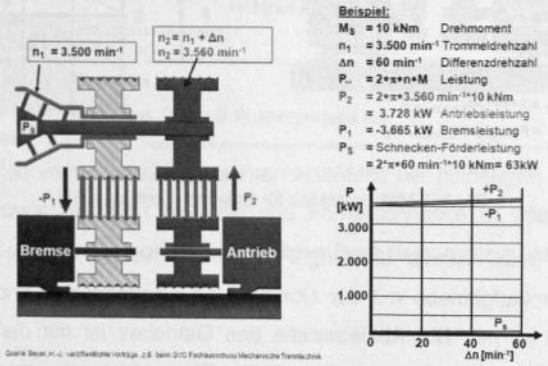


Bild 2: Rechenbeispiel zur Veranschaulichung des Bedarfs für ein Umlaufgetriebe [1]

Reibkraft ist näherungsweise 3.500mal so stark wie im Erdschwerefeld. Daher braucht man ein hohes Drehmoment, um die Schnecke in der Trommel zu drehen.
In diesem Beispiel beträgt das Fördermoment M = 10.000 Nm. Die Differenzdrehzahl zwischen Trommel und Schnecke ist 60 1/min. Um zwischen Trommel und Schnecke das Drehmoment M = 10 kNm und die Reibleistung P_S = 63 kW aufzubringen, müsste der Antriebsmotor die Leistung 3.728 kW aufbringen und der Bremsmotor mit 3.665 kW Bremsleistung gegenhalten. Es wird deutlich, dass die ungünstige Kombination aus hoher Drehzahl und hohem Drehmoment unbedingt vermieden werden muss. Dies geschieht durch Einbau eines Umlaufgetriebes, dessen Gehäuse fest mit dem rotierenden Rotor verbunden ist. Die Zentrifugenbranche setzt wegen der hohen Energiedichte und der Rotationssymmetrie ausschließlich Planetenradgetriebe, Zykloidengetriebe und seltener spezielle hydraulische Radialkolbenmotoren ein, die über Drehdurchführungen mit Hochdruckhydrauliköl (bis zu 250 bar) angetrieben werden. Bei der mechanischen Getriebeversion gibt es 4 grundlegende Antriebskonzepte. Bild 3 zeigt das klassische Antriebskonzept mit 2 Motoren, das bis vor kurzem am meisten verbreitet war:

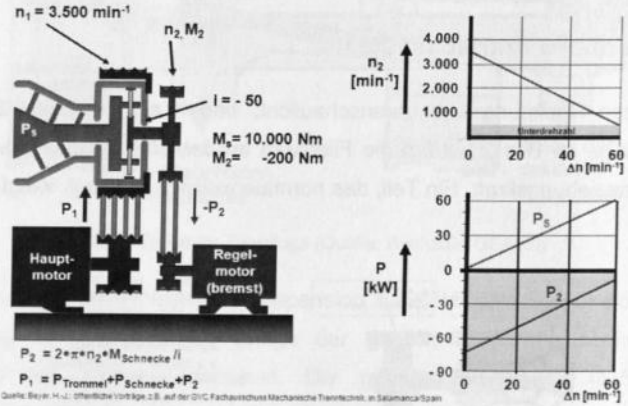


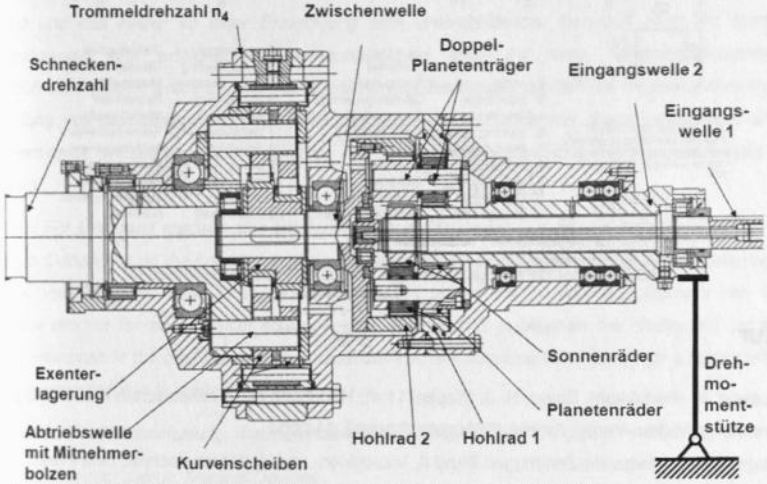
Bild 3: 2-Motorenantrieb für Dekanter-Zentrifugen [5]

Der Hauptmotor treibt mit der Leistung P_1 die Trommel an. An der Trommel ist ein fliehkraftfestes Umlaufgetriebe mit der Übersetzung i angeflanscht und dreht mit voller Trommeldrehzahl n_1 mit. Die Abtriebswelle des Getriebes ist mit der Förderschnecke verbunden, die Eingangswelle wird über einen Riementrieb von einem generatorisch

laufenden Regelmotor abgebremst. Die funktional wichtige Differenzdrehzahl $\Delta n = (n_1 - n_2) / i$ ist proportional zur Differenz der Drehzahlen der Trommel n_1 und der Getriebeeingangswelle n_2. Damit gibt es eine ungünstige Interaktion zwischen Trommelantrieb und Regelantrieb. Weiterhin ungünstig ist der Energieverlust P_2 durch das Abbremsen der Getriebeeingangswelle.

4 4-Wellen-Umlaufgetriebe

Beim innovativen 4-Wellen-Umlaufgetriebe wird das Hauptgetriebe um eine Differentialgetriebestufe mit zwei verschalteten Planetenradstufen erweitert. Das Getriebe hat insgesamt 4 Wellen: Zwei Eingangswellen, das rotierende Gehäuse und die Abtriebswelle.



Quelle der technischen Zeichnung: Mayr, Christian: Vierwellengetriebe verbessern Antriebe von Schneckenzentrifugen, Antriebstechnik 37 (1998) Nr.10

Bild 4: 4-Wellengetriebe [6]

Der 4-Wellenantrieb vermeidet die genannten Nachteile der bisherigen Antriebssysteme: Die Differenzdrehzahl zwischen Trommel und Förderschnecke ist unabhängig von der Trommeldrehzahl und die energetisch ungünstigen Bremsleistungen werden vermieden.

5 Ausblick

Führende Dekanterhersteller forschen derzeit auf dem Gebiet des Dekanter-Direktantriebs, d.h. der Integration von Antriebsmotor, Regelmotoren und Umlaufgetriebe. Bild 5 zeigt das Patent zur Integration von 4-Wellen-Antrieb und Direktantrieb.

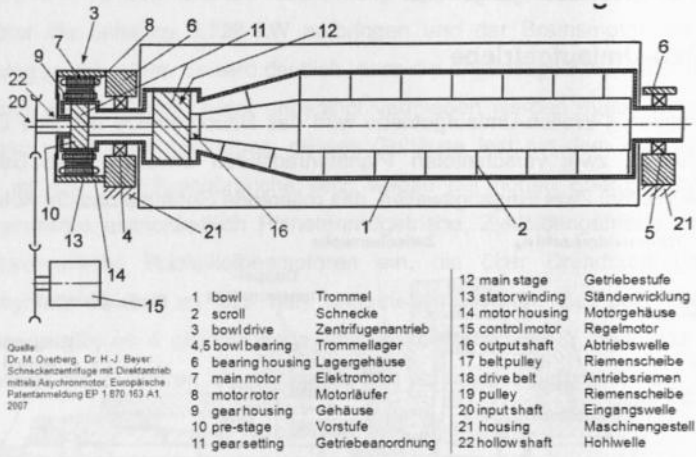


Bild 5: Patent Schneckenzentrifuge (Dekanter) mit Direktantrieb [6]

Literatur

[1] Luckert, K. (Redaktion), Beyer, H.-J. (Kapitel 11.4): Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung, Vulkan-Verlag GmbH; ISBN: 3802721969, 04/2004

[2] Stahl, Werner: Industrie-Zentrifugen Band II, Maschinen- und Verfahrenstechnik, DrM Press, ISBN 3-9522794-0-4, 06/2004

[3] GEA-Broschüre: Dekanter und Separatoren von GEA Westfalia Separator für die Aufbereitung industrieller Abwässer, GEA-Nr. 9997-1271-010/1108 DE

[4] Beyer, H.-J.: Automation and process control of centrifugal decanters, Proc of the International symposium on Filtration and Separation, Salamanca Spain., Sept. 28-29, 1995, p. 156-165

[5] Beyer, H.-J. Selbstreinigende Separatoren mit Öffnungsautomatik und Dekanter mit 2-Getriebe-Antrieb, Symposium „Die Technologie der Zentrifugen", Haus der Technik, Essen, 06/1997

[6] Mayr, C.: Vierwellengetriebe verbessern Antriebe von Schneckenzentrifugen, Antriebstechnik 37 (1998) Nr.10

[7] Overberg M., Beyer, H-J.: Schneckenzentrifuge mit Direktantrieb mittels Asychronmotor, Europäische Patentanmeldung EP 1 870 163 A1, 2007

Medizintechnik für minimalinvasive Interventionen, eine Herausforderung für kleine und mittelständische Unternehmen

Axel Boese

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: axel.boese@ovgu.de; Internet: http://www.inka-md.de

Inhalt: *Die Entwicklung von Medizinprodukten stellt für kleine und Mittelständische Unternehmen (KMU) eine große Herausforderung dar. Je nach Vorkenntnissen und Erfahrungen des Produktentwicklers sind der Aufwand und das Risiko so einer Entwicklung sehr unterschiedlich. Dennoch kann mit methodischer Vorgehensweise eine erfolgreiche Produktentwicklung auch für nicht- Medizintechnikunternehmen erfolgreich durchgeführt werden. In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Herausforderungen bei der Entwicklung von Medizinprodukten für KMU diskutiert. Lösungsvarianten durch methodisch analytische Vorgehensweise werden an einem Beispiel aus dem Forschungsprojekt INKA – intelligente Katheter aufgezeigt.*

Abstract: *For small and medium-size enterprises the development and design of medical devices is a big challenge. Depending on the knowledge and experience of the engineer the risk of the engineering process could be very different. Using a methodical approach during the product development can lead to a successful product for non medical enterprises as well. In this publication the challenges for small and medium enterprise in the development of medical devices are discussed. A method for a higher efficiency of the engineering process is presented.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, minimalinvasive Medizintechnik*

Keywords: *Product design, Medical Devices*

1 Einleitung

Als Folge der demografischen Entwicklung wird die Anzahl der altersbedingten Erkrankungen wie Herzinfarkt, Schlaganfall oder Krebs dramatisch zunehmen. Der Anteil der über 60-Jährigen in Deutschland wird sich in den nächsten Jahren deutlich erhöhen. In dieser Altersgruppe ereignen sich z.B. rund 80 Prozent aller Schlaganfälle. Nach einer Studie des Interdisziplinären Zentrums für Public Health der Universität Erlangen-Nürnberg [1] wird aufgrund dieser Entwicklung die Anzahl der Schlaganfälle jährlich um 2% steigen. Dadurch erhöht sich auch die Anzahl der minimalinvasiven Eingriffe zur

Bekämpfung von Schlaganfällen ständig. Durch minimalinvasive Interventionen können heute zuvor nicht oder nur schwer therapierbare Krankheitsbilder schneller und schonender behandelt werden. Neue Werkzeuge ermöglichen dabei auch neue Therapieansätze und das Vordringen in Körperregionen die bisher nur durch chirurgische Eingriffe erreicht werden konnten.

2 Hintergrund

Vielfach ist der Erfolg einer medizinischen Behandlung abhängig von der eingesetzten Technik und den verwendeten Werkzeugen. Daher ist speziell der Bereich der minimalinvasiven Medizintechnik sehr innovationsgetrieben und weltweit eine Wachstumsbranche. Auf diesem Markt stehen einigen sehr intensiv forschenden und global agierenden Unternehmen insbesondere aus dem Bereich elektromedizinischer Geräte und Instrumente eine Vielzahl von kleinen Herstellern gegenüber. Diese kleinen Unternehmen, die neue Technologien und Produkte anbieten, haben meist ein schmales Produktspektrum und produzieren überwiegend für den nationalen Markt oder agieren vornehmlich auf Nischenmärkten. Für diese technologischen Pioniere in der Medizintechnik ist die Akzeptanz auf dem Inlandsmarkt und die Implementation von Innovationen in der Anwendung für die wirtschaftliche Überlebensfähigkeit von besonderer Bedeutung [2].

Der Marktzugang basiert bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) stark auf persönlichen Kontakten in die medizinische Community und positiven Erfahrungen in der Zusammenarbeit von Mediziner und Unternehmen. Lange und häufige Entwicklungszyklen für Produkte werden nicht akzeptiert. Die Erwartungshaltung ist hoch. Während sich Global Player bei ihren Entwicklungen auf einen festen Stamm von kooperierenden Ärzten stützen können, die bei der Meinungsbildung und Bewertung neuer Produktideen aktiv mitarbeiten und dafür unterstützt werden, sind KMU auf schnelle erfolgreiche Umsetzung von Innovationen angewiesen. Dazu ist es notwendig eine gemeinsame Sprache zwischen anwendendem Mediziner und entwickelndem Ingenieur zu finden. Methodische Vorgehensweise bei der Produktentwicklung reduziert dabei die Entwicklungszeit und die Entwicklungszyklen erheblich. Hierfür ist jedoch detaillierte Sachkenntnis und Erfahrung erforderlich. Im medizinischen, speziell im operativen, Bereich ist es jedoch schwierig sich diese oft sehr komplexe und individuell differenzierte Sachkenntnis zu erwerben. Der

Produktentwickler hat z.B. keine direkte Erfahrung im Umgang mit dem Operationswerkzeug im menschlichen Organismus. Ihm fehlt das Gefühl für das Führen des Werkzeugs in Bezug auf die Handhabung, die Haptik, die Entscheidungswege und –kriterien und für das Zusammenspiel der an einem Eingriff beteiligten Personen und Geräte. Für den agierenden und erfahren Arzt sind diese Dinge selbstverständlich, jedoch schwer zu erklären. Das führt dazu, dass in der Entwicklung stehende Produkte oft das erwartete Ziel nicht erreichen und auf Ablehnung stoßen oder durch weitere Entwicklungszyklen angepasst werden müssen. Dadurch werden Entwicklungszeit, Ressourcen und Kosten gebunden und eine erfolgreiche, d.h. gewinnbringende Produkteinführung erschwert.

In der durch das BMBF geförderten Initiative INKA- Intelligente Katheter werden Werkzeuge für minimalinvasive Interventionen entwickelt. Ein spezieller Fokus liegt dabei auf der Kooperation mit regionalen KMU. Die Erfahrungen aus dem Projekt verdeutlichen die Schwierigkeiten die für KMU bei der Medizinprodukte-Entwicklung entstehen. Im INKA werden deshalb auch Ansätze zur Überwindung dieser Hürden erarbeitet.

3 Methoden

3.1 Wie komme ich als KMU zu einer Medizintechnik- Entwicklung

Zunächst sollen verschiedene Kategorien von KMU und deren Ausgangslage für eine erfolgreiche Medizinprodukte- Entwicklung aufgezeigt werden. Einen Überblick dazu gibt Bild 1.

Tabelle 2: KMU als Medizinprodukte-Entwickler nach Kategorien

Kategorie	I	II	III
	Medizintechnik Unternehmen mit Fachkenntnis des medizinischen Anwendungsgebietes	Medizintechnik Unternehmen ohne Fachkenntnis des medizinischen Anwendungsgebietes	Branchenfremdes Unternehmen
	• Erfahrungen in der Produktentwicklung und medizinischen Zulassung liegen vor • Evtl. zertifiziert • Kenntnisse des medizinischen Anwendungsgebietes und Kontakt zur Community sind vorhanden	• Erfahrungen in der Produktentwicklung und medizinischen Zulassung liegen vor • Evtl. zertifiziert	• Weder Erfahrungen in der Produktentwicklung noch medizinischen Zulassung liegen vor

Wie kommt nun ein Unternehmen der oben dargestellten Kategorien zu einer Entwicklungsaufgabe. Ein Unternehmen der Kategorie I hat Kontakt zur Anwenderszene, bewegt sich im Anwendungsumfeld, ist bekannt beim Anwender. Diese Art der Unternehmen erschließen sich die Fragestellungen aus Gesprächen mit Anwendern oder im Zusammenhang mit schon bestehenden Produkten oder werden direkt angefragt. Kategorie II Unternehmen setzen ihre Produkte im Anwenderumfeld ein, haben eine technologische Lösung die auch für andere Zwecke eingesetzt werden kann, hören in ihrem Produktzusammenhang von Problemstellungen. Ein Unternehmen der Kategorie III ist ein Zulieferer zu Medizinprodukten oder möchte seine Produktpalette gezielt auf den attraktiven Medizinprodukte Markt erweitern oder wird aufgrund technologischer Fähigkeiten angefragt.

3.2 Überblick über das medizinische Fachgebiet

Unternehmen der Kategorie II und III müssen sich zunächst einen Überblick über das medizinische Fachgebiet verschaffen. Das hilft zum einen im Gespräch mit potentiellen

Anwendern und bei der klaren Herausstellung des zu bearbeitenden Problems. Wichtige Punkte sind:

- Was sind die behandelten Krankheitsbilder
- Welche anatomischen Strukturen werden behandelt
- Welche Geräte und Hilfsmittel werden eingesetzt

Um einen ersten Überblick zu erhalten reicht meist schon ein Blick in das Internet oder eine Literaturstudie. Daran sollte sich ein Gespräch mit den Anwendern anschließen. Wenn möglich sollte das Problem bei einer Beobachtung visualisiert werden.

3.3 Produktpotential

Um die Attraktivität einer Entwicklungsaufgabe einzuschätzen wird ein gewinnorientiertes Unternehmen das Produktpotential klären.

- Wie häufig wird das Verfahren angewendet
- Wer sind potentielle Anwender
- Welche parallelen Entwicklungen beeinflussen das Produkt
- Gibt es Konkurrenzprodukte
- Was darf das Produkt Kosten
- Welchen Vorteil muss das Produkt bringen

3.4 Workflowanalyse

Der letzte genannte Punkt kann häufig nicht so einfach beantwortet werden. Dazu wird eine fundierte Kenntnis des Anwendungsfalles benötigt. Dafür eignet sich der Einsatz der Workflowanalyse. Zum einen kann so der aktuelle Ist- Stand festgehalten werden, zum anderen werden Defizite z.B. in einem Operationsverlauf verdeutlicht. In dem ein zeitlich festgehaltener Ablauf dokumentiert wird, werden Prozesse in einem System evaluierbar. Dadurch wird eine Konkretisierung der Aufgabenstellung ermöglicht. Ausgehend von den aufgenommen Daten können Anforderungen abgeleitet werden, die sich z.B. auf Geometrie, Handling oder Zeitvorgaben beziehen [3]. Auf diese Datenbasis kann der Entwickler auch während des Lösungsprozesses immer wieder zurückgreifen und seine Ansätze damit abgleichen. Für eine spätere medizinische Zulassung des Produktes ist

eine umfangreiche Dokumentation des Produktentstehungsprozesses erforderlich. Eine Analyse des medizinischen Anwendungsfalls ist dafür der erste Baustein.
Für die Dokumentation von medizinischen Workflows können verschie-dene Verfahren angewandt werden. Das Spektrum reicht von der einfachen Liste zur Datenerfassung plus Stoppuhr bis zur PC basierten spezialisierten Software in Kombination mit Videoaufzeichnung [4]. Je nach Verfahren wird der Workflow in unterschiedlichen Detailierungsgraden erfasst. Hier sind Aufwand / Kosten und Nutzen gegeneinander abzuwägen.

3.5 Produktentwicklung am Beispiel eines Knochenbiopsiebohrers für das MRT

Die Bildgebung mit Hilfe von Magnetresonanztomografie (MRT) ist speziell für die Tumortherapie ein sehr interessantes Verfahren da eine hohe Auflösung und eine gute Gewebedarstellung ermöglicht werden [5]. Es können auch Läsionen im Knochen oder durch Knochen verdeckt dargestellt werden. Problematisch für Therapien unter MR Bildgebung sind die starken wechselnden Magnetfelder. Herkömmliche Operationswerkzeuge, vom Skalpell bis zur Nadel, können hier nicht eingesetzt werden. Dafür müssen Werkzeuge aus Keramik, Kunststoff oder nichtmagnetischem Metall benutzt werden. Für die Entnahme von Biopsien aus dem Knochen wurden schon mehrere Werkzeuge entwickelt [6],[7]. Alle sind jedoch bisher nicht überzeugend. So sind z.B. die Schneiden von Titanium Bohrern nach wenigen Umdrehungen stumpf und erzeugen auf dem MR Bild Artefakte. Andere Bohrer lassen sich nur mit hohem Kraftaufwand des Arztes in den Knochen einbringen. Es wurde eine Analyse des Workflows einer Biopsie-Entnahme durchgeführt. Hier zeigten sich noch weitere Defizite bisheriger Systeme. So konnte z.B. in einem Fall das gebohrte Loch nach Entnahme des Bohrers nicht wiedergefunden werden oder der Bohrer war auf dem MR Bild nicht sichtbar **Bild 1**. Auch die Schneidgeometrien der Bohrer waren nicht optimal und konnten nicht auf der Knochenoberfläche sicher platziert werden.

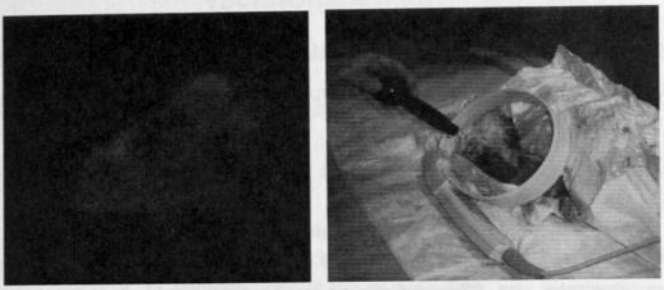


Bild 1: Bohren in Schweineknochen unter MR Bildgebung

Anhand dieser Defizite und dem daraus erwachsenen Verständnis für den Vorgang konnten für konkrete Anforderungen an das Produkt erstellt werden. Die Schneidgeometrie wurde angepasst. Zur besseren Handhabung wurde in Zusammenarbeit mit den Anwendern ein Workflow für die Benutzung des Gerätes erarbeitet. Derzeit wird ein erster Prototyp gebaut in dem die Erfahrungen eingeflossen sind.

4 Schlussfolgerungen

Produktentwicklung im Bereich Medizintechnik ist eine große Herausforderung für KMU. Speziell die Hürde der medizinischen Zulassung ist für ein Unternehmen, welches auf diesem Gebiet noch keine Erfahrungen gesammelt hat schwierig. Eine geeignete Form der Dokumentation des Produktentstehungsprozesses ist dafür notwendig. Der Einsatz der Workflowanalyse kann dabei zum einen das Erstellen von konkreten Anforderungen vereinfachen, entwicklungsbegleitend einen Abgleich von Lösungsansätzen ermöglichen als auch nach Abschluss der Entwicklung eine Verbesserung dokumentieren. Zudem wird das Verständnis des operativen Eingriffs und der Verwendung der Werkzeuge beim nicht Mediziner erhöht.

5 Acknowledgement

Der Autor dankt seinen Kollegen an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Diese Arbeit wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des INKA- Projektes gefördert.

Literatur

[1] M. Dietl, R. Pohle, M. Weingärtner, R. Polgar, E. Gräßel, S. Schwab, und P. Kolominsky-Rabas, "Schlaganfallursache und Pflegebedürftigkeit im Langzeitverlauf," *Fortschritte der Neurologie - Psychiatrie*, vol. 77, 2009, S. 714-719.

[2] R. Farkas et al., "Situation der Medizintechnik in Deutschland im internationalen Vergleich Studie im Auftrag des BMBF," 2005.

[3] A. Boese, K-H.Grote, "Workflow Analysis as Tool for Development of Medical Devices, a white Paper," 2010.

[4] T. Neumuth, G. Strauß, J. Meixensberger, H. U. Lemke, O. Burgert, "Acquisition of Process Description from Surgical Interventions," 2006.

[5] H. Rechl, N. Hof, und L. Gerdesmeier, "Differentialdiagnostik von Knochen- und Weichteiltumoren in der MRT," *Der Orthopäde*, vol. 30, 2001, S. 528-539.

[6] D. Fritzsch, R. Scholz, A. Werner, W. Gründer, A. Winkel, und T. Kahn, "Einsatz einer neu entwickelten Bohrmaschine mit piezoelektrischem Antrieb für die Durchführung von Knochenbiopsien im offenen MRT," *RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, vol. 174, 2002, S. 1309-1312.

[7] W. Daecke, M. Libicher, U. Mädler, C. Rumpf, und L. Bernd, "Möglichkeiten mit der MRT-gesteuerten Tumorbiopsie am Bewegungsapparat," *Der Orthopäde*, vol. 32, Feb. 2003, S. 170-174.

Technologien zur Herstellung von cutanen Mikrogewebspartikeln zur Behandlung großflächiger thermischer Verletzungen

Ines Barz[1], Karl-Heinrich Grote[2], Gunter Klohs[3], Frank Engelmann[1]

[1]Fachhochschule Jena
Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena
Email: ines.barz@fh-jena.de, frank.engelmann@fh-jena.de; Internet: http://www.wi.fh-jena.de

[2]Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: karl.grote@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/

[3]Universitätsklinikum Halle (Saale)
Universitätsklinik und Poliklinik für Kinderchirurgie
Ernst-Grube-Str. 40, 06120 Halle
Email: gunter.klohs@medizin.uni-halle.de; Internet: http://www1.medizin.uni-halle.de/kkc/

Inhalt: *Durch kontinuierliche Weiterentwicklung in der modernen Verbrennungschirurgie konnte die Überlebensprognose für Schwerbrandverletzte deutlich verbessert werden. Wesentlich ist dabei das Konzept der frühen Entfernung der zerstörten Hautpartien (Nekrektomie) und der anschließenden Defektdeckung. Trotz intensiver Forschungen auf dem Gebiet des Tissue Engineering stellt der Einsatz autologer Hauttransplantate nach wie vor die beste Behandlungsmethode dar. Bei großflächigen thermischen Verletzungen stehen dafür jedoch nicht ausreichend große Spenderareale zur Verfügung. Im zu bearbeitenden Forschungsprojekt soll daher eine Technologie erarbeitet werden, die das Hauptproblem der chirurgischen Behandlung von Schwerbrandverletzten, den Mangel an autologer Spenderhaut, durch die Herstellung von autologen Transplantaten aus Mikrogewebspartikeln, löst.*

Abstract: *Through the continual further development of modern burn surgery the probability of survival for patients with extensive burn injuries have been clearly improved. In this context the concept of early excision and following wound closure is very important. In spite of intensive research in the field of tissue engineering, the application of autologous skin grafts is still the best method of burn treatment. In the cases of extensive burns sufficient donor areas are not available. In the present research project technologies are to be developed, which could solve the main problem of surgical burn treatment, the lack of autologous donor skin, through the production of autologous micro particle transplants.*

Stichwörter: *Hauttransplantation, Verbrennungsbehandlung*

Keywords: *skin transplantation, burn treatment*

1 Einleitung

Großflächige thermische Verletzungen bedeuten für die Betroffenen und ihre Familien, bei ca. 30 bis 40% der Patienten handelt es sich um Kinder, eine drastische Beeinträchtigung der Lebensqualität. Obwohl die Überlebenswahrscheinlichkeit auch von Patienten mit schwersten thermischen Verletzungen (80 – 90 % verbrannte Körperoberfläche, VKOF) deutlich erhöht werden konnte, liegt die Sterblichkeitsrate noch immer bei ca. 20%. [1]
Die chirurgische Standardtherapie zur Behandlung großflächiger 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. [2, 3] Für die anschließende Defektdeckung stehen jedoch bei großflächigen thermischen Verletzungen keine ausreichend großen Spenderareale zur Verfügung. Dies bedingt eine temporäre Wunddeckung mit Hautersatzmaterialien und mehrfache Hauttransplantationen zu späteren Zeitpunkten.
Die Einführung einer Methode zum autologen Hautersatz bei Schwerbrandverletzten „in einem Schritt" ist Gegenstand des nachfolgend beschriebenen Forschungsprojektes.

2 Projektdurchführung

Grundlage für die Bearbeitung der Problematik ist die Nutzung der VDI-Richtlinien. [4]

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Das Optimum der Verbrennungsbehandlung stellt die Deckung mittels autologer Spenderhaut dar. Da diese jedoch bei großflächigen Verbrennungen nicht in ausreichender Menge zur Verfügung steht, kommen andere, kostenintensive und weniger effektive Verfahren des Hautersatzes, überwiegend als temporärer Hautersatz, in Form von synthetischen und biologischen Hautersatzmaterialien zum Einsatz. Auch Kombinationen verschiedener Hautersatzmaterialien mit autologer Spenderhaut sind möglich. Derzeit ist jedoch keines der angewandten Verfahren des Hautersatzes in der Lage eine dauerhafte Wiederherstellung der normalen Funktion der Haut zu ermöglichen.

Das Problem der frühestmöglichen, dauerhaften Deckung kann bisher nur durch autologe Spalthaut sicher gelöst werden. [1]
Diese Tatsache macht eine Vergrößerung der vorhandenen autologen Haut notwendig. Ein sehr aufwändiges und kostenintensives Verfahren ist die im Rahmen des Tissue Engineering entwickelte Methode der Züchtung autologer Keratinozyten. Jedoch stehen die mittels Verfahren des Tissue Engineering hergestellten Hautersatzmaterialien aufgrund der langen Herstelldauer zum Zeitpunkt der Nekrosektomie nicht zur Verfügung.
Zur „mechanischen" Expansion autologer Spalthaut werden derzeit zwei grundlegende Prinzipien angewandt, das Meek- und das Mesh-Verfahren (Abbildung 1). Bei beiden Verfahren wird dem Patienten Eigenhaut in Form von Spalthaut mit einer Dicke von 0,2 bis 0,4 mm entnommen, verarbeitet und auf die Wunde appliziert. Bei dem Einsatz von Meshgrafts wird in der Haut durch maschinelle Einschnitte eine Gitterstruktur erzeugt und zu einem Gitternetz auseinandergezogen. Das Meek-Verfahren basiert auf der maschinellen Zerkleinerung in kleine quadratische Inseln (Größe 3 mm x 3 mm) und der Expansion dieser in definierte Abstände mittels eines vorgefalteten Trägermaterials. Die möglichen Expansionsraten reichen von 1:1,5 bis 1:9. [2, 5] Das Schließen der Transplantatzwischen-räume durch sekundäre Epithelisierung ausgehend von den Transplantaträndern. Expansionsraten > 1:4 werden jedoch nur in Ausnahmefällen oder in Kombination mit anderen Methoden angewandt, da die ästhetischen und funktionellen Resultate des ausschließlichen Einsatzes weit expandierter Transplantate unbefriedigend sind. [1, 2, 5]
Im zu bearbeitenden Forschungsprojekt soll daher ein Lösungsansatz erarbeitet werden, der die Erzielung hoher Expansionsraten bei gleichzeitig guten Heilungsresultaten erlaubt. Ziel ist die Entwicklung einer Technologie, welche es ermöglicht, die Haut in sehr kleine Mikropartikel zu zerteilen und diese anschließend mit einem definierten Abstand zueinander gleichmäßig auf der nekrosektomierten Wunde abzulegen.

2.2 Ermitteln der Systemanforderungen

Im ersten Bearbeitungsschritt wurden die Anforderungen an das zu entwickelnde System ermittelt. Dabei handelt es sich sowohl um die Ermittlung technischer als auch wirtschaftlicher Kenngrößen. In einer systematisches Analyse der Aufgabenstellung wurde u. a. der Stand der Wissenschaft und Technik ermittelt sowie die Erarbeitung aller

einzuhaltenden gesetzlichen Regularien. Wesentliche Parameter und Anforderungen ergeben sich aus dem Material Spalthaut und dem operativen Ablauf als auch Umfeld als Einsatzort.

2.3 Erarbeitung von Lösungsprinzipien

Die zu entwickelnde Technologie gliedert sich in die drei wesentlichen Problemstellungen:

- Lösungen zur Zerkleinerung der Spalthaut in Mikrogewebspartikel,
- Lösungen zur Expansion der Mikrogewebspartikel und
- Lösungen zur Transplantation der expandierten Mikrogewebspartikel.

Dabei sind die Eingangsparameter der technischen Möglichkeiten zur Expansion und Transplantation stark von der Methode der Spalthautzerkleinerung abhängig. Nachfolgend werden daher zwei bisher bearbeitete Lösungsansätze zur Zerkleinerung dargestellt.

Lösungsansatz 1: Ausstanzen und definiertes Ablegen von Spalthautpartikeln

Ziel ist es, geometrisch genau definierte Mikrogewebspartikel in einem definierten Abstandsraster zu einem Transplantat zu fügen. Dazu ist es notwendig, die Spalthaut mit Hilfe eines Stanzwerkzeuges definiert Auszustanzen. Dies ermöglicht u. a. die Generierung sehr kleiner Mikrogewebspartikel mit einer Fläche < 1 mm² in verschiedenen Geometrien. Ähnlich dem Modell eines Stiftplotters werden die einzelnen Mikrogewebspartikel anschließend auf einem Trägermaterial platziert. Die angestrebte Expansionsrate beträgt abhängig von der Partikelgröße bis 1:20. Die hierzu notwendigen technischen Wirkprinzipien sind im Wesentlichen etabliert. Problematisch ist aufgrund der geringen Formstabilität derart kleiner Partikel das definierte Handhaben von Mikrogewebspartikel dieser Größe. Die Erzeugung definierter Partikel mit dieser Technologie bietet den wesentlichen Vorteil, dass mit ihr unter reproduzierbaren Bedingungen weitere biologische Eingangsgrößen für das zu entwickelnde System, wie etwa die optimale, minimale Partikelgröße, erarbeitet werden können. Daher wurde dieser Lösungsansatz als erstes in Laborversuchen erprobt.

Lösungsansatz 2: Hautzerkleinerung durch Mixen

Ein der Literaturrecherche entnommener Ansatz ist die Zerkleinerung von Spalthaut durch das technische Wirkprinzip Mixen. Es hat den Vorteil, dass es sich sehr gut in den vorgegebenen Transplantationsablauf und das dafür zur Verfügung stehende Zeitfenster integrieren lässt. Vorversuche haben ergeben, dass ein Mixer mit den geforderten

Leistungsparametern nicht auf dem Markt verfügbar ist. Insbesondere die starke Schädigung der Partikel sowie die Erwärmung im Prozess stellen wesentliche Probleme dar. Aus diesem Grund müssen bei diesem Lösungsansatz in einem ersten Arbeitsschritt die notwendigen Eingangsgrößen, wie z. B. Messergeometrie, Gestaltung des Mahlraumes oder Prozessgrößen, wie etwa die Drehzahl, für die Entwicklung eines geeigneten Systems ermittelt werden. Dies geschieht in Laborversuchen.

2.4 Durchführung von Versuchen

Laborversuche

Im bisherigen Projektverlauf wurden als erstes mit Hilfe von Laborversuchen und geeigneten Versuchsvorrichtungen weitere Eingangsgrößen ermittelt. Insbesondere bezüglich des Lösungsansatzes 2 sind nur wenige Literaturveröffentlichungen, weitgehend ohne technische Beschreibung der eingesetzten Technik, bekannt.

Ziel der ersten Laborversuche waren daher folgende Aspekte:

- Ermittlung von Schnittkräften,
- Test der Anforderungserfüllung durch einzelne Schnitt- und Schertechnologien,
- Ermittlung realisierbarer Geometrien der Schnitt- und Schertechnologien
- Ermittlung von technischen und Prozessparametern sowie Untersuchung des Einflusses verschiedener Füllstoffe beim Mixen und
- Überprüfung der cutanen Mikrogewebspartikeln auf Schädigung und Vitalität.

Wesentlich war bei den Versuchen insbesondere die Ermittlung der Schädigung und entsprechend der Vitalität der Partikel in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Dies konnte unter anderem durch In-vitro-Kultivierung zur Kontrolle der Epithelisierung realisiert werden.

Tierversuche

Hauptziel der Tierversuche war insbesondere die Gewinnung weiterer biologischer bzw. medizinischer Eingangsparameter deren Ermittlung durch Kultivierungsverfahren nicht möglich ist. Wesentlich war dabei die Gewinnung von Erkenntnissen hinsichtlich

- der optimalen, wachstumsfähigen Größe der cutanen Mikrogewebspartikel,
- des Einflusses der Lage bzw. Orientierung der Partikel zum Wundgrund,
- der technischen Sicherheit und Leistungsfähigkeit der einzelnen Technologien,

- und der Handhabung der einzelnen Technologien im Operationsumfeld.

Die Durchführung erfolgte am Tiermodell Schwein. Schweinehaut ist sowohl im strukturellen Aufbau als auch bezüglich der Funktionalität der menschlichsten Haut am ähnlichsten. Weiterhin können aufgrund der Größe an einem Tier verschiedene Transplantatszenarien unter gleichen Bedingungen getestet und dadurch miteinander verglichen werden.

Auf Grundlage der Laborversuche und bereits ermittelten Anforderungen wurden die vorhandenen Versuchsvorrichtungen modifiziert. Weiterhin wurde eine Methode zur Erzeugung reproduzierbarer Verbrennungen entwickelt.

3 Zusammenfassung

In den durchgeführten Tierversuchen konnten grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich

- der notwendigen Lage der Mikrogewebspartikel,
- der Größe der einzelnen Transplantate und
- der optimalen Abstände der einzelnen Transplantate

gewonnen werden. Bild 16 zeigt beispielhaft Ergebnisse für die Expansionsraten 1:4 (gegenwärtiger Standard) und 1:12. Beide weisen eine Anwachsrate von 95% auf. Auch die optischen Ergebnisse sind vergleichbar gut.

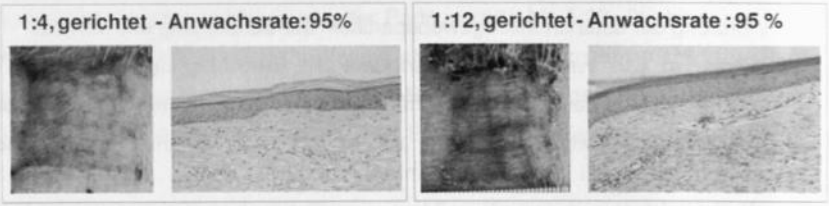


Bild 16: Ergebnisse der Tierversuche (Auszug)

Damit sind die Voraussetzungen für die zielgerichtete Entwicklung von geeigneter Maschinentechnik in einem nächsten Arbeitsschritt geschaffen. Ein Entwicklungsschwerpunkt ist dabei die Schaffung einer Technologie zur Erzeugung individueller Transplantate.

Literatur

[1] Vogt, P.M.; Jokuszies, A.; Niederbichler, A.; Busch, K.; Choi, C.Y.; Kall, S.: *Primäre chirurgische Therapie bei Verbrennungen.* In: Unfallchirurg 109 (2006), S. 270-277

[2] Pallua, N.; von Bülow, S.: Behandlungskonzepte bei Verbrennungen – Teil II: Technische Aspekte. In: Chirurg 77 (2006), S. 179-188

[3] Burke, J. F.; Bondoc, C. C.; Quinby, W. C.: *Primary burn excision and immediate grafting: a method shortening illness.* In: The Journal of Trauma 14 (1974), Nr. 5, S. 389-395.

[4] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. (1993-05)

[5] Kreis, R. W.; Mackie, D.P.; Hermans, R. R.; Vloemans, A. R.: Expansion techniques for skin grafts: comparison between mesh and meek island (sandwich) grafts. In: Burns 20 (1994), S. 39-42

Aspects of design of variable coupled planetary gear drives

Levente Czégé

University of Miskolc
Department of Machine and Product Design
3515, Miskolc-Egyetemváros
Email: czege@freemail.hu; machczl@uni-miskolc.hu

Abstract: *This work presents a method, which helps to select the variable coupled planetary gear drive having minimal power in the branch of the variable sub-drive. To automate the optimization process a computer program packet was developed, which offers a useful aid in the design of variable coupled planetary drives. Due to this software a research program was carried out, which – through evaluating the results of numerous selection problems – aimed to reveal general laws, by means of which the range of coupled drives suitable for a given task can be significantly reduced.*

Keywords: *planetary gear drive, coupled planetary drive, continuously variable drive*

Stichwörter: *Zusammengesetzte Planetengetriebe, Stufenlos verstellbare Getriebe*

1 Introduction

Using continuously variable coupled planetary gear drives the limited possibilities of a simple mechanic or hydraulic variable drive may be overcome. In a coupled system consisting of a planetary gear drive and a continuously variable drive the regulability of the built-in variable drive may be widened, or tightened, the limits of maximum permissible load and adjustment accuracy extended, as well as the efficiency increased. In the design process of these coupled drive systems a basic task is to select the proper drive suitable for the given task. This activity comprises the determination of the optimal structure, transmission ratio range of the built-in variable drive, and the inner transmission ratio of the planetary gear drive.

On the basis of the requirements of continuously variable drives, it can be stated, that in a general case, the main aspects of selection of variable coupled planetary drives are – beside realising the desired transmission ratio and power transmission – the efficiency of the system, the modification of the variable sub-drive's transmission ratio range (regulability), and the power ratio in the branch of the variable sub-drive [2,5]. This work

presents a method, which helps to select the variable coupled planetary drive which has minimal power in the branch of the variable sub-drive.

2 Structure of coupled planetary drives, kinematic and dynamic relations

Systems constructed from 2 d-o-f planetary drives with three base elements and 1 d-o-f transmissions, or variable drives are called coupled planetary drives. If two base elements of a 2 d-o-f planetary gear drive are coupled to the elements of a 1 d-o-f continuously variable drive a 1 d-o-f continuously variable coupled system with a closed loop is obtained. The three variations of coupled systems having different structure can be seen on *Fig.1.*, where *H* denotes the 1 d-o-f sub-drive and *B* denotes the planetary gear drive, the moving base elements of which are *p*, *q* and *r* (*p*, *q* are toothed central elements, *r* is the arm). *S* denotes the auxiliary element without external load, *A* and *B* denote the driving (*0*), or the driven (∞) elements of the system.

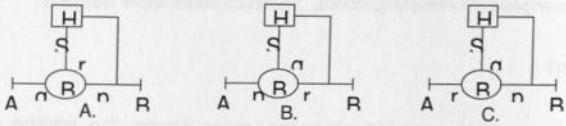
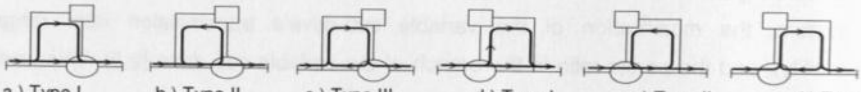


Fig.1.

Kinematical functions of these variable coupled planetary drives can be determined using the functions introduced in the analysis of simple planetary drives [1,2]. The dynamic analysis of coupled planetary drives is based on the establishment of moment- and power-equilibrium equations of each base element [1,2].

In coupled planetary gear drives the determination of the power-flows has an important role. It's known that the coupled system's power-flow is determined by the power-flow of the planetary gear drive. By analysing the power ratios (φ) of the base elements, the power-flow of the planetary gear drive, thus the power-flow of the coupled system can be determined. Based on this analysis it can be stated, that three different power-flows can emerge in a coupled system (*Fig.2.*).



a.) Type I. b.) Type II. c.) Type III. d.) Type I. e.) Type II. f.) Type III.

Fig.2.

Table 1. summarizes the equations for determining the power-flows on the basis of the φ_1 relation, which is written in the function of u_{pq} inner transmission ratio of the planetary drive, the η_f efficiency of the planetary gear drive (defined in the coordinate system fixed to the arm), the i_H transmission ratio of the built-in variable sub-drive and the d exponent (which depends on the direction of the power flow in the planetary gear drive).

		A.	B.	C.
φ_1		$\frac{P_p}{P_r}=\frac{i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d-1}$	$\frac{P_r}{P_p}=\frac{i_H\cdot(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}$	$\frac{P_p}{P_q}=\frac{-i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}$
Power-flow	I.	$0<\frac{i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d-1}$	$\frac{i_H\cdot(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}>0$	$\frac{-i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}>0$
	II.	$\frac{i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d-1}<-1$	$-1<\frac{i_H\cdot(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}<0$	$-1<\frac{-i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}<0$
	III.	$-1<\frac{i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d-1}<0$	$\frac{i_H\cdot(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}<-1$	$\frac{-i_H}{u_{pq}\cdot\eta_f^d}<-1$

Table 1.

3 Ratio of powers in the power branches

In coupled planetary drives, the amount of the power flowing into the sub-drive (P_S) compared to the input power (P_0) may be decisive. The ratio of the power flowing into the sub-drive and the input power can be written as follows:

$$\varepsilon=\left|\frac{P_S\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{P_0}\right|=f(u_{pq},i_H,\eta_f,\eta_H) \qquad (1)$$

where η_H is the efficiency of the 1 d-o-f sub-drive, and the value of d_H exponent depends on the direction of the power flow. The functions of ε are summarised in *Table 2.* for both case of coupling and for all possible arrangement of the arm. The diagrams of these functions are shown in Fig.3., where light grey fields represent the areas in which the power in the branch of the variable sub-drive is higher than the input power ($\varepsilon>1$).

Based on the analysis of *Table 1.* and *2.* the following conclusions may be drawn:

- In case of *type I.* power-flow the power in the branch of the variable sub-drive is lower than the input power ($\varepsilon<1$);
- In case of *type III.* circulating power-flow in driving side coupled systems the power in the branch of the variable sub-drive is higher than the input power ($\varepsilon>1$);
- In case of *type III.* circulating power-flow in driven side coupled systems the power in the branch of the variable sub-drive can be lower than the input power, but in the practically interesting areas it is usually higher;
- In case of *type II.* circulating power-flow the power in the branch of the variable sub-drive can be higher or lower than the input power.

	Driving side coupled (A≡∞, B≡0)	Driven side coupled (A≡0, B≡∞)
A.	$\varepsilon=\left\lvert\frac{(u_{pq}\cdot\eta_f^d-1)\cdot\eta_H^{d_H}\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{u_{pq}\cdot\eta_f^d-1+i_H\cdot\eta_H^{d_H}}\right\rvert$	$\varepsilon=\left\lvert\frac{(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{\eta_f^d\cdot(u_{pq}-1+i_H)}\right\rvert$
B.	$\varepsilon=\left\lvert\frac{u_{pq}\cdot\eta_f^d\cdot\eta_H^{d_H}\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{u_{pq}\cdot\eta_f^d+i_H\cdot\eta_H^{d_H}\cdot(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)}\right\rvert$	$\varepsilon=\left\lvert\frac{u_{pq}\cdot\eta_f^d\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{u_{pq}\cdot(1-i_H)+i_H}\right\rvert$
C.	$\varepsilon=\left\lvert\frac{u_{pq}\cdot\eta_f^d\cdot\eta_H^{d_H}\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{u_{pq}\cdot\eta_f^d-i_H\cdot\eta_H^{d_H}}\right\rvert$	$\varepsilon=\left\lvert\frac{(u_{pq}-1)\cdot u_{pq}\cdot\eta_f^d\cdot\eta_H^{-\mathrm{sgn}(d_H+1)}}{(1-u_{pq}\cdot\eta_f^d)\cdot(u_{pq}-i_H)}\right\rvert$

Table 2.

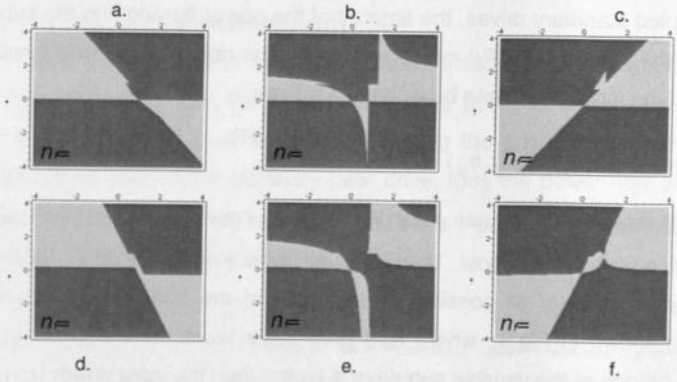


Fig.3.

4 Problem of the optimal selection

Transmitting the desired power without failure is a fundamental requirement of any variable drive. For the sake of the optimal power density (reduced mass), it's often expedient to build a coupled system – by building-in of a smaller variable sub-drive –, in which the power branch of the variable sub-drive transmits only a fraction of the input power. From this point of view the optimal coupled system is the system which realizes the desired transmission ratio range with the lowest possible power ratio in the branch of the variable sub-drive. Regarding the practical design problems, in a general case the selection problem of the optimal coupled drive may be drawn up in the following form: the desired transmission ratio range of the system and the limits of the transmission ratio range of the built-in variable sub-drive are known parameters, while the structure of the coupled system and the inner transmission ratio are to be determined with the condition that the system offers the lowest possible power ratio in the branch of the variable sub-drive. This ratio is determined by ε function defined by (1). Thus the problem can be written in the following mathematical form:

$$const.: u_{pqMIN}, u_{pqMAX}, k_{0=\min}, k_{0=\max}, i_{HMIN}, i_{HMAX}, \eta_{MIN} \qquad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}(u_{pq}, i_{H\min}, i_{H\max}) \rightarrow \min$$

$$u_{pqMIN} \le u_{pq} \le u_{pqMAX}$$

$$i_{HMIN} \le i_{H\min}, i_{H\max} \le i_{HMAX}$$

$$\eta \ge \eta_{MIN}$$

5 Solution of the optimization problem and general conclusions

Assuming that the ratio range (regulability) of the variable sub-drive and the sub-drives' efficiencies are known, the objective function can be transformed into singulary function. Therefore, the optimization problem can be reduced to a nonlinear constrained-extremum problem of one variable, in which the unknown variable is the inner transmission ratio of the planetary drive (u_{pq}).

In order to determine the extremum of the objective function, that is the optimal solution, golden section search were used. To automate the optimization process a computer

program packet was developed. In addition to offering a useful aid in the design of variable coupled planetary drives, the software packet can be efficiently used in a research aiming to reveal general laws [2]. Through evaluating the results of numerous selection problems, general conclusions can be drawn, by means of which the range of coupled drives suitable for a given task can be significantly reduced. During the systematically planned research the results of several thousand selection problems revealed some generally applicable guidelines:

- In case of widening the regulability the lowest power ratio proved to be realized in by driving side coupled systems.
- In case of reducer variable sub-drive having positive transmission ratio ($i_{H\min}, i_{H\max}>1$) driving side coupled drives seen on *Fig.1.B.* proved to be optimal in most of the cases. The inner transmission ratio of the planetary drive is in the range of $u_{pq}>1$.
- In case of reducer variable sub-drive having negative transmission ratio ($i_{H\min}, i_{H\max}<-1$) driving side coupled drives seen on *Fig.1.B.* are suggestible for widening regulability. The inner transmission ratio of the planetary drive is in the range of a $0<u_{pq}<1$.
- Systems decreasing the regulability realize the lowest power ratio with driven side coupled structure. In most of the analysed problems driven side coupled systems seen on Fig.1.C. proved to be optimal.

6 References

[1] Müller,H.W.: *Die umlaufgetriebe.* Springer-Verlag Berlin, Hiedelberg 1998. p.260.

[2] L. Czégé: *Design questions of continuously variable coupled planetary gear drives*; PhD Dissertation, 2010

[3] Polder J.W.: A network theory for variable epicyclic gear trains. Greve offset N. V. Eindhoven. 1969

[4] F. Apró : *Hajtóművek gépszerkezettana.* Miskolci Egyetemi Kiadó. 1996

[5] L. Czégé: *Selection of variable coupled planetary gear drives*, MicroCAD 2010 International Scientific Conference, Miskolc, 2010 marc 18-20., 1-6. old.

Mobile Flusswasserkraftanlagen zur Energieerzeugung aus Flüssen ohne Staustufen

Karl-Heinrich Grote, Reinhardt Fietz, Mario Spiewack

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
MB Fakultät für Maschinenbau,
Universitätsplatz 2; 39106 Magdeburg
Internet: www.flussstrom.de

Inhalt: Das Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom, als Netzwerkpartner von regional ansässigen Firmen mit sich ergänzenden Kompetenzen, verfolgt das zentrale Ziel der Entwicklung und Kommerzialisierung einer zukunftsorientierten Generation von mobilen Flusswasserkraftanlagen für die Energiegewinnung aus Flüssen mit mittleren und kleinen Fließgeschwindigkeiten.

Abstract: The network technology competence "Fluss-Strom" - a partner network of regionally settled companies with complementary competences - continues along the central aim to develop and commercialize a forward-looking generation of mobile water power plants for energy extraction of rivers with low and middle flow rate.

Stichwörter: Mobile Flusswasserkraftanlagen, Gleitlager, Fließgeschwindigkeit, Wasserrad, direkt gekoppelte Generatoren

Keywords: mobile water-power plants, plain bearings, stream velocity, water wheel, direct coupled generators

1 Einleitung

Schon vor mehr als Tausend-Jahren wurde Energie aus strömendem Wasser ohne Staustufen in Form von Fluss- oder Gezeitenmühlen gewonnen. Vor dem Hintergrund der aktuellen Energiesituation wird es Zeit diese kontinuierliche, grundlastfähige und absolut umweltfreundliche Energiequelle wieder zu nutzen. Dies dachte sich eine Gruppe von vorwiegend sachsenanhaltinischen Unternehmen schon vor über zwei Jahren. Erste Berechnungen ergaben damals allerdings eine mögliche Investitionssumme pro Kilowatt Dauerleistung die nicht realisierbar erschien. Trotzdem machte man weiter und Ende 2008 setzte man sich, mit vollen Aktenordnern, neuen Erkenntnissen und Ideen wieder

zusammen. Und plötzlich scheint eine Lösung nicht durch eine einzige große Innovation, sondern durch viele einzelne innovative Bausteine realistisch umsetzbar.

Das neu geborene Netzwerk entwickelt und erprobt eine zukunftsweisende Generation von Flusswasserkraftwerken, die eine neue Form der Energiegewinnung aus Flüssen ohne Staustrecken ermöglicht. Die Netzwerkpartner zielen primär auf die Entwicklung adaptiver Produkte zur weltweiten Erschließung von Potentialen für eine nachhaltige ökonomische, dezentrale und umweltfreundliche Energiegewinnung aus Flüssen geringer und mittlerer Strömung ab.

Die derzeitigen Schwerpunkte des Netzwerkes liegen u.a. in der Forschung und Entwicklung von:

Ortsveränderliche, mobile Hightech-Flusswasserkraftwerke zur Energieerzeugung aus Flüssen ohne Staustufen,

Strömungsmechanische Energiewandlung durch innovative Turbinen- und Wasserradsysteme,

Energiewandlung durch neuartige direkt gekoppelte Generatoren,

Energieoptimale Ansteuerung und Regelung direkt gekoppelter Generatoren,

Umweltfreundliche und wartungsfreie Gleitlagerungen

Das Netzwerkmanagement des Projektes wird durch das Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie teilfinanzierten, NEMO-Projektes „Technologiekompetenz Fluss-Strom" durch die Betreibergesellschaft der Experimentellen Fabrik, die sich im Besitz der Stadt Magdeburg und der Universität Magdeburg befindet, der ZPVP Zentrum für Produkt-, Verfahrens- und Prozessinnovation GmbH begleitet und unterstützt.

2 Herausforderung bei der konstruktiven Gestaltung von Flusswasserkraftanlagen

Konventionelle Flusswasserkraftanlagen erfüllen die heutigen Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und Ökologie meist nur unzureichend oder gar nicht. Das Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom hat sich zum Ziel gesetzt diese Herausforderung anzugehen. Im Rahmen des Netzwerks werden die hochgestellten Vorrausetzungen an Flusswasserkraftanlagen durch innovative Ideen hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung erforscht und abschließend auf einem Versuchsträger realisiert. Die konstruktive

Gestaltung und Umsetzung für stationäre und mobile Flusswasserkraftanlagen muss den heutigen Schwerpunktparameter der Funktionalität, der Gewässerökologie, der Wirtschaftlichkeit, und der Gewässermorphologie gerecht werden. Jedoch ist die Konstruktion einer einzigen Flusswasserkraftanlage, welche alle Anforderungen an die Gewässertypen erfüllt, aufgrund der mannigfaltigen Eigenschaften von Flüssen nicht realisierbar. Aus diesem Grund teilt sich das Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom in drei verschiedene Realisierungsmodelle auf, die alle für sich ein anderes, an das Gewässer angepasste, Wirkprinzip aufweisen. Die Projektteile setzen sich aus, dem Realisierungsprinzip Wasserrad (Fluss-Strom TEC), das containergehauste, stationäre Wasserkraftwerk mit dem Wirkungsprinzip Turbine (ENERTAINER), sowie der schwimmenden Wasserkraftanlage mit Turbine (VECTOR), zusammen.

Laufende Projekte (Fluss-Strom TEC; VECTOR)

Im Netzwerk wurden bis jetzt, die auf dem gleichem Träger beruhenden, Realisierungsprinzipien für die schwimmenden Flusswasserkraftanlagen verfolgt (Fluss-Strom TEC, VECTOR). Gewässer mit mehr als 1,20m Tiefe können mit Propeller-Turbinen (Bild 1) ausgestattet sein, um eine möglichst große Fläche im Querschnitt zu nutzen. Für flachere Flüsse eignet sich eher eine Plattform mit einem Wasserrad (Bild 2), die eine wesentlich geringere Tauchtiefe besitzt. Je nach Standort wird zusätzliche aus den drei standardisierten Größen – small, medium and large – gewählt, um einen optimalen Leistungsbereich der Anlage zu gewährleisten.

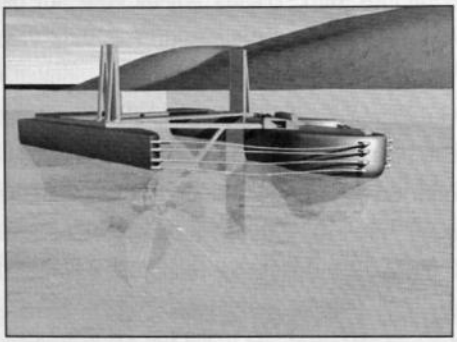


Bild 1 Mobile Flusswasserkraftanlage nach dem Realisierungsprinzip Turbine

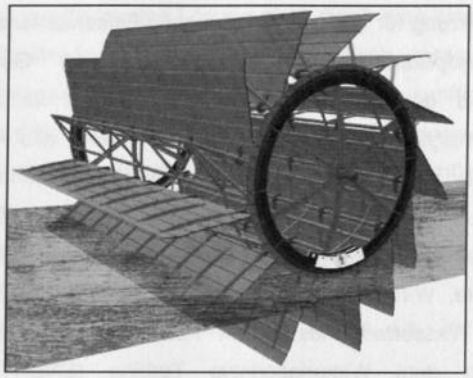


Bild 2 Mobile Flusswasserkraftanlage nach dem Realisierungsprinzip Wasserrad

An eine solche schwimmende Flusskraftanlage werden hohe technische und wirtschaftliche Anforderungen gestellt, von wechselnden Wasserständen (Hochwasser) bis hin zur ökologischen Verträglichkeit. Da eine Leistungserhöhung nur bedingt möglich ist, orientiert sich die Anwendungsforschung der Partner an der Reduzierung von Betriebs- bzw. Investitionskosten und der Verbesserung der Energieumwandlungsprozesse. Zentraler Bestandteil ist dabei ein adaptiver Produkt und Modulbaukasten, an dessen Ergebnis eine standortspezifische Wasserkraftanlage für unterschiedlichste Aufstellungsorte steht.

Die Grundlage bildet ein standardisiertes Trägersystem, das von beiden Realisierungsprinzipien genutzt wird. Dieses enthält eine auf das Prinzip angepasste Schwimmergeometrie sowie ein standardisiertes Rechen- und Verankerungssystem. Das Realisierungsprinzip Rad besteht aus einem segmentierten und patentierten Klappschaufel-Wasserradsystem mit hoher Eintauchtiefe zur Leistungsmaximierung. Im Hinblick auf das Gewicht, bestehen die Energiewandler aus Leichtbaumaterialien wie GfK / CFK, dass eine hohe Schlagzähigkeit auch bei geringen Temperaturen für eine Betriebsdauer von mehr als 10 Jahren aufweisen. Aufgrund der ökologischen Anforderungen werden die Anlagen mit einer neuen umweltfreundlichen, wartungsfreien Teflon-Polyamid-Gleitlagerung gelagert, dass die bisherigen ölgeschmierten Pendelrollenlager ersetzen. Sowohl die Variante Rad als auch die Variante Strömungsturbine werden mit einem integrierten, direkt gekoppelten Generator für kleine Leistungen ausgestattet. Um das Wirkungsgradverhalten des Generators im

Teillastbereich zu verbessern wird dieser mit einer Maximalpunktsteuerung geregelt. Herkömmlichen Anlagen bedienen sich für die Regelung eines Getriebes, das die Drehzahl relativ konstant hält. Auf dieses wird jedoch verzichtet, so dass Kosten sowie Wirkungsgradverluste bei der Kraftübertragung an der Welle reduziert werden. Bei dem Realisierungskonzept Wasserrad erfolgt die direkte Stromerzeugung über einen induktiv wirkenden Magnet-Segmentkranz-Generator.

Allgemeine Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage resultiert im Wesentlichen aus zwei Faktoren. Zum einen durch die erzielte Leistung (Ertrag) und zum anderen durch die Kosten (Investitions- und Unterhaltungskosten, Amortisationszeit etc.) Um den ersten Faktor, das Leistungsvermögen neuartiger Flusswasserkraftanlagen abzuschätzen, wird das BETZ'sche Gesetz herangezogen. Diese, aus der Windkraft stammende Gleichung ist durch den Parameter der Dichte auf viele weitere Stoffströme übertragbar, so auch auf die Strömungsenergie. In dem Gesetz gehen die Dichte des Wassers und die vom Wasser angeströmte Rotorfläche ein. Die Fließgeschwindigkeit und der Effektivitätsfaktor vervollständigen die Gesetzmäßigkeit. Albert Betz errechnete einen theoretischen Effektivitätsfaktor von 16/27, was etwa 59% entspricht.

Fließgewässer weisen in Regel mittlere Fließgeschwindigkeit zwischen 1.0 und 3.0m/s. Daraus resultieren für schwimmende Wasserkraftlage ein Leistungsbereich zwischen einigen 100W/m² bis hin zu max. 8kW/10m² theoretischer Leistung. Fließgeschwindigkeitserhöhungen, beispielsweise durch eine Kanalisierung des zuströmenden Wassers nach dem Wirkungsprinzip von Venturi werden derzeit betrachtet und auf ihre Machbarkeit untersucht. Erste Schätzungen durch Techniker des Netzwerkes gehen von einer maximalen Erhöhung zwischen 5.0 und 15.0% durch geeignete trichterförmige Einlauf und Auslaufgeometrie aus. Da die Fließgeschwindigkeit mit der dritten Potenz eingeht, sind deutliche Leistungssteigerungen zu erwarten.

Mit der Kopplung mehrere Anlagen in Reihe oder Parallel des Fließquerschnitts sind Leistungen je nach Standortbedingungen von mehr als 200kW möglich. Entsprechend sinken dadurch Investitionskosten für die Befestigungen sowie die Einspeisung in ein örtliches Stromnetz. Lediglich sollte auf einen Mindestabstand geachtet werden damit ein Geschwindigkeitsausgleich im Fluss bis zum nachfolgenden Turbineneinlauf erfolgen kann. sDie maximale Leistung eines Flusskraftwerks hängt von dem jeweiligen Standort

ab. In Westeuropa wird die Kapazität einer Anlage nicht die 1.0 MW überschreiten, jedoch liegen weltweite Potentiale für über 1.0 MW vor.

Prototypenumsetzung und Test im Realbetrieb

Im Mai 2010 ging die erste Pilotanlage in den Anwendungstest auf der Elbe. Bis Ende 2010 werden die Prototypen mit den Realisierungsprinzipien Wasserrad und Strömungs-Turbine am Test- und Referenzstandort an der Elbe installiert.

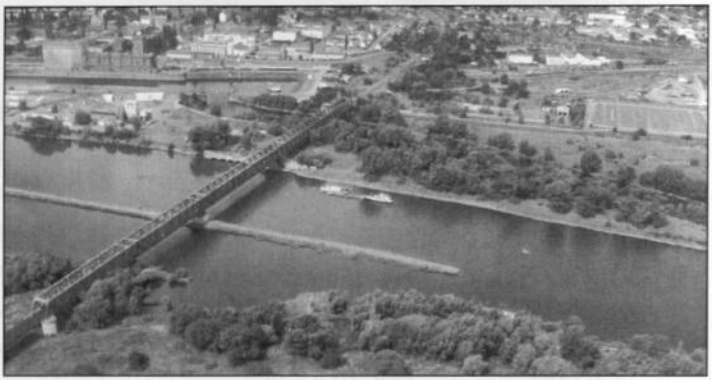


Bild 3: Standort für die Prototypentests an der Elbe bei Magdeburg

Nach dem umfangreichen Realtest werden die Erfahrungen und Ergebnisse in die Serienproduktion überführt. Gegen Ende 2011 sollen serienreife Systeme zur Verfügung stehen.

Literatur

[1] Statistisches Bundesamt. *Energie in Deutschland.* Wiesbaden, Hessen : s.n., September 2006; 2009.

[2] Surek, Prof. Dr.-Ing. Dominik. Einsatzbereiche von mobilen Flusswasserkraftwerken. *Wasser & Energie.* April 2009, pp. 2-19.

[3] Pinneberger Ingenieur bringt *die Wasserräder zurück.* Möhl, Sönke. 26. April 2010, Berlin : Axel Springer AG, 2010.

Wasserkraft für geringe Fallhöhen und ihr wirtschaftliches Potential

Jana Hadler, Klaus Brökel

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

Inhalt: *Das Wachstum der Kleinwasserkraft im Europäischen Markt hat unterschiedlichen Studien zufolge in den letzten Jahren nur einen minimalen Aufschwung erfahren. Trotz der zur Neige gehenden fossilen Energievorräte und der damit verbundenen Umorientierung auf alternative Energieformen, hat sie es ungeachtet möglicher Klima- und Umweltgefahren nicht geschafft, einen soliden Platz zu erreichen. Zahlreiche, von der EU unterstützte Projekte, die Nutzung von Kleinwasserkraft betreffend, werden in naher Zukunft beendet sein und erste Ergebnisse präsentieren. Bisher hauptsächlich eingeschränkt auf technische und ökologische Untersuchungen ist es dringend erforderlich, auch die kostenseitige Entwicklung von Kleinwasserkraftanlagen zu betrachten.*

Abstract: *In Europe, the development of small hydropower for very low head differences is a nearly unexploited resource. Most of the existing potential remains unused. There are several projects, funded by the European Commission or other organisations, which will deliver first results in the near future. However, mostly applied on technical and ecological studies. Small hydropower is not an entirely new research topic, but of undeniable importance in view of declining natural resources. A significant aspect to get the holistic view is the cost-benefit analysis.*

Stichwörter: *Kleinwasserkraft, geringe Fallhöhen, Kosten-Nutzen-Analyse, EU Projekt.*

Keywords: *Small hydropower, low head differences, cost-benefit analysis, EU-Project.*

1 Einleitung

Wasserkraftanlagen nach ihrem nutzbaren Potential, vor allem im Bereich bis 1 MW, zu unterteilen, ist nicht eindeutig geregelt. Mini-, Mikro- und Pico-Wasserkraft sollen Areale bis 10 MW abdecken – die Grenzen jedoch verschwimmen. 70% des weltweit vorhandenen Wasserkraftpotentials wartet auf seine Nutzung. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um Klein- oder Großwasserkraft handelt – wichtig allein ist, dass und wie dieses Potential genutzt wird. Da sich nicht alle Flüsse oder Seen stauen oder anderweitig für die Potentialnutzung umgestalten lassen, ist der Schritt in Richtung mobile Wasserkraftanla-

gen wichtig. Selbst Leistungen im einstelligen kW-Bereich entlasten die Vorkommen der fossilen Energieträger und können rein kostentechnisch betrachtet über Jahre günstig sein. Wann hat sich eine solche Anlage amortisiert? Auch zur Rentabilität lassen sich schwer Vorhersagen treffen, da über einen langen Zeitraum zu viele verschiedene Einflussfaktoren, die nicht in vollem Umfang abzuschätzen sind, eine entscheidende Rolle spielen. Im Forschungsprojekt HYLOW wird der Begriff „Kleinwasserkraft" verwendet; der zu untersuchende Bereich wird nicht mehr als 5 kW abdecken. Das Teilprojekt, welches sich mit der Entwicklung eines freischwimmenden Energiekonverters befasst, wurde bereits auf dem Konstruktionskolloquium in Aachen 2008 diskutiert. [1]

2 Übersicht zum Projektstand

In dieses Projekt sind immer wieder neue Ideen eingeflossen. Untersuchungen an verschiedenen Standorten, mit unterschiedlichen Objekten und Techniken ließen keinen stringenten Weg der Lösungsfindung zu. In der Informationssenke mussten zusammenlaufende Fäden entwirrt, Ideen im CAD-Programm verständlich und vor allem korrekt umgesetzt werden. Beim Design und im nachfolgenden Bau eines Large Scale Models (LSM) des Energiekonverters wurde auf einfache Geometrien und Materialien Wert gelegt. Von großer Bedeutung für die Versuche, die mit dem LSM durchgeführt werden sollen, sind die Begehbarkeit des Modells und das Arbeiten auf diesem.

2.1 Design

Die Grobgeometrie ist vorgegeben; die prinzipielle Form der Kulisse sowie die Anordnung und Maße der Schaufeln sind aus den zahlreichen Versuchen hervorgegangen. Entstanden ist ein CAD-Modell, wie im Bild 1 zu sehen, mit 7600 mm Länge, 2400 mm Breite und 3500 mm Höhe. Zu dem Modell gehören winklige (45° und 90°) Separatoren, die die Umströmung der kompletten Anlage beeinflussen. Unter beiden Wellenenden sind Plattformen installiert, die, sofern nicht benötigt, hochgeklappt werden können und dann zum Schutz der Anlage dienen. Die Messung der auftretenden Kräfte wird im Versuchsstadium über drei Lastzellen, die unterhalb der Bremszange eines Scheibenbremsensystems installiert sind, realisiert (rechts im Bild 1).

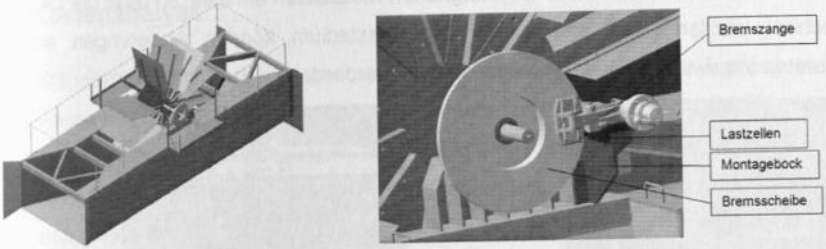


Bild 1: Das modellierte LSM in CATIA V5 (links) und das Modell der Lastabnahme (rechts)

2.2 Bau des großmaßstäblichen Modells

Ein im Projekt involviertes Stahlbauunternehmen hat das LSM gebaut. Die Baugruppe Wasserrad (bestehend aus Welle und 12 ebenen Schaufeln inklusive Verbindungselementen) mit seiner aus Versuchen ermittelten optimalen Eintauchtiefe wurde zuerst gebaut. Die Pontons, welche über eine Bodenplatte miteinander verbunden sind, folgten im Anschluss. Wichtig ist, dass jeder Schwimmkörper in Sektionen unterteilt ist, die erstens für weitere Stabilität sorgen und zweitens die Ballastierung sowie die Unterbringung der Messtechnik und somit notwendigen externen Stromversorgung sicherstellen.

3 Versuche

Der Ablauf und die Reihenfolge der Versuche werden durch mehrere Faktoren bestimmt:
Einholung behördlicher Genehmigungen für die Ausbringung und Durchführung der Versuche in den ausgewählten Gewässern
Baufortschritt des LSM
Beachtung der Witterung zu einer bestimmten Zeit in der Versuchsregion
Innerhalb der Projektdauer sind drei Freilandversuche mit dem LSM vorgesehen.

3.1 Zugversuche auf dem Rostocker Breitling

Zur Testung des Schwimmverhaltens der Wasserkraftanlage werden Zugversuche durchgeführt (siehe Bild 2). Das LSM wird über eine Seilwinde mit einer definierten Geschwindigkeit gezogen. Dabei wird das Wasserrad auf 10 min^{-1} gebremst, da Vorversuche zeigten, dass bei dieser Drehzahl die größeren Leistungen erreicht werden. Die

vertikalen Lasten werden mittels der integrierten Messzellen ermittelt, so dass die Leistung berechnet werden kann. In diesem Versuchsstadium können Änderungen an der Geometrie in gewissem Umfang vorgenommen werden.

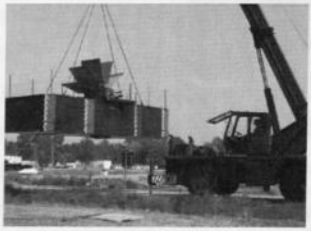


Bild 2: Versuche mit dem bidirektionalen Modell vor dem Rostocker Marinestützpunkt auf dem Breitling [Quelle: Fachgebiet Küstenwasserbau der Universität Rostock]

3.2 Tideversuche an der Ems

Bei der Installation in der Ems wird das LSM von Wellen geschützt direkt hinter dem Emssperrwerk ausgebracht (siehe Bild 3). Getestet wird das Verhalten der Anlage unter Tideeinfluss und Schiffsverkehr.

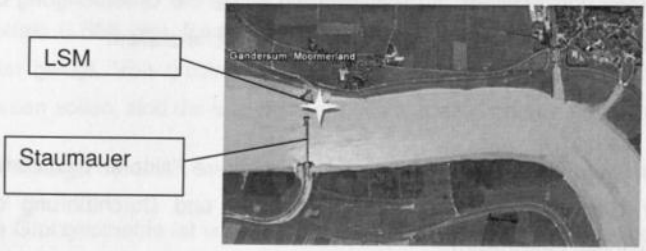


Bild 3: Übersicht zum Standort an der Ems [Quelle: Google Earth]

3.3 Feste Installation des LSM in einem Flora-Fauna-Habitat

Der letzte Teststandort befindet sich südwestlich von Rostock in einem geschützten Gebiet in der Warnow. Die Wassertiefe beträgt an der Ausbringungsstelle nur 1,4 m und stellt damit eine große Herausforderung für das Einsetzen des LSM und die Versuchsreihe dar. Durch die im Jahresdurchschnitt relativ niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten beschränkt sich die Analyse dort auf die Wintermonate – die Zeit der größten Abflüsse mit zu erwartenden Geschwindigkeiten von 1 m/s.

4 Kostenanalyse

Der Standort Deutschland – insbesondere der Norden – ist für die Testung mobiler Kleinwasserkraftanlagen nahezu ideal, da Gebiete mit verschiedenen Bedingungen in unmittelbarer Nähe zueinander liegen. Der Erfolg einer Forschungsarbeit wird aber nicht nur von der Entwicklung eines funktionierenden Objektes, sondern auch von einer vielversprechenden Vermarktung bestimmt. Dazu bedarf es neben den Nachweisen zu Wirkungsweise und Effizienz einer genauen Kostenanalyse.

4.1 Übersicht zu entstandenen Kosten

Insgesamt wurden für das LSM in der Bauphase *1386* Arbeitsstunden mit Stundensätzen zwischen 14 und 70 € pro Stunde aufgewendet. Diese breite Streuung ist mit dem Grad der Ausbildung und der Berufserfahrung der Arbeiter zu erklären. Es ergeben sich direkte Personalkosten in Höhe von *30.491 €*. Des Weiteren entstanden direkte Kosten in Höhe von *24.750 €*, die sich u.a. aus den Kosten für Bau-, Verbrauchs- und Zusatzmaterial, Farbe sowie aus Kosten für Norm- und Kleinteile zusammensetzen. Aufsummiert zu *55.241 €* lässt sich noch keine konkrete Kostenbetrachtung führen, da die indirekten Kosten, wie Kosten für Gebäude, allgemein benötigte Maschinen, Kosten für Energieversorgung, Versicherungen, Telefon, Verwaltung usw., noch mit einzubeziehen sind. Diese können hier mit 20 % der totalen direkten Kosten zu *11.048 €* angesetzt werden. Damit ergibt sich zunächst eine Gesamtsumme von *66.289 €*, die dem LSM ohne Berücksichtigung der Forschungszeit und – gelder zugerechnet werden kann. Zu bemerken ist ebenfalls, dass eine Lösung zur Lastabnahme mit anschließender Netzeinspeisung noch nicht realisiert wurde. Die folgende Betrachtung zur Kostengestaltung ist daher fiktiv.

4.2 Grobe Kostenabschätzung bei Netzeinspeisung

Die elektrische Energie E_{el} wird aus dem Produkt der zu erwartenden mittleren Leistung P_m und der jährlichen Abnahmezeit gebildet. Damit ergibt sich die im Jahr erzeugte elektrische Energie für 1 kW mittlere Leistung zu 8.760 kWh. Laut Einspeisevergütung des EEG (Erneuerbare-Energie-Gesetz) werden für Strom aus Wasserkraft 20 Jahre lang bis 500 kW 12,67 ct pro kW vergütet. Da für das LSM noch keine konkreten Leistungswerte vorliegen, werden diese beispielhaft angenommen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Grobe Kostenabschätzung

P_m [kW]	Jährliche Abnahmezeit [h]	E_{el} [kWh]	Baukosten LSM [€]	Vergütung auf 20 Jahre [€]	Vergütung abzgl. Baukosten
1	8760	8760	66.289	22200	-44089
2	8760	17520	66.289	44400	-21889
3	8760	26280	66.289	66600	+311
4	8760	35040	66.289	88800	+22511
5	8760	43800	66.289	111000	+44711

Bei einer kontinuierlichen Leistungsabnahme von 3 kW würde die Anlage nach 20 Jahren wartungs- und verschleißfreiem Betrieb beginnen sich zu amortisieren. Außer Betracht gelassen werden außerdem eventuell anfallende Pachtkosten für das genutzte Gewässer, Versicherungen, Eigenstrombedarf, je nach Standort andere existente Gemeinkosten, Kosten der Inflation u.a. Diese grobe Kostenabschätzung gibt einen Überblick, welche Leistungen generell anzustreben sind.

5 Wachstumspotentiale der Kleinwasserkraft

Da der Einsatz mobiler Wasserkraftanlagen abgesehen von optischen kaum größere Spuren in der Natur hinterlässt, sollte sich mit der Nutzung dieses Potentials weiter befasst werden. Momentan scheint die Forschung immer wieder an ihre Grenzen zu stoßen, Kalkulationen pro oder wider Investition gehen nicht auf, da, wie eingangs schon erwähnt, viele Einflussfaktoren und Randbedingungen (noch) nicht zu überblicken sind. Doch es sind Forscher und potentielle Interessenten am Werk, die die mobile Wasserkraft für geringe Potentiale nicht unberücksichtigt lassen. Mit einer Geometrie- und Technologieverbesserung, der Senkung der Stückkosten durch z.B. Serienproduktion und der Überzeugung potentieller Investoren gelänge es, diesem Markt diese Zukunft zu geben.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

Literatur

[1] Hadler, Jana; Brökel, Klaus: *Wasserkraft – Ein konstruktiver Blick in die Zukunft.* 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008, Aachen - ISBN 978-3-8322-7544-0

Toleranzmanagement in der Produktentwicklung

Roland Leuschel, Bertram Hentschel[1)]

Tolerance & me
Einsteinstr. 32, 81675 München
Email: Roland@Leuschel.com; Internet: http://www.toleranzmanagement.de

[1)]Technische Universität - Bergakademie Freiberg
Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigungstechnik
Agricolastr. 1, 09596 Freiberg
Email: Bertram.Hentschel@imkf.tu-freiberg.de; Internet: http://tu-freiberg.de

Inhalt: *Toleranzmanagement bildet die Brücke zwischen den Anforderungen an die Produktqualität und ihrer stimmigen Umsetzung entlang der Prozesskette. Es bezweckt die Reduktion von - sonst entstandenen - Qualitätsverlusten, Blindleistungen und Toleranzkosten - nicht nur einzelner Merkmale, sondern des Gesamtsystems. Hinter der Methodik der Toleranzauslegung und -bestätigung steht die rekursive Determinierung aller Tätigkeiten, ausgehend von einem toleranzgerechten Gesamtkonzept auf die abweichungsverursachenden Baugruppen auf Grundlage simultan erarbeiteter Kunden-Lieferanten-Vereinbarungen. Die Methode der Konzeptfindung und der Toleranzverteilung wird an Beispielen aus der Automobilindustrie (Karosserie und Fahrwerk) mittels der Toleranz-Organisations-Matrix dargestellt.*

Abstract: *Tolerance management connects the requirements of the product quality an their coherent realisation along the process chain. Target is the reduction of decline in quality as well as costs of tolerance. The methode of tolerance allocation and confirmation follows a backward determination of all actions, starting with a tolerance capable concept, devided in all relevant influences, finishing in customer-supplier-agreements. The methode will be demonstrated by examples of the automotive industrie (body in white and chassis) by using a tolerance-organisation-matrix.*

Stichwörter: *Toleranzmanagement, Abweichungsanalyse, rekursive Determinierung, Referenzsysteme, Statische Bestimmtheit, Kunden-Lieferanten-Vereinbarungen .*

Keywords: *tolerance management, deviation analysis, recursive determination, reference-point-system, statical determinacy, customer-supplier-agreement.*

1 Einleitung

Zahlreiche Technologieunternehmen haben es sich zur Aufgabe gemacht, Toleranzen in allen Phasen und Bereichen der Produktentwicklung praktikabel und wirkungsvoll zu „managen". Während in der herkömmlichen Produktentwicklung die Toleranzen explizit der Detaillierungsphase zugeordnet wurden, erstreckt sich seine synchronisierte Umsetzung heute auf alle Phasen des Produktentstehungsprozesses:

- von der Konzeptplanung und Serienentwicklung (Auslegung),
- über die Produkterprobung und Prozessvorläufer (Plausibilisierung),
- über den Serienanlauf hinaus in den Serienbetrieb hinein (Bestätigung).

Toleranzen *vereinen* die Anforderungen an die Produktqualität mit ihrer stimmigen Umsetzung entlang der Prozesskette und begründen daraus die Grenzen für zulässige Abweichungen. Sie sind optimal gewählt, wenn sie ein hohes Maß an Spielraum für die Prozessgestaltung - „so weit wie möglich" und gleichzeitig ein geringes Maß an Beeinträchtigung der Produktwertigkeit - „so eng wie nötig" gewährleisten.

2 Toleranzanalyse und -synthese

Die zur Analyse und Synthese von Toleranzen eingesetzten Methoden verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen. Üblicherweise versteht man unter Toleranzanalyse die Beurteilung der Auswirkungen von fertigungsbedingten Toleranzen einzelner Baugruppen auf die Funktionen des Gesamtsystems. Bei der Toleranzsynthese wird ausgehend von der Zielfunktion, auf die Ermittlung geeigneter Fertigungstoleranzen (im engeren Sinne) und auf die Festlegung geeigneter Gesamtkonzepte (im weiteren Sinne) abgestellt.

Hinter der Methodik der Toleranzauslegung und -bestätigung steht die rekursive Determinierung aller toleranzsichernder Tätigkeiten, ausgehend von einem toleranzgerechten Gesamtkonzept hin zu den abweichungsverursachenden Baugruppen auf Grundlage simultan erarbeiteter Kunden-Lieferanten-Vereinbarungen.

Um ein komplexes System, wie ein Automobil entwickeln zu können ist es notwendig das Gesamtfahrzeug in seine Untersysteme: Karosseriestruktur, Türen und Klappen, Elektrik und Aggregate, Ausstattung im Interieur und Exterieur, sowie Antrieb und Fahrwerk aufzugliedern. Aus Toleranzsicht ist es zweckmäßig, die weitere Untergliederung der Komponenten in Anlehnung an deren sequentielle Zusammenbaufolge vorzunehmen. Einer der Gründe hierfür ist die Entstehung von Abweichungen längs der Prozesskette und ihre ursächliche Beherrschung.

Üblicherweise beginnt die Tolerierung von Qualitätsmerkmalen (wie z.B. der spurtreue Geradeauslauf eines Fahrzeuges oder das äussere Erscheinmungsbild geprägt von harmonischen Fugenverläufen) mit der Festlegung der Schließmaße. Der Weg zu toleranzgerechten Produkten und Prozessen gliedert sich dann in zwei Aspekte: in die „Desensibilisierung" toleranzrelevanter Qualitätsmerkmale und in die Reduktion von Toleranzbeeinträchtigungen. Hierher gehören insbesondere durchgängige, funktionsnahe und robuste Referenzierungen der Baugruppen. Die Wahl geeigneter Referenzsysteme ist maßgeblich für die Güte der daraus resultierenden Toleranzkonzepte. Unbeabsichtigte Fälle der statischen Unter- und Überbestimmtheit sind in der Praxis immer wieder anzutreffen; sie sind eine häufige Ursache von Toleranzproblemen. Es sind nicht nur die Abweichungen der Einzelteile, es sind vielmehr ihre Auswirkungen auf die Gesamtfunktion, die die Güte des Toleranzkonzeptes ausmachen.

Das Ziel, eines stimmigen und nachgewiesenen Toleranzkonzeptes erfordert:

- klare Spezifikationen der Merkmale hinsichtlich geringer Qualitätsverluste,
- statisch bestimmte, robuste und funktionsnahe Zusammenbaukonzepte,
- realisierbare Bauteilqualität, hinsichtlich vertretbarer Toleranzkosten,
- die Berücksichtigung von kritischen Veränderungen.

Oktruierten von einigen Jahren noch die Entwickler bei der Toleranzauslegung mitunter „Angsttoleranzen", reagieren gegenwärtig einige Lieferanten im Hinblick auf deren Einhaltung „gemessen an Prozessfähigkeitswerten" in gegenteiliger Weise. Insofern wird vorgeschlagen der Toleranzauslegung stets die Abweichungsanalyse gegenüberzustellen.

3 Methodisches Vorgehen

In Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie wurde eine programmunterstützte Methode für die Umsetzung des Toleranzmanagements entwickelt, welche die Bereiche Entwicklung, Fertigung, Montage und Qualität in gemeinsame Verantwortung bringt. Dabei gilt es, den Iterationsprozess der Lösungsfindung in verschiedenen Detaillierungsstufen mit wenigen Schleifen und im Streben nach kurzen Entwicklungszeiten zu durchlaufen. Die im Rahmen einer Promotionsarbeit [5] entwickelte Toleranz-Organisations-Matrix unterstützt die Umsetzung des Toleranzmanagements mit Zuständigkeiten, Terminen, Status, Eskalationsscenarien - ebenso wie die Lösungsfindung und Maßnahmenverfolgung mit dem Ergebnis dokumentierter Toleranzketten sowie Maßkatologe. Das Vorgehen wird an zwei Beispielen (Karosserie, Fahrwerk) demonstriert.

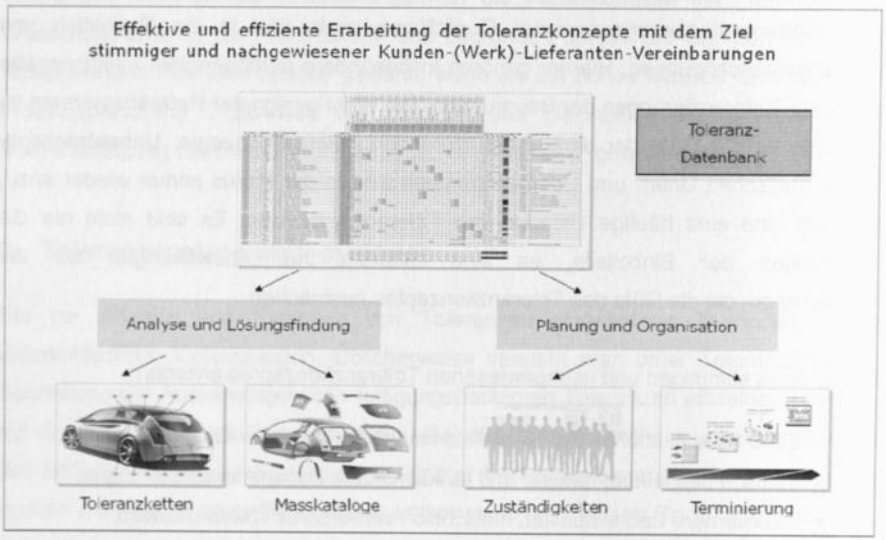


Bild 1: Übersicht der Toleranz-Organisations-Matrix

Kernstück der Toleranz-Organisationsmatrix (Bild 1) ist ein Algorithmus zur Verknüpfung aller an einer Maßkette beteiligten Baugruppen über die Fügeoperationen und eine automatisierte Verteilung der Einzeltoleranzen, in Gegenüberstellung zu tatsächlich realisierbaren Abweichungen, durch:

- rekursive Herleitung – Produktspezifikation – Montagekonzepte – Teilequalität,
- mit Optimierung der Wirkzusammenhänge: Bauteil – Operation – Bauteil – ...,
- die schliesslich in Kunden – Werk – Lieferanten – Vereinbarungen münden.

Durch die objektbezogene Zuordnung der unmittelbaren Abweichungsträger (Objekt – Operation - Objekt) können Ursache-Wirkung-Beziehungen mittels dieser Systematik beliebig detailliert – günstigerweise aber auf den Anlieferzustand der jeweiligen Baugruppe und auf seine Einbausituation bezogen werden.

Nutzen der vorgeschlagenen Methodik:

- Strukturierung aller Toleranzanforderungen und Gegebenheiten, mit Verantwortlichkeiten, Terminen, Überwachung und Maßnahmenverfolgung.
- Funktionsorientierte Spezifikation der geometrischen Anforderungen und die Definition charakteristischer Messpunkte in den Baugruppen.
- Festlegung und Variation der Toleranzkonzepte unmittelbar in Maßkatalogen, mit automatisierter Toleranzberechnung in unterschiedlichen Detailierungsebenen.
- Visualisierung der Konzepte und die Redundanzfreiheit von Toleranzinformationen sowie die permanente Rückkopplung der Ergebnisse im Status.

Ein stimmiges und nachgewiesenes Toleranzkonzept ist mehr als die Summe von singulären Lösungen. Ein gesamthaftes Toleranzkonzept entsteht in schrittweiser Erstellung und Verbesserung mit kontinuierlicher Verifizierung seiner Inhalte:

- hierarchisch gegliedert in Strategien, Konzepte, Parameter
- und differenziert in Module, Bauteile, Geometrieelemente

Toleranzstrategien zielen auf die Erreichung eines gesamthaft ausgewogenen und hochwertigen Toleranzkonzeptes ab. Das Ziel ist Reduktion von Beeinträchtigungen aufgrund geometrischer Abweichungen insbesondere durch die Wahl geeigneter Referenzsysteme, korreliert mit den priorisierten und gewichteten Qualitätsmerkmalen. Die

Bestimmung der Parameter erfolgt schließlich durch Variation der Akzeptanzgrenzen (Toleranzen) und der Beeinträchtigungen (Abweichungen) und der Wirtschaftlichkeit.

4 Zusammenfassung

Toleranzmanagement bezweckt die Reduktion von - sonst entstandenen - Qualitätsverlusten, Blindleistungen und Toleranzkosten - nicht nur einzelner Merkmale, sondern des Gesamtsystems - im weiteren Sinne auch der gesamten Produktpalette. Toleranzmanagement dient bei zunehmend begrenzteren Budgets und verkürzten Entwicklungszyklen dem Bestreben: „vom Prototypen prozesssicher zum Kunden". Ebenso ist es ein Baustein zur Sicherstellung, der in zahlreichen Unternehmen formulierten „Produkt und Prozessführerschaft". Die Wirksamkeit des Toleranzmanagements wird, im Sinne einer präventiven Qualitätssicherung durch das frühzeitige Erkennen und Lösen von Toleranzproblemen bestimmt. Verfahren der Toleranzsynthese sollten daher nicht nur im Hinblick auf Genauigkeit, sondern vielmehr durch Klarheit überzeugen.

Literatur

[1] Praun von S.; Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess; Dissertation am IWB der TU München, Herbert Utz Verlag, Haag; 2001; ISBN 3-8316-0202-6

[2] Mannewitz F.; Komplexe Toleranzanalysen einfach durchführen; Fachzeitschrift Konstruktion 7/8, Springer-VDI-Verlag; 2004

[3] Germer C.; Interdisziplinäres Toleranzmanagement; Dissertation - Bericht des Institutes für Konstruktionstechnik Nr. 68, Logos Verlag, Berlin; 2005; ISBN 3-8325-0954-2

[4] Bohn M.; Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess - Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien; Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe; 1998

[5] Leuschel R.; .; Toleranzmanagement in der Produktentwicklung - am Beispiel von Karosserien im Automobil; Dissertation an der Technischen Universität - Bergakademie Freiberg; 2010

Anforderungen an eine Methode zur Bewertung innovativer Produktideen aus wissenschaftlicher und unternehmerischer Sichtweise

Mathias Messerle, Hansgeorg Binz, Daniel Roth

Universität Stuttgart

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart

Email: mathias.messerle@iktd.uni-stuttgart.de; Internet: http://www.iktd.uni-stuttgart.de

Inhalt: *Um eine grundlegende Analyse von Bewertungsmethoden für innovative Produktideen zu ermöglichen, ist es erforderlich, die Anforderungen an derartige Verfahren zu kennen. Dieser Beitrag fasst einerseits die Anforderungen aus wissenschaftlicher Sicht zusammen, indem die zentralen Aspekte, die der relevanten Literatur zu entnehmen sind, analysiert und in verschiedene Themengebiete eingeordnet werden. Gleichzeitig beschreibt der Beitrag Anforderungen, die aus Unternehmenssicht an derartige Bewertungsverfahren gestellt werden. Hierzu werden die Ergebnisse einer Umfrage analysiert. In einem weiteren Schritt werden wissenschaftliche und unternehmerische Anforderungen verglichen. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf das weitere Vorgehen im Forschungsvorhaben.*

Abstract: *To be able to analyse evaluation methods for innovative product ideas fundamentally, it is necessary to know the requirements on these methods. This paper summarises on the one hand the requirements from an academic point of view. Therefore, the most important aspects that can be found in the relevant literature are analysed and classified. On the other hand, requirements from the companies' point of view are regarded within this paper. For this purpose, the results of a survey among several companies are regarded. In a further step, these two groups of requirements are compared to each other. The paper concludes with an outlook to the further procedure within the research project.*

Stichwörter: *Bewertungsmethode, Produktidee, Produkt, Innovation, Anforderungen*

Keywords: *Evaluation method, Product idea, Product, Innovation, Requirements*

1 Einleitung

Mit steigender Konkurrenz und verstärkten Preiskämpfen auf Absatzmärkten gewinnen Innovationen für Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Um innovative Produkte zu entwickeln, sind zu Beginn des Entwicklungsprozesses zunächst zahlreiche Produktideen erforderlich. Im Laufe des Entwicklungsprozesses muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, welche Produktideen weiterverfolgt und welche stattdessen verworfen

werden. Eine Möglichkeit, solch komplexen Entscheidungssituationen zu begegnen, ist die Verwendung von Bewertungsmethoden, mit deren Hilfe Produktideen eingehend beleuchtet und bewertet werden können [1, 3, 4, 5, 8].

Ziel dieses Beitrags ist es, eine fundierte und grundlegende Übersicht über Anforderungen an Methoden zur Bewertung innovativer Produktideen darzulegen. Dabei wird auf verschiedene Aspekte und Perspektiven eines Bewertungsprozesses eingegangen. Zur Erarbeitung der im Folgenden dargestellten Anforderungen aus wissenschaftlicher Sicht wurde eine nationale und internationale Literaturrecherche durchgeführt. Gleichzeitig beschreibt der Beitrag Anforderungen, die aus Unternehmenssicht an derartige Bewertungsverfahren gestellt werden. Hierzu werden die Ergebnisse einer Umfrage analysiert, die in Form eines Interviews mit zahlreichen Unternehmen durchgeführt wurde.

2 Ergebnisse der Literaturrecherche

Die Recherche nach Anforderungen an eine Methode zur Bewertung innovativer Produktideen brachte eine Vielzahl an Forderungen, die aus Gründen der Übersichtlichkeit verschiedenen Themenbereichen zugeordnet werden.

2.1 Bewertungskriterien

Um eine Bewertung von Produktideen durchführen zu können, müssen in einem ersten Schritt die Bewertungskriterien festgelegt werden, anhand derer die Bewertung erfolgen soll. Um Bewertungskriterien formulieren zu können, die eine Auswahl Erfolg versprechender Produktideen ermöglichen, wurden von Messerle [7] die Ergebnisse der Forschung nach Erfolgsfaktoren neuer Produkte zusammengefasst. Hierbei wurden vor allem die Faktoren, die als Kriterien Eingang in eine Bewertungsmethode finden können, untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die folgenden vier Aspekte für die Formulierung der Bewertungskriterien berücksichtigt werden müssen: Kundenanforderungen, Produktvorteile, marktbezogene Faktoren und Synergieeffekte. Neben diesen Kriterien, die die Erfolgsfaktoren neuer Produkte berücksichtigen, müssen selbstverständlich weitere Faktoren beachtet werden, die zum Ausschluss einer Produktidee im Laufe einer Bewertung führen könnten wie beispielsweise die Realisierbarkeit einer Idee, die Übereinstimmung mit gesetzlichen Rahmenbedingungen oder die Sicherung von Schutzrechten [7, 9].

Neben dem Inhalt sind auch die Eigenschaften der Bewertungskriterien von Bedeutung. Um eine möglichst objektive und rationale Bewertung durchführen zu können, sind systematische Bewertungskriterien erforderlich. Die Bewertungskriterien dürfen sich dabei nicht überschneiden. Eine Überschneidung hätte zur Folge, dass derselbe Bewertungsaspekt über verschiedene Kriterien mehrfach in das Verfahren einbezogen wird. Eine präzise Formulierung der Kriterien ist jedoch nur möglich, wenn Bewertungskriterien individuell definiert oder angepasst werden können. Starre, nicht veränderliche Kriterien sind nicht zielführend und verhindern eine realitätsnahe Abbildung der aktuellen Bewertungssituation im Bewertungsmodell. Des Weiteren müssen Kriterien an den Innovationstyp einer zu bewertenden Produktidee angepasst werden. Liegt beispielsweise eine Produktidee mit einem sehr hohen Neuheitsgrad vor, ist sowohl die Auswahl der Bewertungskriterien, als auch ihre Gewichtung im Vergleich zu Produktideen mit anderen Eigenschaften zu verändern. Vor Beginn einer Bewertung müssen die Kriterien jedoch präzise und eindeutig festgelegt werden, um Änderungen während der Bewertung zu vermeiden [1, 7, 9].

Da zum Zeitpunkt einer Bewertung innovativer Produktideen in der Regel noch keine eindeutig quantifizierbaren Bewertungsgrößen vorliegen, müssen sowohl quantitative als auch qualitative Bewertungskriterien im Verfahren verwendet werden können [1, 9].

2.2 Integration und Vorgehensweise

An die Vorgehensweise werden bei der Bewertung innovativer Produktideen zahlreiche Anforderungen gestellt. Es ergeben sich Anforderungen an die Einführung des Verfahrens und an den Ablauf der Bewertung.

Um die Bewertungsmethode in die Unternehmensstruktur zu integrieren, muss das Vorgehen möglichst einfach und flexibel an die jeweils unternehmens- und einsatzfallabhängige Problemstellung angepasst werden können oder eine Vorgehensweise aufweisen, die möglichst problemlos in vielen verschiedenen Bewertungs- oder Entscheidungssituationen angewendet werden kann [4, 5, 6, 9].

Darüber hinaus muss auf eine einfache Erlernbarkeit für Anwender geachtet werden. Um Schwierigkeiten bei der Einarbeitung zu vermeiden und die dafür benötigte Zeit zu minimieren, ist eine möglichst intuitive Nutzbarkeit anzustreben [6].

In diesem Zusammenhang kommt der Benutzerfreundlichkeit elementare Bedeutung zu. Zahlreiche Methoden werden beispielsweise aufgrund ihres Umfangs oder ihrer schwierigen Erlernbarkeit in der Praxis nur wenig angewendet. Das grundsätzliche Ziel, die Methode für den praktischen Anwender im Unternehmen attraktiv zu gestalten, kann erreicht werden, indem die Bewertungsmethode nicht als zu komplexes, theorielastiges und
abstraktes Werkzeug realisiert wird [4, 6].
Um zu verhindern, dass Anwender während der Benutzung einer Bewertungsmethode den Überblick verlieren und Bewertungsergebnisse nicht nachvollziehen können, muss das Verfahren so gestaltet sein, dass es für den Benutzer verständlich ist [5, 6, 9].
Ein weiterer Gesichtspunkt, der die Benutzung einer Bewertungsmethode erleichtert, ist die Verwendung von leicht verfügbaren und vertrauten Eingabegrößen, die möglichst keiner speziellen Interpretation bedürfen [1, 5].
Um eine möglichst einfache Benutzung der Methode zu ermöglichen, stehen im Folgenden verschiedene Aspekte des eigentlichen Ablaufs der Bewertung im Mittelpunkt der Betrachtung. Die Bewertungsmethode muss eine systematisch-methodische Vorgehens-weise aufweisen. Mit Hilfe eines standardisierten Ablaufschemas, in dem jede Teilaufgabe der Methode eindeutig vorgegeben ist, kann dies umgesetzt werden. Das mit Hilfe der Methode abgebildete Entscheidungs- bzw. Bewertungsproblem kann auf diese Weise in seiner Komplexität reduziert werden. Für den Anwender werden dadurch sowohl das Verständnis der Methode, als auch die Benutzung wesentlich erleichtert [3, 4, 6, 9].
Die Wirtschaftlichkeit der Bewertungsmethode wird zudem als wichtiges Kriterium angesehen. Der Nutzen, der bei der Anwendung einer Methode erbracht wird, muss dem entstandenen Aufwand gerecht werden. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, ist es von Bedeutung, möglichst wenig finanzielle Mittel in eine Bewertung stecken zu müssen. Dafür können einerseits durch eine geringe Anzahl an erforderlichen Sachgütern, wie beispielsweise Rechnern, die Rüstkosten begrenzt werden. Hauptsächlich muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Personalkosten, die durch die Anwendung der Methode entstehen, beschränkt oder nach Möglichkeit minimiert werden bzw. in einem gesundem Verhältnis zum jeweils erbrachten Nutzen stehen müssen [3, 4, 5, 6, 9].

2.3 Bewertungsergebnisse

Ziel einer Bewertung von Produktideen ist es, Erfolg versprechende Produktideen für die weitere Entwicklung auszuwählen. Die Ergebnisse einer Bewertungsmethode müssen folglich möglichst treffsicher und verlässlich dazu beitragen, dass potentiell erfolgreiche Produktideen erkannt werden. Die Benutzung der Bewertungsmethode sollte die Erfolgsrate von Produktideen eines Unternehmens steigern und gleichzeitig das Risiko von Fehlentscheidungen reduzieren. Die Bewertung muss darüber hinaus klare, eindeutige und aussagekräftige Ergebnisse liefern, die dem Anwender der Bewertungsmethode das Potenzial der Produktidee aufzeigen [6, 9].
Das Bewertungsverfahren sollte außerdem derart gestaltet sein, dass bei Berücksichtigung aller relevanten Kriterien und einer fehlerfreien Durchführung plausible, für den Anwender anschauliche und einleuchtende Ergebnisse erreicht werden [2].

2.4 Psychologische Aspekte

Psychologische Einflüsse spielen in Bewertungs- oder Entscheidungssituationen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Da diese Einflüsse jedoch in der Art der Durchführung der Methode im jeweiligen Unternehmen begründet sind, wird an dieser Stelle lediglich auf die Relevanz dieser Einflüsse hingewiesen. Mögliche psychologische Einflüsse können beispielsweise durch gruppendynamische Effekte oder stark subjektive Einschätzungen einzelner Anwender entstehen [3].

3 Ergebnisse der Umfrage unter Unternehmen

Um neben den Ergebnissen der Literaturrecherche auch Anforderungen aus der Unternehmenspraxis zu ermitteln, wurde im Rahmen einer Messeveranstaltung eine Umfrage unter 44 Unternehmen aus der Investitionsgüterindustrie durchgeführt. Die Umfrage wurde in Form von Interviews realisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unternehmen den Kundennutzen, die Wirtschaftlichkeit, marktbezogene Faktoren sowie die Realisierbarkeit als wichtigste Kriterien für die Bewertung von Produktideen ansehen. An eine Bewertungsmethode werden außerdem einige grundlegende Forderungen gestellt, die sich hauptsächlich auf das Vorgehen beim Bewerten beziehen. So wird häufig betont, dass existierende Bewertungsmethoden eine zu hohe Komplexität aufweisen. Eine

Bewertungsmethode sollte aus Unternehmenssicht nicht zu „theoretisch", nicht zu komplex und so einfach wie möglich gestaltet sein. Gleichzeitig wird häufig gefordert, dass neben der Komplexität auch die Zeit, die für die Bearbeitung der Methode benötigt wird, auf ein geringes Maß beschränkt werden sollte. Des Weiteren wird betont, dass es wichtig ist, die Methode auf die jeweilige Bewertungssituation anpassen zu können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Während die Literaturrecherche eine Vielzahl von Anforderungen aus wissenschaftlicher Sicht liefert, die sich auf verschiedene Aspekte einer Bewertungsmethode beziehen, steht für Unternehmen hauptsächlich eine einfache und kostengünstige Anwendbarkeit im Vordergrund. Um eine fundierte Methode zu entwickeln, die wissenschaftlichen Ansprüchen genügt, müssen die Ergebnisse der Literaturrecherche berücksichtigt werden. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass diese Methode möglichst einfach und kostengünstig anzuwenden ist, um in der Praxis Verwendung finden zu können. Zur eingehenden Analyse bestehender Methoden müssen die Anforderungen weiter konkretisiert werden. Bei der Erstellung neuer Methoden können die Anforderungen als Zielgrößen verwendet werden.

Literatur

[1] Brandenburg, Frank: Methodik zur Planung technologischer Produktinnovationen. Aachen: Shaker, 2002. – ISBN 3832201424

[2] Breiing, Alois; Knosala, Ryszard: Bewerten technischer Systeme. Berlin: Springer, 1997. – ISBN 3540610863

[3] Eisenführ, Franz; Weber, Martin: Rationales Entscheiden. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2003. – ISBN 3540440232

[4] Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): Kooperatives Produktengineering. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, 2000. – ISBN 3931466787

[5] Granig, Peter: Innovationsbewertung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2007. – ISBN 3-540-29582-8

[6] Keller, Alexander; Binz, Hansgeorg: Requirements on engineering design methodologies. In: Bergendahl, Margareta, Norell (Hrsg.); Grimheden, Martin (Hrsg.); Leifer, Larry (Hrsg.): Proceedings of the 17th International Conference of Engineering Design - ICED 2009. Stanford: Design Society, 2009. – ISBN 1904670067, S. 2-203 – 2-214.

[7] Messerle, Mathias; Binz, Hansgeorg; Roth, Daniel: Optimisation of an evaluation method for innovative product ideas. In: Legardeur, Jérémy (Hrsg.); North, Klaus (Hrsg.): Towards new challenges for innovative management practices, Volume 3, No. 1. Wiesbaden: European Research on Innovation and Management Alliance, 2010.

[8] Reichle, Manfred: Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Erfolgspotenzials und des Innovationsgrades von Produktideen und Produkten. Stuttgart: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, 2006. – ISBN 3922823645

[9] Vahs, Dietmar; Burmester,Ralf: Innovationsmanagement. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2005. – ISBN 9783791023557

Steigerung der Abbildungsgenauigkeit lokaler FE-Ergebnisse mittels Netzverfeinerung bestehender Tetraeder-Netze

Martin Neidnicht, Florian Nützel, Bernd Roith, Christoph Wehmann, Frank Rieg

Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth
Email: martin.neidnicht@uni-bayreuth.de
Internet: http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Im vorliegenden Beitrag wird ein Werkzeug zur lokalen Netzverfeinerung bestehender Tetraedernetze für die Finite Elemente Analyse (FEA) vorgestellt. Die Bauteildiskretisierungen, die ausgehend von groben, jedoch zumindest geometriebeschreibenden Tetraederzerlegungen gewonnen werden können, vermitteln zwischen konkurrierenden Zielen. Dabei steht eine gute Abbildungsgenauigkeit des realen Bauteilverhaltens in der FE-Simulation einer möglichst kurzen Rechenzeit gegenüber. Zunächst wird ein Algorithmus zur räumlichen Subtriangulierung vorgestellt, der eine nutzergesteuerte Auswahl der interessierenden Bauteilregionen berücksichtigt. Das Verfahren wird anschließend um eine Funktionalität zur Aufrechterhaltung der Netzkonformität ergänzt. Unter besonderer Berücksichtigung gängiger Netzgütekriterien erfolgt schließlich die Anwendung auf ein Beispielbauteil.*

Abstract: *This article provides a tool for local refinement of already existing tetrahedron meshes, which are used in the finite element analysis (FEA). The body discretizations, synthesized of raw but at least geometry mapping tetrahedron meshes give an opportunity to combine the competing aims of reliable FE-results against moderate calculation time for handling the according differential equations. At first an algorithm for three-dimensional decomposition of user selected mesh regions is defined. Furthermore this method is completed by a functionality to keep the mesh conformity alive. Finally the developed utility is applied to an example with special regards to common mesh quality criteria.*

Stichwörter: *Finite Elemente, Diskretisierung, Adaptive Netzgenerierung, Tetraeder, Mapped-Meshing*

Keywords: *Finite Element, Discretisation, Adaptive Mesh, Tetrahedral Mesh Generation, Mapped Meshing*

1 Lokale Netzverfeinerung zur Steigerung der FE-Ergebnisgüte bei gleichzeitig moderatem zusätzlichem Rechenaufwand

Eine möglichst genaue Repräsentation der Bauteilgeometrie ist die wichtigste notwendige Bedingung zur Durchführbarkeit der Finite-Elemente-Analyse (FEA). [1] Die Abweichung zwischen kontinuierlicher Bauteiloberfläche und dessen diskretisierter FE-Modellierung wird als Diskretisierungsfehler bezeichnet und hat erheblichen Einfluss auf die zu erwartenden numerischen Fehler der FE-Rechenergebnisse in sämtlichen Anwendungsbereichen dieser Methode. Diese Sensitivität bzgl. Geometrieabbildung wird bei allen gängigen Netzgeneratoren beachtet, so dass sich der erstellte Algorithmus lediglich an der bereits vorhandenen Diskretisierung orientieren muss. Als Ausgangssituation wird ferner angenommen, dass es sich bei der Eingabe zunächst um lineare Tetraedernetze handelt.
Ziel der Arbeit ist die Vereinigung der zu erwartenden höheren Reliabilität der lokalen FE-Ergebnisse an den betrachteten Stellen mit gleichzeitig nur moderat steigendem Berechnungsaufwand bei der Lösung des charakterisierenden Gleichungssystems.

2 Algorithmische Umsetzung

Anders als beim Mapped-Meshing für Hexaederstrukturen gibt es bei der Tetraederverfeinerung keine Wahlfreiheit bzgl. der Unterteilungsintervalle. Es ist nämlich mathematisch keineswegs gewährleistet, dass die bei beliebiger Subtriangulierung jeweils verbleibenden Polygonteile ihrerseits noch eine sinnvolle Triangulierung zulassen. Insbesondere müsste hier mit einer starken Verschlechterung der Netzgütekriterien [2] wie kleinsten Winkeln, unausgeglichenen Seitenverhältnissen, etc. gerechnet werden. Vielmehr bietet sich gerade für Tetraeder eine feste Unterteilung mit beherrschbarem Einfluss auf die Netzqualität an. Als Ansatz für den erstellten Mapped-Mesher wurde eine Halbierung jeder Elementkante gewählt. Bild 1 illustriert das Vorgehen für jede der Tetraederoberflächenseiten.

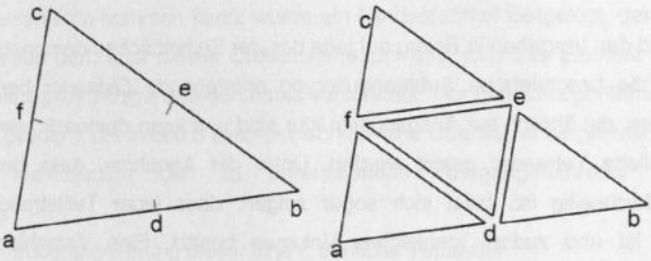


Bild 1: Ähnlichkeitsbeziehungen für jede Tetraederoberflächenseite

Durch eine Betrachtung der Innenwinkelsummen an den neu entstandenen Mittenknoten d, e, f erhält man die erwarteten Ähnlichkeitsbeziehungen. [4] Die Formeln (1) – (3) führen die neu entstandenen Winkel auf die bereits existierenden Winkel zurück.

$$\angle dea = \frac{\pi}{2} - \angle afd - \angle efc = \frac{\pi}{2} - \angle acb - \angle bac = \angle cba \tag{1}$$

$$\angle fed = \frac{\pi}{2} - \angle deb - \angle cef = \frac{\pi}{2} - \angle acb - \angle cba = \angle bac \tag{2}$$

$$\angle fde = \frac{\pi}{2} - \angle fda - \angle bde = \frac{\pi}{2} - \angle cba - \angle bac = \angle acb \tag{3}$$

Da diese Beziehungen für alle Seitenflächen eines jeden Tetraeders Gültigkeit besitzen, folgt, dass alle Winkel, die auch durch räumliche Subtriangulierung erzeugt werden, denen der bereits existierenden Struktur entsprechen.

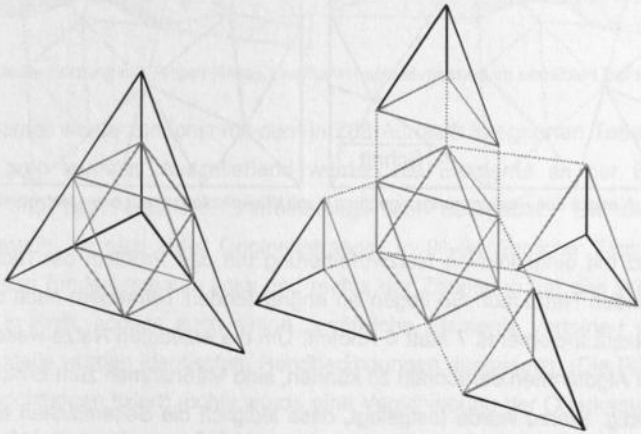


Bild 2: Zerlegung eines Tetraeders in vier ähnliche Tetraeder und ein oberflächenähnlicher Oktaeder

In Bild 2 wird das Vorgehen in Bezug auf jede der vier Seitenflächen demonstriert.
Der durch die beschriebene Subtriangulierung entstehende Oktaeder besitzt lediglich Außenflächen, die ähnlich zur Ausgangsstruktur sind und kann demnach ebenfalls wieder in vier ähnliche Tetraeder geteilt werden. Unter der Annahme, dass der Ausgangstetraeder gleichseitig ist, lässt sich sogar zeigen, dass jeder Teiltetraeder ebenfalls gleichseitig ist und zudem identisches Volumen besitzt. Eine Verschlechterung der Netzgütekriterien ist damit ausgeschlossen.

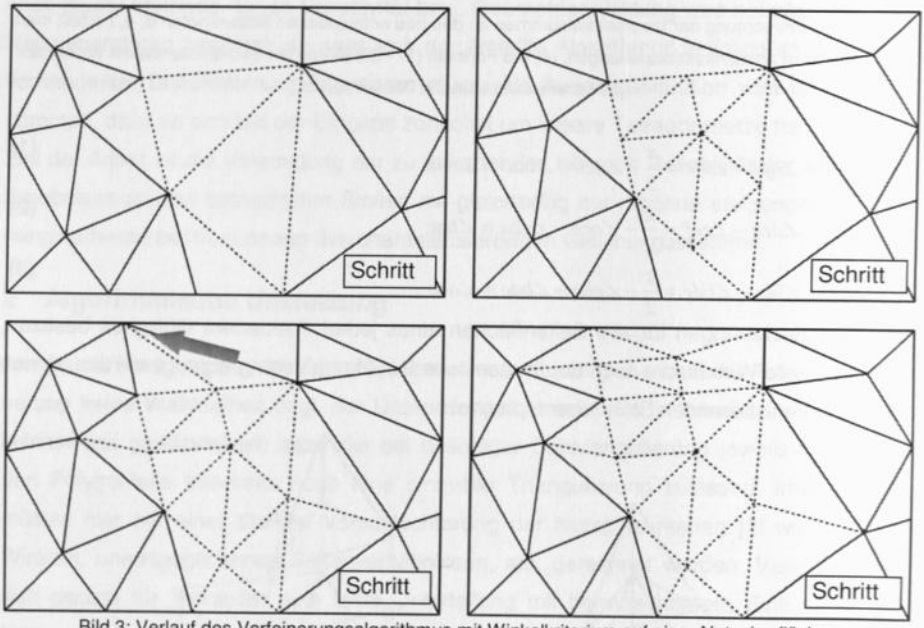


Bild 3: Verlauf des Verfeinerungsalgorithmus mit Winkelkriterium auf einer Netzoberfläche

Einhergehend mit einer lokalen Netzverfeinerung tritt das Problem der Nichtkonformität der entstehenden Netze auf. So liegen an angrenzenden Tetraedern nach der Verfeinerung eines Nachbarelements 7 statt 4 Knoten. Um die erzeugten Netze weiterhin mit den bestehenden Algorithmen berechnen zu können, sind Maßnahmen zum Erhalt der Konformität notwendig. Hierzu wurde festgelegt, dass lediglich die Seitenflächen angrenzender Elemente verfeinert werden, die dies erfordern, alle anderen sollen in originalen Abmessungen erhalten bleiben. Da es durch diese Konvention zu sehr spitzen Winkeln innerhalb

dieser Bindeelemente kommen kann, wurde ein Mindestwinkel festgelegt, der nicht unterschritten werden darf. Löst dieses Qualitätskriterium aus, wird das Element trotzdem so verfeinert, wie es der Ausgangsalgorithmus vorschreibt. Der Gesamtalgorithmus lässt sich in 4 Schritte gliedern, die in Bild 3 exemplarisch für eine Oberfläche dargestellt sind:

Schritt 1: Identifikation der zu unterteilenden Ausgangstetraeder aus einer Eingabedatei

Schritt 2: Subtriangulierung dieser in je 8 ähnliche Tetraeder

Schritt 3: Übertragung der Kantenverfeinerung auf alle angrenzenden Tetraeder

Schritt 4: Prüfung auf Verletzung des Mindeswinkelkriteriums, ggf. zurück zu Schritt 1

3 Ergebnisse

Der beschriebene Algorithmus wurde in der Programmiersprache C implementiert und hinsichtlich der spezifischen Abspeicherung der Netzstruktur des FE-Programms Z88 [3] ausgelegt. Im Folgenden sollen anhand eines einfachen Beispiels die Resultate des Mapped-Meshers für Tetraeder dargestellt werden.

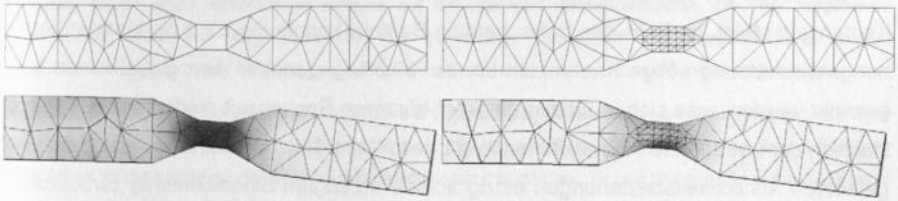


Bild 4: Bauteilvernetzung mit Tetgen (links), zweifach mapped-meshed im sensiblen Bereich (rechts)

Das obige Bauteil wurde zunächst mit dem in Z88 Aurora® integrierten Tetraeder-Vernetzer Tetgen grob vernetzt. Anschließend wurden die Elemente an der Einschnürung ausgewählt und dem erstellten Verfeinerungs-Tool übergeben. Da dies zweifach ausgeführt wurde, ist also jeder Originaltetraeder in 8^2=64 ähnliche Tetraeder zerlegt worden. An den Bindeelementen links und rechts der Zerlegung tritt das Winkelkriterium (hier: > 5°) in Kraft, sodass auch einige zusätzliche Elemente verfeinert worden sind. Beide FE-Modelle wurden identischen Randbedingungen ausgesetzt. (Die Fläche links ist in alle Raumrichtungen fixiert; rechts wurde eine Verschiebung der Oberkante nach unten erzwungen. Auf den unteren Abbildungen sind die qualitativen Spannungen in den Eckknoten (berechnet nach GEH in einem Gauß-Punkt) erkennbar.

Tabelle 1: FE-Netzdaten und Ergebnisse der Berechnung bzgl. originaler Tetgen-Vernetzung (grob), deren lokaler Verfeinerung sowie einer global feinen Vernetzung mit vergleichbarer Ergebnisgüte

	Tetgen (grob)	lok. Verfeinerung	Tetgen (fein)
Anzahl der FE-Knoten	197	350	5.697
Anzahl der FE-Elemente	491	1.118	28.155
mittl. kleinster Winkel	18,112°	15,443°	17,309°
mittl. Kantenverhältnis (min./max.)	0,378	0,283	0,304
max. Knotenspannung	320 N/mm²	653 N/mm²	642 N/mm²

Die Berechnungsergebnisse, die bzgl. des lokal verfeinerten Netzes und eines global gleichmäßig Netzes mit vergleichbarem Diskretisierungsgrad erzeugt wurden, zeigen gute Übereinstimmungen des Verschiebungs- und Spannungsverlaufs in der Einschnürungsregion. Auch über das verbleibende Bauteil hinweg, sind nur geringe Abweichungen zu beobachten, da dort, wie erwartet, ohnehin nur sehr kleine Gradienten auftreten.

Der numerische Aufwand zur Lösung des relultierenden Gleichungssystems hängt stark von der Größe der Gesamtsteifigkeitsmatrix ab, welche wiederum proportional mit der FE-Knotenzahl steigt. Im Falle des betracheteten Bauteils konnte die zur zuverlässigen Spannungsabschätzung nötige Knotenzahl um ca. 93,8% gegenüber dem global feinen Netz gesenkt werden, was sich in einer signifikant kürzeren Rechenzeit niederschlägt. Die hinsichtlich der betrachteten Gütekriterien leicht gesunkene Netzqualität, ist aufgrund der hergeleiteten Ähnlichkeitsbeziehungen einzig auf die erzeugten Bindeelemente zurückzuführen und lässt sich demnach ggf. durch die Wahl des Winkelkriteriums beeinflussen.

Literatur

[1] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard; *Finite-Elemente-Analyse für Ingenieure.* 3. Aufl. München: Hanser, 2009

[2] Frey, Pascal; Borouchaki, Houman; *Geometric evaluation of finite element surface meshes.* In: Finite Elements in Analysis and Design 31 (1998), 33-53

[3] Rieg, Frank; Homepage des Finite Elemente Systems Z88 Aurora®: http://www.z88.de

[4] Lax, Peter D.; Linear algebra and its applications. 2. Aufl. Hoboken, N.J., Wiley-Interscience, 2007

Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe Materialien – Produkt- und Prozessinnovation durch den Einsatz der Finiten Elemente Methode

J.-H. Ohlendorf, D. H. Müller, K.-D. Thoben

Universität Bremen
Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK)
Badgasteiner Str. 1, D-28359 Bremen
Email: johlendorf@uni-bremen.de; Internet: http://www.bik.uni-bremen.de

Inhalt: *Um die Anwendung polymerer Faser-Kunststoff-Verbunde auch in der Groß- und Mittelserienfertigung deutlich zu stärken, sind effiziente Produktions- und Fertigungstechniken erforderlich. Zur Fertigung haben sich dazu in den letzten Jahren Nassimprägnierverfahren (liquid composite molding, LCM) etabliert. Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung dieser Verfahren ist zunächst der textiltechnische Aufbau der Bauteilstruktur (preform), womit ein erhebliches Prozessrisiko verbunden ist. Die ungewollt bewirkten Veränderungen bei aktuellen Handhabungsprozessen im hochspezialisierten textilen Halbzeug haben einen wesentlichen Einfluss auf die späteren Bauteilkennwerte. Die hier vorgestellte Untersuchung stellt eine Möglichkeit dar, die numerische Simulation des Textilverhaltens in den Produktentwicklungsprozess für flexible und innovative Handhabungseinrichtungen mit einzubeziehen.*

Abstract: *More efficient manufacturing techniques are required to enhance the use of fibre-reinforced plastic composites in large or medium scale productions. In the last years liquid composite moulding (LCM) was established for the manufacturing of fibre-reinforced plastic composites. To use this technique the build-up of textile preforms is necessary. Unmeant textile changes during the handling-process cause mechanical problems of the fibre-reinforced plastic composites. This paper shows an approach to use the numerical simulation to predict the textile behaviour for the product development process of flexible and innovative handling devices.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, Finite Elemente Methode, biegeschlaff, Material, Handhabung, Modell*

Keywords: *product design, finite element analysis, limp material, handling, modelling*

1 Motivation und Ausgangssituation

Die stark manuell geprägte Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden beinhaltet, insbesondere bei steigender Bauteilgröße, ein erhebliches Prozessrisiko. Die Prozessautomatisierung führt maßgeblich zu einer Reduzierung von Prozessunsicherheiten und trägt nachhaltig zur Kostensenkung und Qualitätssteigerung

bei. Insbesondere die automatisierte Handhabung von forminstabilen bzw. biegeschlaffen technischen Textilien (z. B. Glas-, Karbon oder Aramidfasern) stellt auch heute noch eine große Herausforderung für die industrielle Fertigung von Leichtbauprodukten dar. Dabei müssen die biegeschlaffen Materialien automatisiert zugeführt, zugeschnitten, transportiert und im Formwerkzeug positioniert werden, um eine reproduzierbar hohe Qualität zu gewährleisten. Gerade die Anforderungen an die Flexibilität in Bezug auf die stark unterschiedlichen und orthotropen Materialeigenschaften, wie beispielsweise das Biegeverhalten, die Zugempfindlichkeit oder die Verschiebefestigkeit, kann mit Hilfe der klassischen Handhabungstechnologie nur unzureichend erfüllt werden und erfordert innovative intelligente Systeme. Um diese speziellen Eigenschaften beim Produktentwicklungsprozess von Handhabungseinrichtungen nachhaltig zu berücksichtigen, ist der Einsatz der Finite Elemente Methode (FEM) ein geeigneter Ansatz. Um das Verhalten von textilen bzw. biegeschlaffen Materialien numerisch abzubilden, gibt es verschiedene Ansätze. Primär sind dies Ansätze mit Membran- (z. B. [1]) oder Schalenelementen (z. B. [2], [6], [7]) bzw. mit Stab- oder Balkenelementen (z. B. [9], [10], [11]).

2 Produktentwicklungsprozess

Für die Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe bzw. forminstabile Materialien, insbesondere für technische Textilien, sind zwei Eigenschaften maßgeblich. Dies ist zum einen die Krafteinwirkung auf technische Textilien sowie der Kontakt zwischen Textil und Handhabungseinrichtung bzw. Formwerkzeug. Zum anderen sind das die geometrische Positionierung dieser Kontaktstellen sowie die Gestaltung der Speicher- bzw. Transportmöglichkeit für das Textil. Für den Produktentwicklungsprozess bedeutet dies, dass der konstruktive Entwurf der Handhabungseinrichtung in ein geometrisches und mechanisches Modell zu überführen ist, welches diese Eigenschaften abbildet. Dieses Modell ist mit in die numerische Simulation zu integrieren.

3 Einsatz der FEM für die numerische Textilmodellierung

Die Finite Elemente Methode lässt sich grob in drei Schritte unterteilen, dem *preprocessing*, der eigentlichen Lösungs-Phase und dem *postprocessing*.

Für die Modellbildung des Textils bzw. des textilen *preforms* kommt ein speziell entwickeltes Skript für das *preprocessing* des FE-Programms *Ansys* zum Einsatz. Dieses Skript ermöglicht es, textile Halbzeuglagen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften sowie variabler Geometrie und Faserausrichtung miteinander zu einem *preform* zu kombinieren und die gemessenen Materialeigenschaften zu integrieren. Dafür wird die *ANSYS Parametric Design Language (APDL)* verwendet. Bild 1 stellt eine schematische Übersicht über den Aufbau und die Leistungsfähigkeit des Skriptes dar.

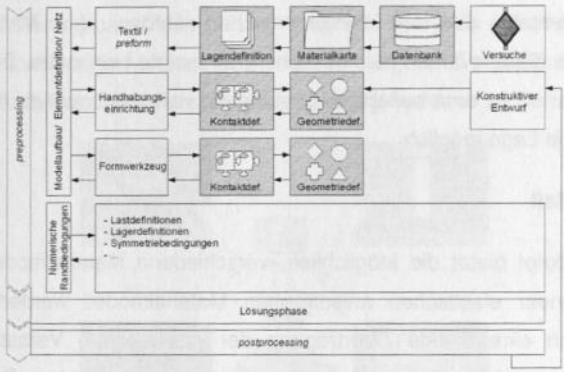


Bild 1: Schematische Übersicht über das entwickelte Skript zum Aufbau von technischen Textilien und *preforms* für das *preprocessing* einer numerischen Berechnung mit dem Programm *Ansys*

Das Skript ist in der Lage, den Lagenaufbau des *preforms* automatisch durchzuführen. Es kommt primär eine Modellierungsstrategie zum Einsatz, bei der die Elemente direkt durch Knotendefinition aufgebaut werden. Dadurch ist die Modellierung von Einheitszellen möglich, welche für den textilen Aufbau in flächiger Ausdehnung wiederholt werden. Als Elemente kommen, je nach Detaillierungsgrad des Modells, vierknotige Schalenelemente (Typ *SHELL181*) oder zweiknotige Balkenelemente (Typ *Beam188*) zum Einsatz. Die Elementtypen werden zusammen mit den Materialeigenschaften in einer speziellen Materialkarte hinterlegt.

Als numerische Randbedingungen lassen sich neben dem relevanten Eigengewicht des Textils und den Lagerbedingungen auch zusätzliche Lasten beispielsweise durch die Handhabungseinrichtungen sowie Symmetriebedingungen definieren. Abschließend wird das Modell dem FEM-Löser übergeben.

Aufgrund der großen Knotenverschiebungen bei schon sehr kleinen Kräften, werden die äußeren Lasten iterativ bzw. schrittweise aufgebracht, was zu einer erhöhten Stabilität bei der Konvergenz der Lösung führt.

4 Textil und *preform*-Definition

Für das *preprocessing* ist insbesondere die Textil- bzw. *preform*-Modellierung ein aufwändiger Schritt. Für die Integration der Textilkennwerte in das Modell wurden Materialkarten erstellt, die den textiltechnischen Aufbau, das Materialmodell, den Elementtyp sowie die relevanten mechanischen Kennwerte beinhalten. Durch den Einsatz dieser Materialkarten ist eine beliebige Kombination von Halbzeugtyp, Ablagewinkel und Lagengeometrie je Lage möglich.

4.1 Materialmodell

Das ermittelte Skript bietet die Möglichkeit, verschiedene Materialmodelle einzusetzen. Neben einem linear elastischen anisotrophen Materialmodell werden ebenfalls gute Ergebnisse durch eine direkte Übertragung der gemessenen Versuchsdaten in das *preprocessing* erreicht. Dazu wurde eine entsprechende Schnittstelle der Datenbankstruktur mit den aufgenommenen Versuchsreihen und dem entwickelten *preprocessing*-Skript aufgebaut (vgl. Bild 2).

4.2 Textilaufbau

Grundsätzlich lässt sich das Textil selbst in drei verschiedenen Modellierungstiefen beschreiben. Zum ersten mit dem mikroskopischen Ansatz ($\sim 10^{-6} m$), bei dem die einzelnen Fasern des Textils modelliert werden (vgl. dazu [8]). Dieses Vorgehen bedeutet eine hohe Detailtiefe, benötigt aber einen hohen Aufwand bei der Modellerstellung sowie extrem hohe Rechenzeiten in der Lösungsphase. Das simulieren größerer flächiger Textilien ist mit diesem Ansatz aktuell nicht möglich. Der mikroskopische Ansatz wird in dieser Untersuchung nicht weiter verfolgt. Eine weitere Möglichkeit ist der makroskopischen Ansatz ($\sim 10^{-3} m$), bei dem das Textil durch Schalenelemente als Kontinuum abgebildet wird. Diese Strategie lässt eine Bestimmung des textilen Gesamtverhaltens zu. Einen Rückschluss auf beispielsweise das Verschieben einzelner Faserbündel ist allerdings nicht möglich. Eine dritte Möglichkeit ist der mesoskopische

Ansatz ($\sim 10^{-4} - 10^{-5} m$), der zwischen den beiden erstbeschriebenen anzuordnen ist. Die Textilien werden bei diesem Ansatz durch die Modellierung der Faserbündel und gegebenenfalls der Binderfäden beschrieben.

4.3 Materialkennwerte

Die Materialkennwerte werden durch verschiedene Versuche bzw. Messvorrichtungen bestimmt. Bild 2 stellt einen Überblick über die notwendigen textilen Eigenschaften für die numerische Modellierung dar. Diese müssen aufgrund des stark orthotrophen Verhaltens in mehreren Raumrichtungen erfasst (z. B. unter 0°; 22,5°; 45°; 66,5°; 90°) und in einer Datenbankstruktur in einzelnen Materialkarten hinterlegt werden.

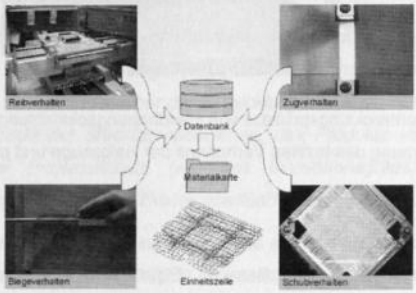


Bild 2: Ermittlung der textilen Kennwerte für die numerische Berechnung des Textilverhaltens [3, 4, 5] mit der exemplarischen Darstellung einer durch das entwickelte Skript modellierten Einheitszelle (mesoskopischer Ansatz) eines textilen Geleges (Glasfaser 2400tex, bidirektional)

5 Modellevaluierung

Die Modellevaluierung erfolgt in zwei Stufen. Dazu wird in der ersten Stufe das Verhalten des Textilmodells an Modellen der zur Kennwertermittlung genutzten Vorrichtungen überprüft. Diese Prüfungen umfassen das Biegeverhalten [3], das Zugverhalten [5], das Reib- und das Schubverhalten. Nachfolgend wird das gesamte Textilmodell an exemplarischen Formwerkzeugen getestet. Dies sind Formwerkzeuge mit einer Biegeachse (Halbzylinder) und mit zwei Biegeachsen mit gleichem (Hemisphäre) und unterschiedlichem (hyperbolisches Paraboloid) Vorzeichen in der Steigung.

6 Zusammenfassung

Der Einsatz der FEM für die Produktentwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe bzw. forminstabile Materialien lässt sich stark verbessern. Eine frühzeitige Abschätzung und Optimierung der Handhabungstechnik ist möglich und wird am Institut erfolgreich durchgeführt.

Bild 3: Modifizierter Produktentwicklungsprozess von Handhabungseinrichtung durch den FEM-Einsatz zur Bestimmung des textilen Verhaltens der Halbzeuge und *preforms*

Literatur

[1] BOISSE, P.; CHEROUAT, A.; GELIN, J. C.; SABHI, H.: Experimental study and finite element simulation of a glass fiber fabric and shaping process. In *Polymer Composites* vol. 16 (1995), p. 83-95

[2] CHERIF, C.: Drapierbarkeitssimulation von Verstärkungstextilien für den Einsatz in Faserverbundkunststoffen mit der Finite-Elemente-Methode, RWTH Aachen, Diss., 1999

[3] Norm DIN 53362 - *Bestimmung der Biegesteifigkeit*. Berlin, 2003

[4] Norm DIN EN ISO 5084 - Textilien - Bestimmung der Dicke von Textilien und textilen Erzeugnissen. Berlin, 1996

[5] Norm DIN EN ISO 13934-1 - Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden, Berlin, 1999

[6] DÖRSCH, C.; MÜSSIG, J.; MÜLLER, D. H.: Modelling Of Manufacturing Processes by FEA-Method For the Production of Natural Fiber-Reinforced Plastics. IMECE2007, Seattle 2007

[7] ERMANNI, P.: Composites Technologien, Skriptum zur Vorlesung. ETH Zürich, 2007

[8] FINCK, H.: Numerische Simulation der mechanischen Eigenschaften textiler Flächengebilde – Gewebeherstellung, LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2004

[9] MÜLLEN, A. J.: Nichtlineare Verformung einachsig belasteter Gewebe, RWTH Aachen, Diss., 2000

[10] MÜLLER, D. H.; KOCHMANN, M.: *Numerical Modeling of Thermobonded Nonwovens*, INTC, Baltimore 2003

[11] SHARMA, S. B.; SUTCLIFFE, P. F.: Draping of woven fabrics - progressive drape model. In *Plastics Rubber and Composites* vol. 32 (2003), p. 57-64

Prognose des Entwicklungsaufwands – Adaption des COCOMO Modells auf die Produktentwicklung

Jörg Feldhusen, Judith Pollmanns, Jan Erik Heller

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

Inhalt: *Die Entwicklungskosten eines Produktes sind, wenn überhaupt, meist erst zum Ende des Projektes bekannt und werden aber zu Beginn meist völlig unrealistisch eingeschätzt. In Anlehnung an das COCOMO-Modell nach Boehm werden die Aufwandstreiber der Entwicklung bestimmt. Auf Basis der erwarteten Größe, d. h. beispielsweise der Anzahl der Stücklistenpositionen, des Produkts wird in Abhängigkeit von den Ausprägungen vordefinierter Projektattribute (wie des Innovationsgrads) der Entwicklungsaufwand abgeschätzt, der dann unternehmensintern in Kosten überführt werden kann.*

Abstract: *There is only a number to engineering costs at the end of a project as cost estimations in advance tend to be unrealistic. In accordance to the COCOMO cost estimation model the development time needed is calculated based on the expected size of the product and defined cost factors (e.g. the degree of innovation) enhancing the effort. The development time can be translated to costs company-internally.*

Stichwörter: *Entwicklungskosten, Kostenschätzung, Entwicklungsaufwand.*

Keywords: *engineering costs, cost estimation, estimation of design effort.*

1 Einleitung

Bei all den Methoden und Software-Systemen zur Vorabprognose von Kosten in der Entwicklung (z. B. Debis Vamos, AMANIS, MoKoKo, XKIS, FEKIS, MIRAKON) werden diejenigen Kosten ermittelt, die in der Entwicklung festgeschrieben werden; die tatsächlichen Entwicklungskosten werden jedoch nicht betrachtet. Auch wenn die festgelegten Kosten die tatsächlich verursachten bei weitem überschreiten, bewegen sich diese keinesfalls in vernachlässigbaren Größenordnungen. Es ist also notwendig, eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, auf Basis der grundlegenden Anforderungen den Aufwand in Entwicklung und Konstruktion abzuschätzen. Im Bereich der klassischen

Produktentwicklung ist eine solche Methode bisher kaum beschrieben, wohingegen sich die Softwareentwicklung bereits seit den frühen 1980er-Jahren Schätzverfahren ähnlicher Zielsetzung bedient.

2 Aufwandsberechnung nach COCOMO 81 und COCOMO II

Die Methode COCOMO 81 (Constructive Cost Model) wurde 1981 von Barry W. Boehm [2] vorgestellt und ermöglicht es, Aufwand und Entwicklungsdauer eines Projektes in Abhängigkeit von der erwarteten Programmgröße abzuschätzen. Gegliedert in drei Detaillierungsstufen erfolgt die Berechnung entweder ausschließlich auf Basis der erwarteten Programmgröße oder sie schließt die Betrachtung der Entwicklungsart sowie detaillierte Kostenfaktoren ein.

Die in den 1970er Jahren aus historischen Projektdaten ermittelten Faktoren waren in den 1990er Jahren veraltet, unvollständig sowie teilweise überholt, sodass eine Revision des Prognoseverfahrens erforderlich wurde. COCOMO II (Ausführungen nach [3]) bietet nun die Möglichkeit, den Aufwand zu unterschiedlichen Entwicklungszeitpunkten mit unterschiedlichen Faktoren zu ermitteln, basiert aber grundlegend weiterhin auf der zu erwartenden Programmgröße, gemessen in KSLOC (KSLOC = Thousands Source Lines of Code) und / oder Function Points (s. u.), die in Programmzeilen umgerechnet werden. In diesem Modell wird konsequent die Wiederverwendung von Code berücksichtigt.

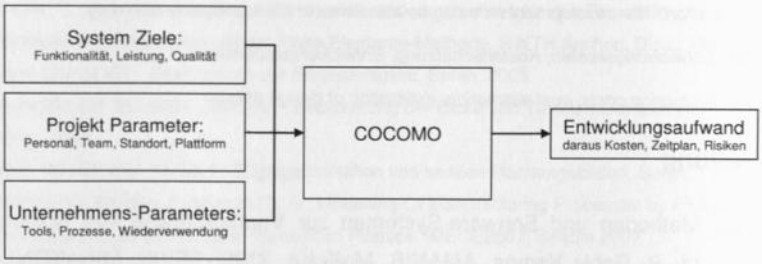


Bild 17: Ein und Ausgänge des COCOMO Modells in Anlehnung an [4]

COCOMO II besteht aus drei Ansätzen, die jeweils auf die zur Verfügung stehende Information zu unterschiedliche Stadien des Entwicklungsprozesses abgestimmt sind.

Das „*Application Composition*"-Modell für die frühe Prototypenphase, in der wenig Informationen vorliegen, schätzt den Entwicklungsaufwand dabei über sogenannte „Object

Points" und stellt somit einen relativ neuen Ansatz dar. Object Points beschreiben die notwendigen Bildschirmmasken, Berichte und 3GL-Module (d. h. Module in hohen Programmiersprachen). Aus diesen Werten wird über einen Produktivitätsfaktor, der u. a. die Erfahrung der Mitarbeiter berücksichtigt, der Aufwand berechnet.

Das „*Early Design*"-Modell für die frühe Entwurfsphase bestimmt über Function Points und eine relativ begrenzte Anzahl von Kostenfaktoren den zu erwartenden Aufwand. Function Points quantifizieren die verarbeitete Information, Input und Output, interne und externe logic files sowie externe Anfragen, die direkten Output verursachen.

Das „*Post Architecture*"-Modell betrachtet die tatsächliche Entwicklung der Software sowie ihre Instandhaltung (Änderungen, ohne dass die eigentliche Funktionsweise geändert wird) und setzt dazu bereits die ausgearbeitete Systemarchitektur voraus. Die Schätzung der Entwicklungszeit basiert auf den erwarteten Programmanweisungen und / oder Function Points und detaillierten Kostenfaktoren.

2.1 Berechnung des Aufwands

Die Berechnung des Aufwands für das „Post Achitecture"-Modell, an das später das zu entwickelnde System angelehnt werden soll, erfolgt entsprechend folgender Berechnungsvorschrift:

$$PM = A \cdot Size^{E} \cdot \prod_{i=1}^{n} EM_i \quad \text{mit } A = 1{,}94 \text{ und} \tag{1}$$

$$E = B + 0{,}001 \cdot \sum_{j=1}^{5} SF_i \quad \text{mit } B = 0{,}91 \tag{2}$$

PM: Person Months (Personenmonate)

EM : Effort Multiplier (Kostenfaktoren)

SF: Scale Factor (Skalenfaktoren)

Der aus den Skalenfaktoren *SF* berechnete Exponent *E* der Programmgröße *Size* berücksichtigt die positiven und negativen Skaleneffekte während der Entwicklung. Die Kostenfaktoren *EM* berücksichtigen die Einflüsse der Bereiche Produkt, Plattform, Personal und Projekt.

2.2 Skalenfaktoren

Skalenfaktoren beschreiben diejenigen Faktoren, die einen exponentiellen Einfluss auf den Aufwand haben, die sind u. a. die Ähnlichkeit zu bereits durchgeführten Projekten (precedentedness) oder das „gute Zusammenspiel" des Entwicklungsteams (team cohesion) bzw. die Zusatzaufwände durch unterschiedliche Ziele, Werte und Arbeitsweisen.

Die Attribute werden in einer meist sechsteiligen Skala von „very low" bis „extra high" bewertet und ihnen werden entsprechend Werte zugewiesen.

Tabelle 3: Exemplarische Werte des Skalenfaktors Precedentedness

Ausprägung	Thoroughly unprecedented	Largely unprecedented	Somewhat unprecedented	Generally familiar	largely familiar	Thoroughly familiar
Bewertung	Very low	low	nominal	high	Very high	Extra high
SF-Wert	6,20	4,96	3,72	2,48	1,24	0,00

2.3 Kostenfaktoren

Wie bereits zuvor beschrieben erfolgt bei der Aufwandsberechnung nach COCOMO II eine Anpassung der benötigten Zeit abhängig von der Ausprägung verschiedener Kostentreiber. Die für das „Post Architecture"-Modell detailliert beschriebenen 17 Faktoren werden für das „Early Design"-Modell zu sieben Faktoren zusammengefasst, womit der jeweiligen Informationslage Rechnung getragen wird.

Tabelle 4: Exemplarische Kostenfaktoren: produktbezogen

Kostenfaktor	Beschreibung
Required Software Reliability	Bedeutungsschwere des Ausfalls
Base Size	Aufwand zur Generierung notwendiger Testdaten
Product Complexity	Komplexität von Produkt oder Komponente
Development for Reusability	Zusatzaufwand für das Ermöglichen der leichten Wiederverwendung
Documentation Match to Life-Cycle Needs	Nachhaltigkeitsbezogener Dokumentationsaufwand

Auch den auf einer sechsteiligen Skala bewerteten Kostenfaktoren werden für die Berechnung des Aufwands Werte zwischen 0,5 und 1,62 zugewiesen.

3 Übertragbarkeit auf die klassische Produktentwicklung

Auch wenn die Softwareentwicklung vielmals anderen Regeln folgt als die klassische Entwicklung physischer Produkte, so ist doch das grundsätzliche Vorgehen ähnlich. Das Modell zur Schätzung der Entwicklungskosten soll daher auf Basis des COCOMO-Modells, im Speziellen des „Post Architecture"-Modells, aufgebaut werden.
Der Aufwand soll auch hier auf Basis der Größe, d. h, der geschätzten Stücklistenpositionen bzw. der geschätzten Anzahl der Module, und in Abhängigkeit vordefinierter Projektattribute abgeschätzt werden. Im Folgenden werden diese Faktoren, die im COCOMO Modell den Skalen- und Kostenfaktoren entsprechen, vorgestellt und die erwarteten Einflüsse beschrieben.

Innovationsgrad

Der Innovationsgrad beschreibt die Neuartigkeit des Moduls und wird vereinfacht in Anlehnung an Hausschild und Schlaak [5] auf einer siebenteiligen Skala angegeben. Der Wert beinhaltet eine Betrachtung der Sektoren Markt, Technologie, Beschaffung, Produktion und Organisation. Innovation beeinflusst die Entwicklungszeit negativ.

Ähnlichkeit

Ähnlichkeit beschreibt hier die Vergleichbarkeit zu bereits durchgeführten Entwicklungsprojekten und die Beherrschung derselben. Die Ähnlichkeit beeinflusst die Entwicklungszeit positiv.

Komplexität

Die Komplexität über die Anzahl notwendiger Dokumente soll gemessen werden. Hierbei werden sämtliche Berechnungen, Modelle, Zeichnungen, Testpläne und -protokolle, Arbeitspläne, Zertifizierungsunterlagen etc. als Aufwandstreiber gesehen. Komplexität beeinflusst die Entwicklungszeit negativ.

Kritikalität

Als kritisches Element ist in diesem Fall ein Element zu verstehen, dessen Ausfall bedeutende Auswirkungen hat, weshalb dieser durch zusätzlichen Aufwand verhindert werden muss. Der Zertifizierungs- und Nachweisaufwand für kritische Teile ist erhöht. Kritikalität beeinflusst die Entwicklungszeit negativ.

Personalqualifikation

Das Niveau der Personalqualifikation wird über eine Verteilung der möglichen qualifizierenden Abschlüsse, Ausbildungen und Erfahrungen ermittelt. Die Personalqualifikation beeinflusst die Entwicklungszeit positiv

Verteilte Standorte

Eine Entwicklung über verteilte Standorte ggf. unter Einbindung verschiedener Unternehmen erfordert einen zusätzlichen Kommunikations- und Abstimmungsaufwand. Des Weiteren wird betrachtet, dass an verteilten Standorten unterschiedliche Arbeitsweisen und Anschauungen vorliegen und diese abgestimmt werden müssen. Verteilte Entwicklung beeinflusst die Entwicklungszeit negativ.

Der Vergleich der Faktoren zeigt eine Abdeckung der relevanten Aufwandstreiber durch die für die Aufwandsschätzung definierten Faktoren. Die nicht abgedeckten Bereiche (z. B. Laufzeitbegrenzung) sind Software-spezifisch und somit nicht auf die Produktentwicklung übertragbar. Es bleibt zu prüfen, ob andere, in COCOMO nicht betrachtete, Faktoren signifikanten Einfluss auf die Entwicklungszeit haben und ob die erwarteten Einflussrichtungen so auf die Produktentwicklung übertragbar sind. Ebenfalls sind die Stärke und Form des mathematischen Zusammenhangs des Einflusses für die Bestimmung des Entwicklungsaufwands weiter zu spezifizieren.

Literatur

[1] Boehm, Barry W.: *Software Engineering Economics*. 1. Aufl. Engelwood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. – ISBN 0 138 221 227

[2] Center for Software Engineering USC (Hrsg.): *COCOMO II; Model Definition Manual*; Online verfügbar unter http://csse.usc.edu/csse/research/COCOMOII/cocomo2000.0/CII_modelman2000.0.pdf, zuletzt geprüft am 14.06.2010

[3] Beohm, B.; Horowitz, E.; Madachy, R.; Abts, C.: *Future Trends, Implications in Cost Estimation Models* in IEEE Software, September-Oktober 2000, ISSN 0740-7459

[4] Hausschild, J.; Schlaak, Th.: *Zur Messung des Innovationsgrades neuartiger Produkte* in Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 71. Nr.1 Wiesbaden: Gabler – 2001; ISSN 0044 2372

Augment'able: A multimodal Mixed Reality Desktop Workbench

Ralph Stelzer, Erik Steindecker

Technische Universität Dresden

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD

01062 Dresden

Email: Ralph.Stelzer@tu-dresden.de; Erik.Steindecker@tu-dresden.de

Internet: http://www.tu-dresden.de/mw/ktc

Inhalt: *Der Beitrag beschreibt den Augment'able, einen multimodalen Mixed Reality Desktop Arbeitsplatz. Diese tischgebundene Arbeitsumgebung nutzt ein Optical See-Through Display um virtuelle Objekte abzubilden und reale Objekte mit zusätzlichen visuellen Informationen zu überlagern. Die Interaktion erfolgt mittels eines haptischen Interfaces. Im Beitrag werden der Aufbau und die Funktionsweise des Systems erläutert und mögliche Nutzungskonzepte vorgestellt.*

Abstract: *This paper introduces the Augment'able, a multimodal Mixed Reality Desktop Workbench. The Workbench uses a spatial optical see-through display to pose virtual objects and overlay real objects with additional visual information. An haptic device provides force-feedback to the user's hand to interact within the Mixed Reality Environment. The hardware and software implementation of the system will be discussed, as well as possible use cases for the Augment'able will be introduced.*

Stichwörter: *Mixed Reality, Haptik, Augmented Prototyping, Produktentwicklungsprozess, Mensc Maschine Schnittstelle*

Keywords: *Mixed Reality, Haptic, Augmented Prototyping, Product Development Process, Humai Computer Interaction*

1 Motivation und Zielstellung

Bei der Entwicklung neuer Produkte werden für deren Gestaltung sowohl physische Prototypen als auch computergenerierte Modelle genutzt. Am physischen Prototypen lassen sich insbesondere die physikalischen Eigenschaften (z.B. Gewicht, Oberflächenbeschaffenheit) bewerten. Die Nutzung computergenerierter Modelle hingegen ermöglicht die schnelle und effiziente Anpassung der visuellen Darstellung des Produktes. Ein Verfahren, welches beide Modelle kombiniert, ist das Augmented Prototyping (vgl. [1]). Dabei werden physische Prototypen mit computergenerierten Informationen angereichert und verschmelzen für den Benutzer. Das entstehende hybride Modell vereint die Vorteile beider Methoden und führt zur verbesserten und effizienteren

Bewertung des künftigen Produktes. Kostenintensive Korrekturen am physischen Prototyp entfallen.

Der Beitrag beschreibt das Konzept eines multimodalen Mixed Reality (MR) -Desktop-Arbeitsplatzes und dessen Realisierung. Dieses als Augment'able bezeichnete MR-System eignetet sich zum Anreichern von physischen Prototypen mit computergenerierten Informationen. Im Vergleich zu anderen MR-Systemen (z.B. Spinnstube [2], objectDisplay [3]) zeichnet sich der Augment'able durch ein modulares und kostengünstiges Design aus, was diesen Arbeitsplatz besonders für KMU attraktiv macht.

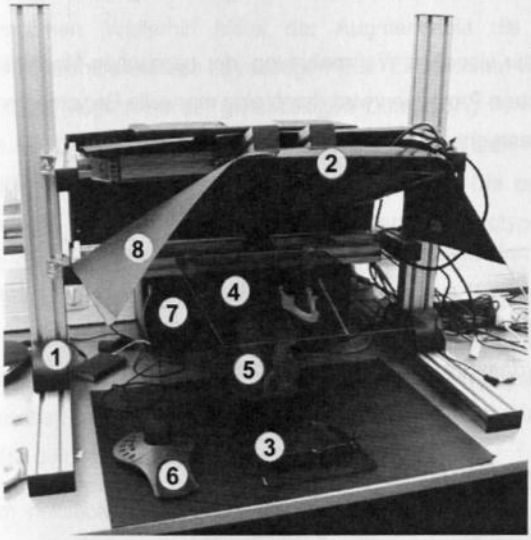
Der Augment'able erfüllt folgende Anforderungen:

- Geringe Anschaffungskosten
- Flexibel und vielseitig einsetzbar
- Multimodale Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)
- Räumlich und zeitlich korrekte Realitätsanreicherung mit virtuellen Daten
- Direkte und intuitive Interaktion
- Effiziente Nutzung des Interaktionsbereiches

2 Technische Umsetzung

Ein konventioneller Tisch-Arbeitsplatz lässt sich zu einem multimodalen MR-Desktop-Arbeitsplatz weiterentwickeln, dem Augment'able. Innerhalb der Arbeitsumgebung kann der Benutzer mit realen, wie auch virtuellen Objekten interagieren und diese kombinieren. Visuell nimmt der Benutzer diese Kombination aus Realität und Virtualität durch einen halbdurchlässigen Spiegel wahr, bei dem virtuelle Informationen die Realität überlagern. Diese virtuellen Informationen sind unter anderem Steuerelemente und 3D-Objekte. Bild 1 zeigt den realisierten Aufbau des MR-Systems.

Das MR-System verwendet als Anzeige-Gerät ein Spatial-Display mit dem Optical See-Through (OST)-Verfahren (vgl. [4]) um dem Benutzer virtuelle Informationen visuell bereitzustellen. Ein 22" LCD-Monitor mit 120-Hz Technologie ist oberhalb des Kopfes vor dem Benutzer montiert und stellt stereoskopische Halbbilder dar.



Nr.	Bezeichnung
1	Gestell
2	LCD-Monitor
3	Stereo-Brille
4	Halbdurchlässiger Spiegel
5	Haptik-Gerät
6	3D-Maus
7	Computer
8	Sichtschutz

Bild 21: Realisierter Aufbau des MR-Systems

Der vor dem Benutzer in Brusthöhe befestigte halbdurchlässige Spiegel reflektiert die Halbbilder des Monitors in das Sichtfeld des Benutzers, so dass der hinter dem Spiegel liegende Interaktionsbereich mit virtuellen Informationen visuell angereichert wird. Die Lage des Monitors und des Spiegels zueinander und relativ zur Blickrichtung des Benutzers definiert den Interaktionsraum. Zur Trennung der Halbbilder trägt der Benutzer eine Aktiv-Stereo-Brille. Dadurch wird dem Benutzer suggeriert, dass die dargestellten Objekte eine räumliche Ausdehnung haben. Dies führt zu einer höheren Güte der Szene und zum optischen Verschmelzen der virtuellen Informationen mit der Realität. Neben den konventionellen Interaktionswerkzeugen (Tastatur, 2D-Maus, 3D-Maus) nutzt das MR-System ein Haptik-Gerät (Phantom OMNI [5]). Dieses Gerät ermöglicht die direkte Interaktion mit der Szene und reichert den Interaktionsraum mit haptischen Aktionsmodalitäten an. Der mechanisch gelagerte Stift des Phantoms fungiert als physischer Platzhalter, bei dem die genutzte Hardware für den Benutzer in den Hintergrund tritt. Die Lage des Stiftes relativ zur Szene wird über Sensoren bestimmt. Mittels integrierter Aktoren ist es möglich, 3D-Kräfte auf den Stift des Phantoms und somit auf die Hand des Benutzers zu übertragen. Durch die künstliche Einschränkung der

translatorischen Freiheitsgrade der Hand wird unter anderem das Abtasten von virtuellen Oberflächen ermöglicht.

Die kontextabhängige Fusion der visuellen Wahrnehmung, der haptischen Modalität des Haptik-Gerätes und der physischen Protoypen wird durch eine manuelle Registrierung des Haptik-Gerätes im MR-System erreicht.

Software Framework

Als Software-Framework zur Implementierung aufgabenspezifischer Anwendungen nutzt das MR-System das H3D Toolkit [6] zusammen mit dem Haptik-Renderer OpenHaptics [5]. Damit wichtige, immer wieder benötigte Routinen, standardmäßig für jede Anwendung zur Verfügung stehen, wurde das Framework MyH3DLoad entwickelt. Die wichtigsten Routinen sind:

- Importieren beliebiger Modell im X3D-Format
- Selektieren, Transformieren, Entfernen von importierten Modellen mittels Phantom oder 3D-Maus
- Speichern der Szene
- Ausführen von Python-Code während der Laufzeit
- Kalibrieren des Phantoms zur manuellen Registrierung im MR-System

Zur manuellen Registrierung des Haptik-Gerätes im Weltkoordinatensystem der Szene wurde das Hilfsprogramm Calib aus dem Candy Toolkit [7] in MyH3DLoad integriert. Dadurch ist es dem Benutzer möglich, die Registrierung auf seine persönlichen Bedürfnisse anzupassen, um eine qualitativ hochwertige Fusion von visueller Darstellung, haptischer Modalität und Realität zu ermöglichen.

3 Anwendung des Arbeitsplatzes

Als eine Anwendungsmöglichkeit wird im Folgenden auf den Einsatz des Augment'ables im Bereich Augmented Prototyping eingegangen.

Augmented Prototyping kommt größtenteils in der Produktentwicklung zum Einsatz, wobei die Optimierung von Abläufen zur Kostenersparnis und Effizienzsteigerung im Vordergrund steht. Der Benutzer kann z.B. im Design Review unterschiedliche visuelle Eigenschaften wie Farbe, Textur und Spiegelung über den halbdurchlässigen Spiegel

einblenden und gleichzeitig auch den physische Prototypen (z.B. als Clay-Modell) wahrnehmen. Weiterhin bietet der Augment'able die Möglichkeit, auf Oberflächen dreidimensionale Skizzen zu erzeugen (z.B. Einzeichnen von Sichtkanten, Schnittlinien).
Durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Darstellung von realen und virtuellen Bauteilen kann ein Konstrukteur am Augment'able testen, ob sich neue, am Computer entworfene Produkte in bereits vorhandene einbauen lassen. Die benötigte Anzahl an teuren und aufwändig herzustellenden physischen Prototypen kann gesenkt und Änderungsvorschläge schneller kommuniziert werden.
Der jeweilige Anwendungsfall entscheidet über die Anteile der computergenerierten und physischen Eigenschaften am hybriden Modell. In einigen Anwendungsfällen werden die Produkteigenschaften nur stark verkürzt durch einen physischen Prototyp dargestellt. Der physische Prototyp fungiert lediglich als Platzhalter. Die Material- und Oberflächendetails werden durch das virtuelle Modell dargestellt.

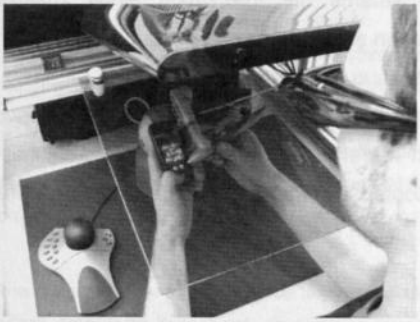


Bild 2: Design-Review eines Smartphones

Im Bild 2 ist die Nutzung des Augment'ables für das Design-Review eines Smartphones dargestellt. In diesem speziellen Anwendungsfall ist der Platzhalter ein Quader, welcher der ungefähren äußeren Form und dem Gewicht des Smartphones entspricht. Typischerweise wird das Smartphone mit der einen Hand gehalten und mit der anderen per Stift- oder Fingereingabe bedient. Das Display, die Gehäusedetails und die Tasten werden virtuell abgebildet. Somit kann der Benutzer eine Bedienungs- und Schnittstellenanalyse des Smartphones vornehmen, ohne dass dieses physisch existiert. In dem dargestellten Beispiel wird ein komplexes, virtuelles Modell in optimaler Weise mit einem stark

vereinfachten physischen Prototypen zu einem hybriden Modell kombiniert. Sehr leicht können damit Displayvarianten und Tastaturausführungen verglichen werden.

4 Fazit und Ausblick

Der realisierte multimodale MR-Desktop-Arbeitsplatz zeichnet sich durch seine niedrigen Anschaffungskosten (<6000€), seine Benutzerfreundlichkeit und sein großes Anwendungspotenzial aus.

Auf Basis der realisierten Lösung müssen nun Nutzungskonzepte konkretisiert und qualifizierte Anwenderstudien zum Verifizieren des Potenzials des Augment'ables durchgeführt werden. Um konkrete Anwendungsszenarien zu entwickeln, ist eine enge Zusammenarbeit mit Vertretern aus dem jeweiligen Anwendungsbereich notwendig. Im Weiteren sollen prozessbezogene Anforderungen abgeleitet um die gezielte Weiterentwicklung des Augment'ables zu unterstützen. Beispielsweise ist für die nächste Ausbaustufe des MR-Systems die Integration eines zusätzlichen Tracking-Gerätes geplant. Folgende Aufgaben sollen durch das Tracking-Gerät übernehmen werden:

- Blickrichtungserfassung des Benutzers
- Erfassen von Lageänderungen einzelner Hardware-Komponenten des MR-Systems

Somit wird die räumlich korrekte Anreicherung der Realität mit virtuellen Informationen unabhängig von der Kopfposition und der Lage der Hardware-Komponenten im MR-System ermöglicht.

Literatur

[1] Verlinden, J.; Horvath I.: A critical systems position on augmented prototyping systems for industrial design, IDETC/CIE 2007

[2] ARiSE-Projekt [Online]: http://www.arise-project.org, Stand: 30.07.2010

[3] DisplayObjects: Prototyping Functional Physical Interfaces on 3D Styrofoam, Paper or Cardboard Models, TEI 2010

[4] Bimber, O.; Raskar R.: Spatial Augmented Reality – Merging Real and Virtual Worlds. Wellesley; A K Peters, 2005 – ISBN 1-56881-230-2

[5] SensAble Technologies [Online]: http://www.sensable.com, Stand: 30.07.2010

[6] H3D Toolkit [Online]: http://www.h3dapi.org, Stand: 30.07.2010

[7] Candy [Online]: http://www.h3dapi.org/modules/mediawiki/index.php/Candy, Stand: 30.07.2010

Untersuchungen an vakuumgegossenen Kunststoff-Prüfkörpern unter Berücksichtigung der Anforderungen des Explosionsschutzes

Ramona Träger[1], Julia Hornig[2], Karl-Heinrich-Grote[1], Uwe Klausmeyer[2]

[1]Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg
Email: ramona.traeger@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/

[2]Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig
Email: julia.hornig@ptb.de; Internet: http://www.ptb.de

Inhalt: *Rapid-Prototyping-(RP)-Technologien finden eine immer größere Akzeptanz in der Produktentwicklung, mit der zunehmend eine Ausweitung ihres Einsatzbereiches einhergeht. So gehört die Anwendung von RP-Technologien in der Automobilentwicklung sowie in der Humanmedizin (z. B. Zahntechnik) bereits zum Stand der Technik. Seit 2005 wird untersucht, in wie weit die RP-Technologie im Explosionsschutz Anwendung finden kann. Im Rahmen dieser Untersuchungen sollen die Randbedingungen ermittelt werden, die einen derartigen Einsatz ermöglichen. Seit Anfang 2009 wird dieses Vorhaben durch die DFG im Forschungsprojekt „Anwendung der Rapid-Prototyping-Verfahren für Kleinserien im Explosionsschutz" gefördert.*

Zentrale Grundlage dieses Forschungsprojektes bildet die Forderung nach einer wirtschaftlicheren Fertigung von Gehäusen der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung", die aufgrund ihrer konstruktiven Anforderungen sehr aufwendig und materialintensiv zu konstruieren und zu fertigen sind. Vor diesem Hintergrund ist es Ziel des Projektes, eine Aussage über die Verwendbarkeit der Technologie „Vakuumgießen" für seriennahe Teile bzw. Serienteile in Abhängigkeit unterschiedlicher Spaltgeometrien und der verwendeten Werkstoffe treffen zu können. Hierfür werden sowohl einzelne Spalte als auch komplette Gehäuse aus den zu untersuchenden Kunststoffen gefertigt und den vorgeschriebenen Alterungs- und Explosionsprüfungen unterzogen. Die im Rahmen dieser Versuche ermittelten Ergebnisse sollen in diesem Beitrag vorgestellt und deren Bedeutung für die weitere Nutzung diskutiert werden.

Abstract: *Rapid Prototyping (RP) technologies are more and more accepted as a method to facilitate product development; by this the technology opens the doors for new application fields. In car development and human medicine the application of RP technologies has been introduced successfully during the last 10 years. Since 2005 research is ongoing in order to find a way to apply the RP technology for designing and manufacturing explosion protected equipment. Within the scope of these investigations practical conditions*

are explored to apply the RP technology for this kind of products. Since the beginning of 2009 this target is funded by the DFG in the research project „Application of the Rapid Prototyping Technology for customized products in the explosion protection". Main objective of this research project is to explore the option for a more economic manufacturing of enclosures designed in the type of protection "d" (flameproof). Products using this safety concept need much more material and have to be machined with highest precision caused by the fact that the enclosure has to withstand an internal explosion and the flameproof joints have to stop the flame propagation from the inside to the outside. Considering these complex requirements it is the aim of this project to validate the RP technology "vacuum casting" as an option to manufacture directly "d" type enclosures by using different materials and joint designs. The samples of modeled joints and enclosures are submitted to explosion tests in order to stress the material with explosion pressure and to erode the surfaces of joints by the flame trying to propagate from the inside to the outside of the enclosure. The results of these tests and the conclusion about the potentials of the "vacuum casting" technology for the production of small batches of flameproof enclosures are presented in this publication.

Stichwörter: *Rapid Prototyping, Polyjet-Technologie, Explosionsschutz, druckfeste Kapselung*

Keywords: *rapid prototyping, polyjet-technique, explosion protection, flameproof enclosure*

1 Einleitung

In dem hier vorgestellten DFG-geförderten Forschungsprojekt soll die Anwendung von Rapid-Prototyping-Verfahren für Kleinserien von explosionsgeschützten Gehäusen untersucht werden. Eine Forderung hierbei ist die wirtschaftlichere Fertigung von Gehäusen der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung", die aufgrund ihrer konstruktiven Anforderungen sehr aufwendig und materialintensiv zu konstruieren und zu fertigen sind. Für die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung" muss sichergestellt werden, dass derartige Gehäuse im Fehlerfall den im Innern auftretenden Explosionsdrücken dauerhaft standhalten sowie einen Flammenaustritt in die äußere Atmosphäre und somit deren Entzündung, den sogenannten Zünddurchschlag, sicher verhindern.

In Versuchsreihen des in [1] vorgestellten Forschungsvorhabens wurden Prüfkörper aus unterschiedlichen Vakuumgießharzen mit drei Spaltgeometrien im Hinblick auf die Fertigungsbedingungen des verwendeten RP-Verfahrens und das Explosionsschutzverhalten untersucht. In Bild 1 ist der Prüfaufbau dargestellt. Auf einen zylindrischen Behälter wird ein Deckel mit dem integrierten Prüfkörper aufgeschraubt. Die einzige Öffnung zur umgebenden Atmosphäre ist der konstruktiv vorgesehene Spalt im Prüfkörper. Der Behälter hat ein Volumen von max. 500 cm^3 und Anschlüsse zum Ein- und Auslass des explosionsfähigen Gas/Luft-Gemisches sowie für eine Zündquelle. Dieser

Behälter wird in einen Prüfkessel eingebracht. Die Zündung des explosionsfähigen Gasgemisches erfolgt über eine Zündkerze im Innern des Behälters. Die heißen reaktiven Abgase können nur über den zu untersuchenden Spalt entweichen. Hierbei darf kein Zünddurchschlag erfolgen, der die umgebende explosionsfähige Atmosphäre im Prüfkessel zündet.

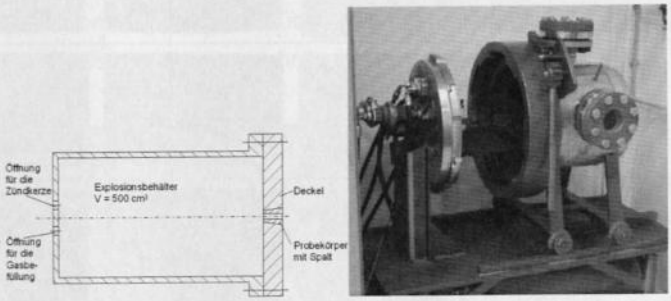


Bild 22: Versuchsaufbau; links: Prüfbehälter mit im Deckel integriertem Prüfkörper, rechts: PTB-Prüfkessel

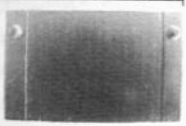
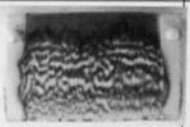
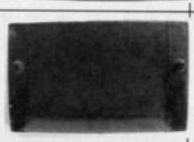
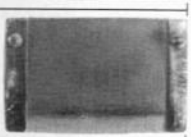
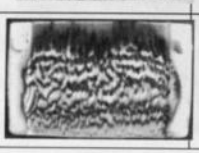
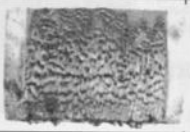
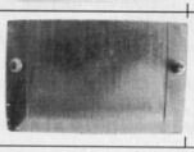
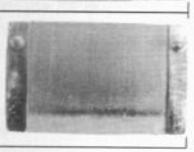
2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Spaltprüfkörper

Entsprechend [2] bestand die Forderung, das Erosionsverhalten von Spaltflächen aus Kunststoff nach 50 Explosionen zu ermitteln (Flammenerosionsversuche). Im Anschluss daran wurden die Prüfkörper noch 10 Prüfungen auf Zünddurchschlagssicherheit unterzogen. Der Test war bestanden, wenn kein Zünddurchschlag erfolgt war. Im weiteren Verlauf wurden die Tests an Prüfkörpern wiederholt, die zuvor einer Wärme- und Kältelagerung (Klimalagerung) gemäß [3] unterzogen wurden.

Jeder der Prüfkörper hat die Explosionstests bestanden, allerdings entsprachen ihre Spaltmaße bereits nach der Fertigung nicht den normativen Anforderungen. Im Einzelnen reagierten die verwendeten Materialien jedoch unterschiedlich (vgl. Tabelle 1). Die Hälfte der Materialien wies bereits nach der Klimalagerung leichte bis starke Verfärbungen auf und es kam vereinzelt auch zu Kristallbildungen auf den Spaltflächen. Nach den Flammenerosionsversuchen zeigte bereits jeder der Prüfkörper zumindest leichte bis starke Erosionsspuren. Ein Material fiel zusätzlich durch sein öliges Aussehen in der Spaltfläche auf.

Tabelle 5: Spaltprüfkörper vor und während der Flammenerosionsprüfungen am Beispiel zweier Materialien

	MG805FR (IIB, ebener Spalt)		Stobicast 598.86 (IIC, ebener Spalt)	
	Ohne Klimalagerung	Mit Klimalagerung	Ohne Klimalagerung	Mit Klimalagerung
Ausgangs-zustand				
Nach 25 Explo-sionen				
Nach 50 Explo-sionen				

2.2 Modellgehäuse

Eine Recherche über die grundlegenden konstruktiven Merkmale (Form, Größe, Gehäuseteilverbindungen) kommerziell erhältlicher druckfest gekapselter Gehäuse ergab, dass die meisten Gehäuse eine zylindrische oder quadratische Form aufweisen. Die dabei vorherrschenden Spaltarten sind zylindrische und ebene Spalte sowie Gewindespalte. Auf Grundlage dieser Recherche wurde festgelegt, zwei Gehäusegrundformen – zylindrisch und quaderförmig – zu konstruieren. Aufgrund der mechanischen Materialeigenschaften der vorliegenden Kunststoffe wird das Gehäusevolumen auf max. 100 cm^3 beschränkt. Das Gehäuse wird aus zwei Teilen – Gehäusedeckel und Gehäusegrundkörper – bestehen. Die Verbindung der Gehäuseteile erfolgt über umlaufende Flanschflächen, die mit Durchgangsverschraubungen verbunden werden. Zudem sind zwei Anschlüsse für den Gasein- und Gasaustritt sowie jeweils ein Anschluss für die Zündkerze und den Druckaufnehmer vorzusehen. Diese Anschlüsse werden aus Metall vorgefertigt und als Einlegeteile im Gehäuse mit vergossen.

Die Auslegung der Gehäuse erfolgte nach dem zu erwartenden Explosionsdruck von max. 12 bar mit einem Sicherheitsbeiwert von 5. Dieser Sicherheitsbeiwert berücksichtigt z. B. Fertigungs- und Temperatureinflüsse. Mit Hilfe einer FEM-Betrachtung wurden die

Konstruktionen überprüft. In Bild 2 sind die hierbei errechneten Verformungen unter der Annahme einer statischen Belastung durch den Explosionsdruck für die zylindrische Grundversion des Gehäuses abgebildet. Infolge der FEM-Betrachtung mussten Änderungen an den Anschlüssen vorgenommen werden: eine Trennebene wurde aus der Mitte herausgenommen und Deckel und Boden wurden versteift. Die so entwickelten Modelle für den Formenbau wurden über das Polyjet-Verfahren auf der Objet-Eden-Anlage des Lehrstuhls Konstruktionstechnik gefertigt (siehe Bild 3).

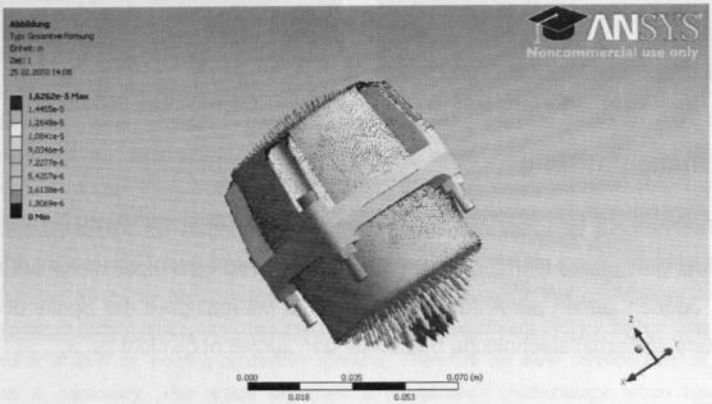


Bild 23: FEM-Betrachtung am zylindrischen Gehäuse

Im weiteren Fortgang des Projektes werden die Modellgehäuse dem regulären Prüfablauf für die Explosionsgruppe IIC gemäß [2] unterzogen:

1. Gehäuse ohne Klimalagerung:
   - Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes (Bezugsdruck),
   - Zünddurchschlagsprüfung,
2. Gehäuse mit Klimalagerung:
   - Schlagprüfung an zwei Stellen mit jeweils 7 J,
   - Überdruckprüfung mit dem 1,5-Fachen bzw. 4-Fachen des Bezugsdruckwertes,
   - Flammenerosionsprüfung,
   - Zünddurchschlagsprüfung.

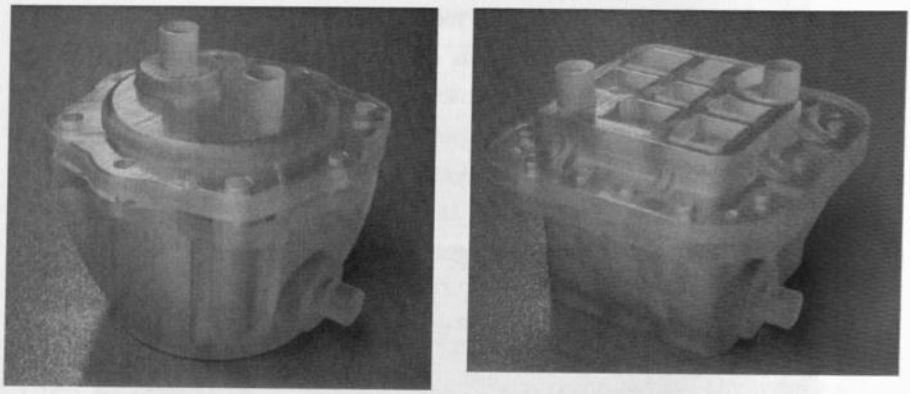


Bild 24: Objet-Urmodelle des zylindrischen und quaderförmigen Gehäuses

3 Zusammenfassung

Die RP-Technologie ist unter bestimmten Randbedingungen als Konstruktionsverfahren für druckfest gekapselte Gehäuse aus Sicht des Explosionsschutzes sicherheitstechnisch geeignet. Jedoch lassen die Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Spalte den Einsatz ohne weitere sicherheitstechnische Betrachtungen zurzeit noch nicht zu.

Literatur

[1] Träger, Ramona; Grote, Karl-H.; Klausmeyer, Uwe; Engelmann, Frank: Anwendung der Rapid-Prototyping-Technologie für Kleinserien im Explosionsschutz. In: Brökel, Klaus (Hrsg.); Feldhusen, Jörg (Hrsg.); Grote, Karl-H. (Hrsg.); Rieg, Frank (Hrsg.); Stelzer, Ralph (Hrsg.): Vernetzte Produktentwicklung: Methoden und Werkzeugkopplung. KT2009. 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Bayreuth: Universität, 2009, S.32-39 – ISBN 978-3-00-028222-5.

[2] DIN EN 60079-1 (VDE 0170-5): 2008-04: Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung "d" (IEC 60079-1:2007); Deutsche Fassung EN 60079-1:2007.

[3] DIN EN 60079-0 (VDE 0170-1): 2010-03: Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 0: Geräte - Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2007); Deutsche Fassung EN 60079-0:2009.

Unterstützung des Konstrukteurs beim Re-Use von Produktionsanlagen

Waldemar Walla

Daimler AG, Group Research & Advanced Engineering
Wilhelm-Runge-Str. 11, 89081 Ulm
Email: waldemar.walla@daimler.com; Internet: http://www.daimler.com

Inhalt: *Der Trend zur Individualisierung von Produkten ist vor allem in der Automobilindustrie sehr gut erkennbar. Da sich gleichzeitig die Produktlebenszyklen verkürzen und die Marktdynamik wächst, gestaltet sich eine kostengünstige Produktion problematisch. Um die Produktionskosten zu senken, versuchen viele Automobilhersteller neue Fahrzeugtypen in standardisierte und im Idealfall in bestehende Produktionsanlagen zu integrieren. Hierfür bedarf es einer frühzeitigen Berücksichtigung von Produktionsanforderungen. Im Rahmen des Beitrags wird eine Berechnungsmethode vorgestellt, die dem Konstrukteur den Zugänglichkeitsraum einer Produktionsanlage aufzeigt.*

Abstract: *The trend of product individualisation can be seen especially in the automotive industry. Because of shorter product life cycles and increasing market dynamics a competitive cost-optimal production is needed. In order to reduce production costs the automotive manufacturers try to integrate new vehicles in standardised or at best on existing production systems. Therefore an early consideration of production requirements is necessary. This article describes a computation methodology which visualises the accessibility space of a production system to the product developer.*

Stichwörter: *Reuse von Produktionsanlagen, Digitale Fabrik, CAD, Karosserierohbau*

Keywords: *Reuse of Production equipment, Digital Factory, CAD, Body in White*

1 Einleitung

Durch Globalisierung öffnen sich der Automobilindustrie neue Absatzmärkte, gleichzeitig verstärkt sich jedoch der internationale Wettbewerbsdruck. Durch regionale unterschiedliche Produktanforderungen und gesetzliche Bestimmungen ist eine immer stärkere Individualisierung der Produkte zu erkennen [1]. Deshalb müssen sich die Automobilhersteller immer stärker an Kundenanforderungen orientieren und ihre Produktportfolios durch eine immer größer werdende Variantenvielfalt erweitern. Allein 2008 sind in der Automobilindustrie weltweit schätzungsweise 3000 neue Modelle und Modellvarianten auf den Markt gekommen [2]. Eine Strategie zur Beherrschung der hohen

Produktvarianz in der Automobilproduktion ist die Integration von mehreren Produkten auf einer Produktionslinie. Dies stellt allerdings eine enorme Herausforderung an den Karosserierohbau dar, da durch den hohen Automatisierungsgrad der Anlagen große Investitionskosten verbunden sind. Sollen mehrere Produkte, die nacheinander auf den Markt kommen, auf einer Produktionslinie gefertigt werden, so müssen Anforderungen der Produktionsanlagen möglichst frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden [3].

Um zeitaufwendige Umbaumaßnahmen der Produktionssysteme zu vermeiden, muss unter anderem die Geometrie der Produktionsressourcen in den Konstruktionsprozess der Produkte berücksichtigt werden. Hierzu wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, mit deren Hilfe dem Konstrukteur die Zugänglichkeitsräume einer Produktionsanlage im CAD-System dargestellt werden. Mit anderen Worten, dem Konstrukteur wird noch vor der Definition von Fertigungsoperationen der Raum auf dem Bauteil sichtbar gemacht, innerhalb dessen die Anlage Fertigungsoperationen durchführen kann. Am Beispiel von Widerstandspunktschweißanlagen heißt dies, dass der Konstrukteur sieht, wo er Schweißpunkte auf dem Bauteil platzieren darf. Setzt er einen Punkt außerhalb des zugänglichen Bereichs, so wird dies einen Umbau der Produktionsanlage zur Folge haben. Idealer Weise wird er die Schweißpunkte innerhalb des zugänglichen Bereichs setzen und somit wird ein Umbau der Produktionsanlage vermieden.

2 Notwendigkeit einer engen Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung

Bei der Planung von Produktionsanlagen kommen heute viele unterschiedliche Werkzeuge der Digitalen Fabrik zum Einsatz [4]. Allerdings werden derzeit die Tools der Digitalen Fabrik meistens erst in der Serienentwicklung in der Produktionsplanung zur Produktabsicherung eingesetzt. Dies hat zur Folge, dass produktionsbezogene Probleme sehr spät im Produktentwicklungsprozess erkannt werden [1]. Die Lösung dieser Probleme kann sehr kostspielig sein, da eine konstruktive Änderung des Produkts zu diesem Zeitpunkt oftmals nicht mehr möglich ist.

Soll ein neues Produkt oder Produktvariante auf einer existierenden Produktionsanlage gefertigt werden, so müssen Anforderungen aus der Produktion möglichst frühzeitig in der Produktentwicklung berücksichtigt werden (vgl. Bild 25). Da die existierende

Produktionsanlage bereits im Betrieb ist, sind die Ergebnisse der Produktionsplanung dieser Anlage die Grundlage für die Entwicklung des neuen Produkts. Um den Aufwand für die Umbaumaßnahmen möglichst gering zu halten, muss die Produktionsplanung schon zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses an der Produktgestaltung beteiligt sein. Dadurch wird unter anderem vermieden, dass frühere fertigungsbezogene Probleme nicht erneut im Entwicklungsprozess auftauchen [5]. Nicht nur Anforderungen aus der Produktion sondern aus allen Phasen des Produktlebenszyklus müssen bei der Konstruktion von neuen Produkten berücksichtigt werden [6]. Dies macht eine Unterstützung des Konstrukteurs notwendig [7]. In Bild 25 sind einige Beispiele für Informationen aufgelistet, die zwischen der Produktentwicklung und der Produktionsplanung ausgetauscht werden müssen. Auf den ersten Blick sind Informationen bezüglich Fabriklayout, Geometrie der Produktionsressourcen oder Auslastung der Produktionsanlagen nicht relevant für den Produktentwickler. In der Regel hat der Produktentwickler nicht die Erfahrung und das Wissen des Produktionsplaners und kann damit die Anforderungen einer bestehenden Produktionsanlage nicht in den Produktentwicklungsprozess einbeziehen. An dieser Stelle bedarf es einer Unterstützung des Produktentwicklers. Die Produktionsinformationen müssen dem Konstrukteur „übersetzt" und möglichst verständlich dargestellt werden.

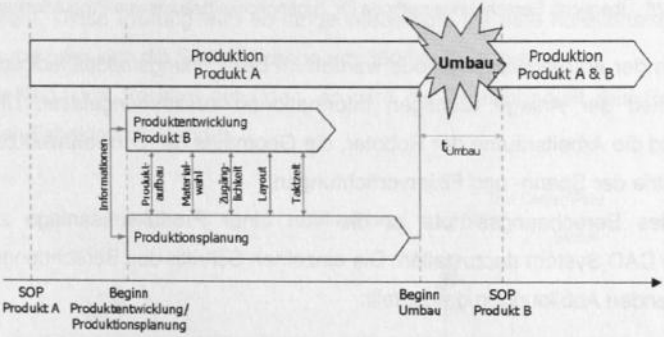


Bild 25: Informationsaustausch zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung

Im Rahmen des Beitrags wird eine Berechnungsmethode vorgestellt, mit dessen Hilfe der Zugänglichkeitsraum einer Produktionsanlage im CAD-System visualisiert wird.

3 Berechnung von Zugänglichkeitsräumen einer Produktionsanlage

Grundlage für die entwickelte Methode ist das digitale Modell der real existierenden Produktionsanlage (vgl. Bild 26). Soll ein neues Produkt auf einer bereits existierenden Produktionsanlage gefertigt werden, so kann davon ausgegangen werden, dass bereits ein digitales Abbild der realen Anlage vorhanden ist. Dieses sollte auch im Produktentwicklungsprozess des neuen Produkts berücksichtigt werden. Allerdings sind nicht alle Informationen aus dem digitalen Abbild der Produktionsanlage in der Konstruktionsphase des neuen Produkts notwendig. Viele Informationen, wie beispielsweise Steuerungstechnik oder Roboterprogramme, sind zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess für den Produktentwickler nicht von Interesse. Aus diesem Grund werden die wichtigsten Informationen für die Produktentwicklung in einem so genanten Berechnungsmodell zusammengefasst.

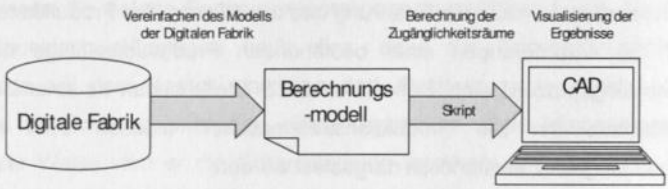


Bild 26: Übersicht: Berechnungsmethode für Zugänglichkeitsräume von Produktionsanlagen

Im Rahmen der erarbeiteten Methode werden im Berechnungsmodell lediglich die für die Zugänglichkeit der Anlage wichtigen Informationen zusammengefasst. Dies sind die Position und die Arbeitsräume der Roboter, die Geometrie der Schweißwerkzeuge und die Störgeometrie der Spann- und Fixiervorrichtungen.

Aufgabe des Berechnungsskripts ist die von einer Produktionsanlage zugänglichen Flächen im CAD System darzustellen. Die einzelnen Schritte des Berechnungsskripts sind in den folgenden Abbildungen dargestellt:

Bild 27: Die einzelnen Schritte des Berechnungsskripts

Im ersten Schritt wird der zu untersuchende Bereich festgelegt. Dabei werden gleichmäßig verteilte Hilfspunkte auf der zu untersuchenden Fläche erzeugt. Basierend auf den Punkten wird die Flächennormale durch den Punkt ermittelt und abgespeichert.

Im zweiten Schritt wird die Zugänglichkeitsuntersuchung durchgeführt. Zunächst wird das Roboterwerkzeug auf einem der Hilfspunkte platziert. Dabei wird die Schweißzange so positioniert, dass sich der Hilfspunkt zwischen den Schweißkappen befindet und die Schweißzange an der dazugehörigen Flächennormale ausgerichtet ist. Im nächsten Schrit wird eine kollisionsfreie Position der Schweißzange gesucht. Hierfür wird das Werkzeug i 10°-Schritten um die Flächennormale gedreht und anschließend auf Kollision mit den Bauteil und den anderen Störgeometrien, wie beispielsweise der Spann- und Fixiervorrichtung, geprüft. Wird eine Kollision erkannt, so wird die Schweißzange erneut um 10° gedreht. Diese Prüfung wird so lange wiederholt, bis eine kollisionsfreie Position gefunden wurde oder sich die Schweißzange um 360° gedreht hat.

Wird eine kollisionsfrei Position gefunden, so wird die Erreichbarkeit des Roboters, im vorgegebenen Fabriklayout, geprüft.

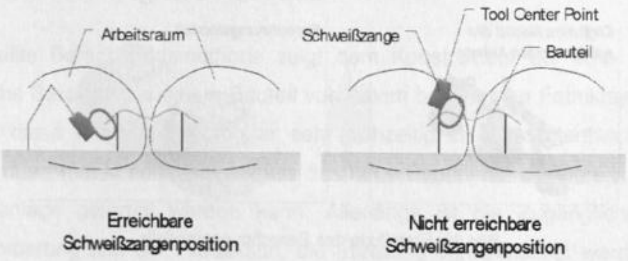


Bild 28: Prüfung der Erreichbarkeit eines Roboters

Für die Prüfung, ob ein Roboter die zuvor ermittelte kollisionsfreie Position der Schweißzange erreichen kann, ist der Arbeitsraum des Roboters notwendig (vgl. Bild 28). Liegt der so genannte Tool Center Point der Schweißzange im Arbeitsraum des Roboters, so ist dieser erreichbar (vgl. Bild 28 links). Dies ist eine einfache und schnelle Methode um in einer frühen Phase einschätzen zu können, ob ein Schweißpunkt erreichbar ist oder nicht. Sollte der Tool Center Point nicht im Arbeitsraum des Roboters liegen, so ist diese Schweißzangenposition nicht erreichbar (vgl. Bild 28 rechts). In diesem Fall muss eine andere kollisionsfreie Position der Schweißzange gefunden werden. Lässt sich keine kollisionsfreie Schweißzangenposition finden, deren Tool Center Point im Arbeitsraum eines Roboters liegt, so muss die Position des Roboters im Fabriklayout geändert werden. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der Berechnung farblich dargestellt. Zugängliche Bereiche auf dem Bauteil werden grün und die unzugänglichen Bereiche rot eingefärbt. Bei der Definition der Schweißpunkte sieht der Konstrukteur sofort, wo er die Schweißpunkte platzieren darf.

4 Beispiel: Schweißzelle

Die Berechnungsmethode wird am Beispiel einer Schweißzelle aus dem automobilen Karosserierohbau demonstriert. In dieser Zelle wird das Innenteil einer Fahrzeugtür mit Hilfe von zwei Robotern, an denen jeweils eine Schweißzange hängt, verschweißt. Die Tür liegt in einer Konzeptvorrichtung, die die Zugänglichkeit der Anlage deutlicht einschränkt (vgl. Bild 29 links). Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, wird im ersten Schritt das Berechnungsmodell aufgebaut. In Bild 29 auf der rechten Seite sind die Arbeitsräume der Roboter und die dazugehörigen Werkzeuge zu sehen.

Bild 29: Erstellung des Berechnungsmodells

Auf der Grundlage des Berechnungsmodells wird im CAD-System mit Hilfe des Berechnungsskripts der Zugänglichkeitsraum errechnet und visualisiert. Für ausgewählte

Flächen auf der Fahrzeugtür ist das Ergebnis der Berechnung in Bild 7 zu sehen. Dabei sind die nicht zugänglichen Bereiche rot und die zugänglichen Bereiche grün eingefärbt. Wird die Zugänglichkeit einer Produktionsanlage dem Konstrukteur auf diese Weise sehr früh im Produktentwicklungsprozess dargestellt, so kann er ohne einen großen Aufwand die Zugänglichkeit berücksichtigen und somit das Produkt bezüglich Produktionsanforderungen beeinflussen. Die Schweißpunkte wird der Konstrukteur in den zugänglichen Bereichen definieren und falls ein Schweißpunkt beispielsweise aus Gründen der Festigkeit in einem unzugänglichen Bereich notwendig ist, kann der Konstrukteur den Produktionsplaner sehr frühzeitig darüber informieren. Die notwendigen Umbaumaßnahmen können dann von der Produktionsplanung frühzeitig eingeleitet werden.

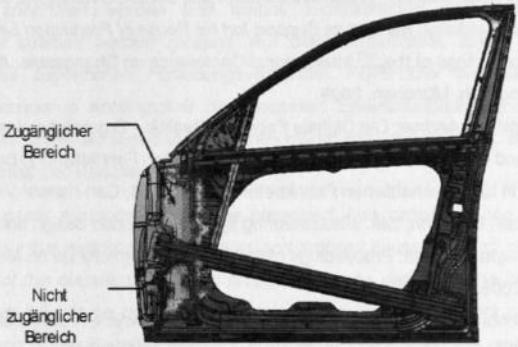


Bild 7: Beispiel für eine Zugänglichkeitsuntersuchung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Berechnungsmethode zeigt dem Konstrukteur auf eine sehr einfache Weise, welche Bereiche auf einem Bauteil von einem bestimmten Fabriklayout erreichbar sind. Durch diese Information kann er sehr frühzeitig im Produktentwicklungsprozess Einfluss auf das Produkt nehmen, so dass das neue Bauteil auf der bereits existierenden Produktionsanlage gefertigt werden kann. Allerdings ist die Zugänglichkeit nicht die einzige Anforderung aus der Produktion, die frühzeitig berücksichtigt werden muss. Die Fügefolge, die Auslastung der einzelnen Produktionsressourcen und die Materialwahl sind weitere Faktoren, die unbedingt berücksichtigt werden müssen. Um auch die anderen

Anforderungen im Konstruktionsprozess zu berücksichtigen, bedarf es einer geschickten Unterstützung des Produktentwicklers. Zukünftig müssen weitere Methoden entwickelt werden, um alle Anforderungen aus der Produktion und Produktionsplanung zu berücksichtigen.

Literatur

[1] Brockmeyer, Henrich; Lucko, Andreas; Mantwill, Frank: *Erweiterte Startmodelle zur Produktbeeinflussung in der Karosserie aus Sicht der Produktionsplanung.* In Tagungsband 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Aachen, 2008.

[2] Rooks, Tobias: Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation Technische Universität Clausthal, 2009.

[3] Sranev, Stilain; Prieur, Michael; Walla, Waldemar; Pölz, Stefan; Ovtcharova, Jivka: *Production-oriented Product Validation Method as Support fort he Reuse of Production Lines in the Automotive Industry.* In: Proceedings of the 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, München, 2009.

[4] Bracht, Uwe; Spillner, Andrea: Die Digitale Fabrik ist Realität - Ergebnisse einer Umfrage zum Umsetzungsstand und zu weiteren Entwicklung der Digitalen Fabrikplanung bei deutschen OEM. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Jahrg. 104, Carl Hanser Verlag, München, 2008.

[5] Andersson, Petter; Isaksson, Ola: *Manufacturing system to support design and reus of manufacturing experience.* In: Proceedings of the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Tokyo, Japan, 2008.

[6] Schuh, G.; Wemhöner, N.; Friedrich, Ch.: Scenario-based Lifecycle Analysis of Manufacturing Systems. In: CIRP Journal of Manufacturing Systems. Band 35, 2006.

[7] Weyand, Lars; Bley, Helmut; Kaiser, Jan-Martin; Meißner, Robert; Bär, Thomas: *Production Oriented Design-Checks in Car Manufacturing – Not Only a Question of Powerful Validation Tools.* In: Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering Innovative and Cognitive Production Technology and Systems, Naples, Italy, 2008.

Absicherungsorientierte Klassifizierung von Eigenschaften in der Anforderungsklärung

Christoph Westphal, Christina Stöber, Hartmut Krehmer, Sandro Wartzack

Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Martensstr. 9, 91058 Erlangen
Email: westphal@mfk.uni-erlangen.de; Internet: http://mfk.uni-erlangen.de

Inhalt: *In diesem Beitrag wird ein Vorgehen dargestellt, wie durch die Klassifizierung von Eigenschaften eine Unterscheidung zwischen initialen Kundenanforderungen und prozessbedingten Produkteigenschaften getroffen werden kann. Daraus resultiert die Erkenntnis, welche Produkteigenschaften in der Anforderungsklärung spezifiziert werden und welche Eigenschaften erst während des laufenden Entwicklungsprozesses definiert werden müssen. Auf dieser Erkenntnis, sowie den Ergebnissen des Abschlussberichtes des bayerischen Forschungsverbundes FORFLOW aufbauend, kann somit der Produktabsicherungsprozess in Abhängigkeit des gesamten Entwicklungsprozesses aufgezeigt werden. Diese Zusammenhänge sollen als regelbasierte Verknüpfung von Informationen, beispielsweise mit Hilfe einer Ontologie, dargestellt und visualisiert werden.*

Abstract: *Within this paper a proposal should be presented, how properties can be distinguished by a defined classification in initial customer requirements and process caused product requirements. Therefore the insight results out of this classification, which properties can be defined at the beginning of the product development and which have to be defined concurrently during the development process. Combining the results of the final report of the Bavarian research association FORFLOW, the product evaluation can be shown in dependence of the whole development process. These interactions should be visualized as rule based conjunction of information, for example by using an ontology.*

Stichwörter: *Produktentwicklungsprozess, Eigenschaften, DfX, Ontologien*

Keywords: *product development process, properties, DfX, ontology*

1 Einleitung

Ausgangsbasis eines zielgerichteten Produktentwicklungsprozesses ist nach SEIFFERT ein klares Eigenschaftsprofil des zu entwickelnden Produktes, welches sich an den Bedürfnissen und Wünschen des Kunden orientiert [1]. Mit einem solchen klar definierten Eigenschaftsprofil kann der Entwicklungsprozess zielgerichtet gesteuert und die

Entwicklungsstände immer wieder im Sinne einer Erfassung des Produktreifegrades gespiegelt und überwacht werden.

Um allerdings ein solches Eigenschaftsprofil als Leitfaden für die Produktentwicklung verwenden zu können, müssen drei wesentliche Aspekte betrachtet werden:

Eigenschaften müssen spezifiziert und mit Zielwerten verknüpft werden

Eigenschaften müssen mit Bewertungsmethoden verknüpft werden

Bewertungsmethoden müssen zeitlich in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet werden

Nach dem Stand der Technik in Kapitel 2 soll daher in diesem Beitrag vorgestellt werden, wie mittels einer Klassifizierung die drei genannten Verknüpfungen unterstützt und zielgerichtet durchgeführt werden können (Kapitel 3). Diese Klassifizierung trägt entscheidend dazu bei komplexe Zusammenhänge in der Produktentwicklung transparenter zu gestalten und zu untersuchen. Eine ungenügend erfüllte Eigenschaft wie etwa beispielweise Sicherheitsaspekte bei einem Fahrzeug erfordert die Änderung des Längsträgers. Diese ist jedoch beispielsweise wiederum Abhängig von der Recyclingstrategie als auch der Fertigungsstrategie, welche parallel zur laufenden Entwicklung definiert wird usw. Neben dieser Klassifizierung soll daher in Kapitel 4 eine Möglichkeit zur Dokumentation und Visualisierung jener Zusammenhänge für die Entwickler aufgezeigt werden. Damit soll es letztendlich gelingen die Produktentwicklung in ihrer gesamten Komplexität abzubilden und daraufhin die Reihenfolge der Prozessschritte zu optimieren.

2 Stand der Technik

Um diese Methodik erläutern zu können, werden zunächst einige grundlegende Begrifflichkeiten definiert. So können in einem Eigenschaftsprofil grundsätzlich drei Elemente unterschieden werden: Funktionale Eigenschaften beschreiben geforderte Funktionen und somit die geforderte Transformation von Eingangsgrößen bzw. -zuständen in Ausgangsgrößen bzw. -zustände. Nichtfunktionale Eigenschaften hingegen beschreiben das Verhalten sowie ästhetische Eigenschaften. Zusätzlich werden unter nichtfunktionalen Eigenschaften auch Fertigungs-/Montage-/Prüfgerechtheit, Umweltgerechtheit, Nutzungsgerechtheit und Recyclinggerechtigkeit verstanden, also Aspekte, die aus den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen resultieren [2]. Kennzeichnend für diese aus dem

Produktlebenszyklus resultierenden Eigenschaften ist, dass sie nicht zur eigentlichen Funktionalität des Produktes beitragen, sondern Basisfaktoren im Sinne des KANO-Modells darstellen [3]. Als Hygienefaktoren wirkt somit eine Übererfüllung nicht wertsteigernd, wie es das Beispiel der Fertigungsgerechtheit verdeutlicht. Hier muss nur die grundsätzliche Erfüllung der Fertigungsgerechtheit sichergestellt werden, eine Übererfüllung muss jedoch nicht angestrebt werden. Im Gegensatz dazu können sowohl funktionale Eigenschaften als auch nichtfunktionale Eigenschaften, welche das Verhalten oder die Ästhetik des Produktes beschreiben grundsätzlich Leistungs- oder Begeisterungsfaktoren sein und demnach linear oder progressiv zur Erfüllung des Kundenwunsches beitragen.

Diese Eigenschaften werden in Merkmale übersetzt, welche die „Stellschrauben" darstellen, mit denen das Produkt vom Entwickler definiert und direkt beeinflusst werden kann [2]. Somit können unter Merkmalen auch die Parameter eines Produktes verstanden werden.
Daher stellt ein Eigenschaftsprofil im Sinne des Anforderungsmanagements die Vorgabe von zu erfüllenden nichtfunktionalen Eigenschaften oder Merkmalen eines Produktes, Bauteils oder auch einer Baugruppe oder die Vorgabe zur Verwendung vorhandener Lösungen (funktionale Eigenschaften) dar [4].

3 Absicherungsorientierte Klassifizierung von Eigenschaften in der Anforderungsklärung

Nach WESTPHAL und STÖBER müssen die Anforderungsklärung, die daraus abgeleitete Eigenschaftsspezifizierung und die Eigenschaftsbewertung stringent miteinander gekoppelt und synchronisiert werden, um eine stetige Erfüllung des Eigenschaftsprofils im Sinne eines eigenschaftsbasierten Produktreifegrades darzustellen [7, 8]. Dies erfordert eine Zuordnung von Bewertungs- und Evaluierungsverfahren zu den entsprechenden, geforderten Eigenschaften des Profils. Hierzu soll in diesem Beitrag eine zweidimensionale Klassifizierung des Eigenschaftsprofils vorgeschlagen werden(Bild 1und Bild 2):
Einerseits können Eigenschaften gemäß des KANO-Modells klassifiziert werden. Leistungs- und Begeisterungseigenschaften werden initial während der Produktplanung

festgelegt und anschließend nur auf Basis der aktuellen Marktentwicklung modifiziert. Zusätzlich besitzen sie eine klare Optimierungsrichtung zur Wertsteigerung des Produktes. Basiseigenschaften hingegen können prozess- und lösungsabhängig sein und können daher erst zu den entsprechenden Prozessschritten spezifiziert werden [5, 6]. Da sie nicht wertsteigernd wirken, müssen hier klare Schwellenwerte für diese Eigenschaften definiert werden. Somit können diese Basiseigenschaften als zu erfüllende Randbedingungen für den Entwickler aufgefasst werden.

Bild 1: Klassifizierung von Anforderungen nach KANO

Andererseits können Eigenschaften gemäß der in Kap. 2 definierten Typisierung unterschieden werden. Daraus kann der Typ des Zielwertes abgeleitet und somit die Art der Bewertungsmethodik definiert werden. Anhand dieser Klassifizierung kann funktionalen Eigenschaften ein „digitaler" (ja/nein) Zielwerttyp zugeordnet werden. So wird ausschließlich definiert, ob eine funktionale Eigenschaft implementiert wird oder nicht, dementsprechend wird nur bewertet, ob die Funktionserfüllung gewährleistet ist oder nicht. Eine Güte der Funktionserfüllung wird hierbei nicht bewertet. Bei einem Fahrerassistenzsystem beispielsweise wird eine Schildererkennung wird implementiert oder nicht, die Frage der Erkennungsrate, wie viele Schilder erkannt werden steht hier im Hintergrund. Nichtfunktionale Eigenschaften hingegen besitzen einen „analogen" Zielwerttypen. Daher muss mittels Bewertungsszenarien und Bewertungskriterien eine Güte der Verhaltenserfüllung oder auch der Ästhetik bewertet werden. So wird der Akustikkomfort beispielsweise anhand des Schallpegels im Leerlauf gemessen. Merkmale wie etwa die Kopffreiheit können direkt auf Konstruktionsparameter (Höhe Sitz und Höhe

Gesamtfahrzeug) referenziert werden. Dementsprechend erfolgt hier keine Bewertung sondern nur eine Überprüfung der korrekten Umsetzung der Merkmale.

Bild : Klassifizierung von Anforderungen nach Eigenschaftsart

Gemäß dieser Klassifizierung kann klar dargestellt werden, wann im Entwicklungsprozess Eigenschaften spezifiziert werden können bzw. müssen und welche Zielwerttypen diesen Eigenschaften zugeordnet werden müssen. Die Zielwerte von nichtfunktionalen Basiseigenschaften wie beispielsweise Recyclingquote (in Gewichtsprozent) eines Produktes sind unabhängig vom Entwicklungsprojekt definiert und müssen daher zu den gängigen Meilensteinen bewertet werden, funktionale Begeisterungseigenschaften hingegen müssen eigens für jedes Entwicklungsprojekt definiert werden (z.B. Fahrerassistenzsysteme). Basismerkmale wie beispielsweise Getriebeohren, die zum Transport der Getriebeeinheit benötigt werden, können dagegen erst nach der Auswahl des Transportgreifers spezifiziert werden, müssen dagegen auch nur einmal im Prozess abgesichert werden. So können nun diese Eigenschaften mit Bewertungs- bzw. Absicherungsmethoden verknüpft werden. Zusätzlich kann unterschieden werden, ob die Zielwerte initial zu Beginn der Produktplanung spezifiziert, oder ob sie während des Entwicklungsprozesses in Abhängigkeit der Lösungs- und Konzeptentscheidungen spezifiziert werden müssen.

4 Einordnung in das Netzwerk „Produktentwicklung"

Aufgrund der Klassifizierung von Eigenschaft nach den in Kapitel 3 genannten Ordnungskriterien sowie deren prozessualer Einordnung resultiert ein Netzwerk mit welchem es möglich ist die Komplexität der Produktentwicklung abzubilden und den Entwicklern die notwendige Unterstützung z.B. Methoden zum richtigen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung zu stellen. Da die Relationen dieses Netzwerkes durch eine Vielzahl an Regeln („Wenn es sich um ein Merkmal „Kopffreiheit" handelt, muss es durch die Methode „DMU" abgesichert werden") beschrieben werden, reichen herkömmliche Methoden zur Objektmodellierung nicht aus. Daher soll die in Kapitel 3 beschriebene zweidimensionale Klassifizierung und die Zuordnung der unterschiedlichen Eigenschaftstypen sowohl zu entsprechenden Prozessschritten als auch zu passenden Bewertungsmethoden im Folgenden mit Hilfe einer Ontologie dargestellt und visualisiert werden. Dies ermöglicht eine mehrdimensionale Einordnung der Eigenschaften sowohl in Prozessschritte als auch in Bewertungsmethoden und Eigenschaftsklassen. Zudem können Eigenschaften direkt als Ein- bzw. Ausgangsgrößen den entsprechenden Methoden zugeordnet werden. Die Attribute der Eigenschaften, die Bewertungsszenarien, die Bewertungskriterien sowie die Zielwerttypen und Zielwertausprägungen werden als *DataProperties* an die entsprechenden Eigenschaften angehängt. Daraus entsteht letztendlich ein mehrdimensionales Netzwerk des Entwicklungsprozesses, welches nun je nach Betrachtungsfokus (prozessual, absicherungsorientiert, ...) visualisiert und ausgewertet werden kann (Bild 3).

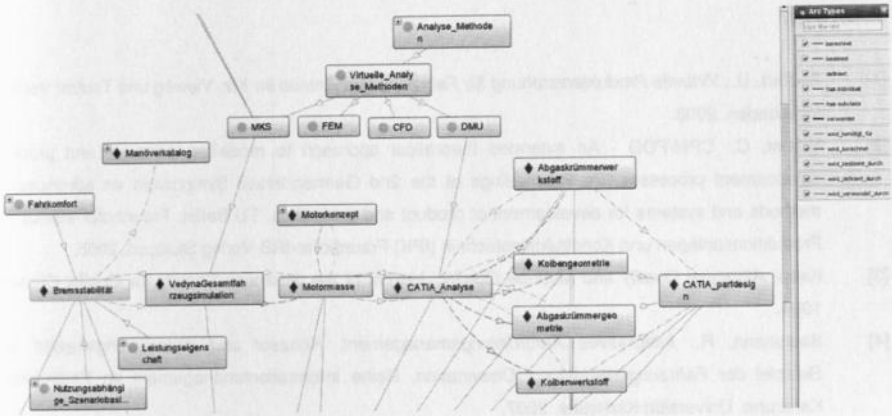


Bild 3: Ontologie zur Abbildung der Eigenschaftsbewertung

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde anhand einer bewertungs- und absicherungsorientierten Klassifizierung von Eigenschaften aufgezeigt, wie unterschiedliche Zielwerttypen und Ausprägungen Eigenschaften zugewiesen werden können. Zudem ermöglicht diese Klassifizierung eine Aussage über den Zeitpunkt der Zielwertspezifizierung in Abhängigkeit des Prozessverlaufes. Somit können die drei wesentlichen Schritte einer eigenschaftsbasierten Produktentwicklung abgebildet werden: Spezifizierung der Eigenschaften, Verknüpfung der Eigenschaften mit Bewertungsmethoden sowie die zeitliche Einordnung der Bewertungsmethoden in den Entwicklungsprozess. Durch das Einbringen der Bedingungen für die jeweiligen Verknüpfungen gelingt eine Abbildung eines realen Entwicklungsprozesses, der somit je nach Fokus untersucht werden kann. So ermöglicht die graphische Visualisierung und Dokumentation dieses Netzwerkes eine Analyse für die Produktentwickler, welche Eigenschaften durch welche Methoden abgesichert werden, und in welche Methode in welchem Prozessschritt eingesetzt werden kann.

Literatur

[1] Seiffert, U.: *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz.* Vieweg und Teuber Verlag. Wiesbaden. 2008.

[2] Weber, C.: CPM/PDD - An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In: Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on advances in methods and systems for development of product and processes. TU Berlin. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) Fraunhofer-IRB-Verlag Stuttgart. 2005.

[3] Kano: *Attractive Quality and Must-be Quality.* Journal of the Japanese Society for Quality Control. 1984.

[4] Bachmann, R.: *Integratives Anforderungsmanagement, Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung.* Dissertation. Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe. Universität Karlsruhe. 2007.

[5] Meerkamm/Henrich/Jablonski/Krcmar/Lindemann/Rieg: Flexible Prozessunterstützung in der Produktentwicklung: Prozesse – Daten – Navigation. Shaker Verlag. Aachen. 2009.

[6] Bauer: Entwicklung eines Werkzeuges zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X. Dissertation. Erlangen. 2009.

[7] Stöber/Westphal/Krehmer/Wartzack: *Integration of customers' requirements and DfX-aspects and the degree of maturity in a property based framework.* Angenommener Beitrag zur 10. International Design Conference - DESIGN 2010. Dubrovnik. 2010.

[8] Westphal/Krehmer/Paetzold/Wartzack/Meerkamm: *Potentiale einer eigenschaftsbasierten Produktbeschreibung.* 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2009. Bayreuth. 2009.