Tagungsband

Klaus Brökel, Ralph Stelzer, Jörg Feldhusen,

Frank Rieg, Karl-Heinrich Grote

9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011

Integrierte Produktentwicklung

für einen globalen Markt

am 06.und 07.Oktober 2011

in Rostock

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0381-9
ISSN 0945-0831

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

Vorwort

Die Konstruktionstechnik in Theorie und Praxis bedeutet im Jahr 2011 eine methoden- und computerintegrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt. Durch die Verknüpfung und Anwendung zahlreicher numerischer, analytischer und experimenteller Werkzeuge erfolgt in der Wirtschaft die Suche nach technisch optimal gestalteten und marktgerechten Produkten. In vielen Bereichen werden diese Produkte global verteilt entwickelt und hergestellt sowie über ihren Lebenszyklus hinweg ingenieurtechnisch betreut. Hieraus ergeben sich die aktuellen Anforderungen an die Organisation des Produktentwicklungsprozesses, an die Qualifikation der beteiligen Mitarbeiter sowie an Forschung und Ausbildung in den Hochschulen.

Die Entwicklung von Produkten vollzieht sich durch die Anwendung integrierter Systeme in einer Synthese von maschinenbaulichen, ökonomischen und informationstechnischen Problemlösungen. Im Mittelpunkt des diesjährigen Kolloquiums stehen neben diesen drei Kerngebieten zusätzlich weitere Anwendungen und Lösungen aus den Bereichen der Windenergieanlagen und der maritimen Technik. Hiermit folgen die Veranstalter den wirtschaftlichen Trends in Norddeutschland.

Allen Teilnehmern, besonders den aktiv Vortragenden, danke ich für den geleisteten Beitrag zum Gelingen der Veranstaltung und wünsche für das Kolloquium viel Erfolg. Ich hoffe, es gelingt viele neue Kontakte zu knüpfen und die vorhandenen Netzwerke im Rahmen dieser Veranstaltung zu pflegen.

Mein Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhles Konstruktionstechnik/CAD der Universität Rostock für ihren Einsatz bei der Vorbereitung. Besonderer Dank gebührt Frau Gabriele Sternberg für die Vorbereitung aller Dokumente und Herrn Reinhard Rahn als Ansprechpartner für alle organisatorischen Fragen.

Allen Gästen wünsche ich einen angenehmen Aufenthalt in der Hansestadt Rostock.

Das 10. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik findet 2012 an der TU Dresden am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD unter Leitung von Prof. Ralph Stelzer statt. Hiermit möchte ich Sie im Namen aller Veranstalter schon jetzt einladen.

Rostock, Oktober 2011

Klaus Brökel

Kulturelle Einflüsse bei internationalen Produktentwicklungsprojekten am Beispiel von Hausgeräten 1

Andreas Meyer-Eschenbach, HAW Hamburg

Topologieorientierte Verformung von FEM- Netzen in iterativen Reverse Engineering Prozessen 7

Matthias Klaus, Stefan Holtzhausen, Christine Schöne, Ralph Stelzer

TU-Dresden

Erweiterung und Evaluation einer Methode zur Bestimmung des Modularen Grads 15

Thomas Hohnen, Ino Schliefer, Jörg Feldhusen

RWTH Aachen

Global Engineering – Ganzheitliche Produktentwicklung unter Beachtung internationaler, religiöser und kultureller Einflüsse 23

Henrik Schnegas, Hochschule Wismar

Maschinenelemente aus Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien 31

Gerhard Scharr, André Knopp

Universität Rostock

Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung 42

Michael Frisch, Andreas Dörnhöfer, Florian Nützel, Frank Rieg

Universität Bayreuth

Cross-Industry-Innovation in der Antriebstechnik 51

Ingo Schulz, Florian Wohlfeil

SKF GmbH

Finding optimal parameters with fuzzy evaluation of generalized mechanical functions 57

Attila Piros, Tibor Bercsey

Budapest University of Technology and Economics

Anforderungen an eine wissensbasierte Softwareumgebung im Konstruktionsprozess 66

Robert Furian; Maksim Maksimovic; Karl-Heinrich Grote

Volkswagen AG Wolfsburg

Methoden des zentralen Stammdatenmanagements für die integrierte Produktentwicklung 74

Erhard Leidich, Werner Grahl, Michael Konarsky, Dirk Hofmann

Technische Universität Chemnitz

Adaptive FEM mit VR-basierter Interaktion und Visualisierung in der Produktentwicklung **82**

Volker Wittstock, Janine Glänzel, Marco Schumann

Technische Universität Chemnitz

Effizienzsteigerung des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durch automatisierte Modellierungsansätze im Optimierungsumfeld **90**

Uwe Klemme, Marcin Humpa, P. Köhler

Universität Duisburg-Essen

Featurebasierte Modellierung flächiger Blechbauteile mit Verzweigungen **98**

Oliver Weitzmann, Anselm Schüle, Reiner Anderl

Technische Universität Darmstadt

Bereitstellung von Prozesswissen zur Beherrschung von Unsicherheiten lasttragender Systeme **106**

André Sprenger, Lucia Mosch, Reiner Anderl,

TU-Darmstadt

ParaFEM – innovative Zukunftsstrategie zur effektiven Nutzung von numerischen Methoden mit integrierter Parametrisierung für Konstruktionsaufgaben **115**

Andreas Nickel, Konstantin Benke

Ruhr-Universität Bochum

Gewichtsreduzierung von Windkraftgetrieben durch asymmetrische Verzahnungen **123**

Christian Brecher, Christof Gorgels, Jan Ingeli

RWTH Aachen

Alternatives Lagerkonzept für die Rotorlagerung von Windenergie-anlagen **131**

Ingo Jonuschies, Klaus Brökel

Universität Rostock

Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe Materialien – Automatisierter preform-Aufbau für Rotorblätter von Windenergieanlagen **141**

J.-H. Ohlendorf, M. Rolbiecki, T. Schmohl, D. H. Müller, K.-D. Thoben

Universität Bremen

Entwickeln des Lasten- und Pflichtenheftes einer Windkraftanlage **147**

Jan Brökel, Suzlon Energy GmbH

Überlegungen zur Formgebung und Stabilität schwimmender Plattformen für Windenergiewandler **154**

Mathias Paschen, Christian Semlow, Thomas Miethe

Universität Rostock

Durchgängige IT-Unterstützung der Lebenszyklusphasen von Offshore-Windkraftanlagen **163**

Ute Dietrich, Marc Glauche

Siemens Industry Software GmbH & Co. KG

Analog, digital, virtuell – Der hybride Designprozess in der kooperativen Entwicklung maritimer Produkte **172**

Frank Beier, Thomas Maier

Universität Stuttgart

Die effektive Behandlung großflächiger thermischer Verletzungen - eine medizinisch-technische und wirtschaftliche Herausforderung **180**

Ines Barz, Frank Engelmann

FH Jena

Entwicklung und Herstellung künstlicher Felsenbeinpräparate mittels Rapid-Prototyping Verfahren für die Optimierung von Cochlea-Implantat Operationen **188**

Fabian Klink, Kevin Kuhlmann, Joachim Döring, Cornelia Hahne, Ulrich Vorwerk

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Analyse dentaler Implantate ausgehend von natürlichen Zähnen unter Berücksichtigung der Konstruktionsmethodik im Allgemeinen und Leitstütz-Strukturen im Speziellen **196**

D. Lemmer, J. Feldhusen, S. Wolfart, K. Haselhuhn

Universität Aachen

Strukturmechanische Untersuchungen zur Carapax-Verstärkung von Daphnia cucullata **204**

Hans-Peter Prüfer

Ruhr-Universität Bochum

Methoden der virtuellen 3D-Rekonstruktion von Knochenstrukturen für die Modellierung individueller funktioneller Implantate **212**

Philipp Sembdner, Liciane S. Bertol, Christine Schoene, Ralph Stelzer

Technische Universität Dresden

FEM-Untersuchung der Zahnfuß-Spannung an Beveloidzahnrädern **221**

M. Beck, H. Binz, M. Bachmann, Universität Stuttgart

Die Korrelation von Modell- und Modellierungsparametern in der Kontaktanalyse bei Maschinenelementen **230**

Nützel, Florian; Alber-Laukant, Bettina; Neidnicht, Martin; Wehmann, Christoph; Rieg, Frank

Universität Bayreuth

Ermittlung und Analyse des dynamischen Einsatzverhaltens von Zahnrädern im Antriebsstrang mit Hilfe der Zahnkontaktanalyse **238**

Christian Brecher, Christof Gorgels, Christian Carl

RWTH Aachen

Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Kegelradfräsen durch simulationsbasierte Standzeitoptimierung **247**

Christian Brecher, Fritz Klocke, Christof Gorgels, Ario Hardjosuwito

RWTH Aachen

Neuartige Werkstoffe für innovative Konstruktionen explosions-geschützter Produkte **255**

Julia Hornig, Uwe Klausmeyer, Karl-Heinrich Grote

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Entwicklung und Erprobung eines neuen Prozessablaufs für den Feinguss **264**

Kevin Kuhlmann, Fabian Klink

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Auswahl und Bewertung zukünftiger Entwicklungspartnerschaften **272**

Susanne Nass, Reiner Anderl

Technische Universität Darmstadt

Entwicklung von Robotersystemen zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Abwasserkanälen durch Inspektion und Wartung im laufenden Betrieb **281**

Sven Kutzner, Norbert Elkmann, Heiko Althoff, Josè Saenz, Thomas Stürze, Christoph Walter, Erik Schulenburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF

Integriertes Oil-Condition Monitoring für Produktionsmaschinen im globalen Weltmarkt **290**

Hans-Joachim Beyer

HAW Hamburg

Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen bei der Auslegung von Beveloidzahnrädern **296**

Christian Brecher, Christof Gorgels, Tobias Röthlingshöfer, Jannik Henser

RWTH Aachen

Experimentelle Untersuchungen zum maximal übertragbaren Drehmoment von hydraulischen Spannelementen in Verwendung als reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindung **304**

Dipl.-Ing. Enrico Kloß

Universität Rostock,

Isolation der Verformungseffekte in Ritzelwellen: Durchbiegung, Torsion und Zahndeformation **312**

Martin Neidnicht, Florian Nützel, Frank Rieg

Universität Bayreuth

3D-Verstärkung von Schiffspropellern in Carbon-Faser-Verbundbauweise durch Z-PINS **320**

Steffen Bartke, Christian Kliewe

Universität Rostock

Ansätze zur Simulation der Vorgänge in einer Wirbelschicht zur Ermittlung der mechanischen und thermischen Lasten als Grundlage für die Konstruktion Stationärer Wirbelschichtfeuerungsanlagen kleiner Leistung **329**

Carsten Böhme, Klaus Brökel

Universität Rostock

Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit mobiler Energiewandler **336**

Jana Hadler, Klaus Brökel

Universität Rostock

Kulturelle Einflüsse bei internationalen Produktentwicklungsprojekten am Beispiel von Hausgeräten

Andreas Meyer-Eschenbach

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

Inhalt: *Bei internationalen Kooperationen stammen die Projektmitglieder aus unterschiedlichen Ländern und Kontinenten, was schließlich mit unterschiedlichen Kulturen, Bildungssystemen und Muttersprachen verbunden ist. Erfahrungen zu diesen unterschiedlichen Eigenschaften der Teammitglieder sind bereits bei der Planung und Einrichtung von Projektteams in internationalen Entwicklungsprojekten wesentlich. Die stark wachsende internationale Kooperation wird insbesondere bei Projekten mit China deutlich. In diesem Beitrag wurde die Erfahrung von Projektleitern und Entwicklungsingenieuren, die bereits in mehreren internationalen Projekten gearbeitet haben, analysiert und kulturelle Einflüsse bei der deutsch-chinesischen Zusammenarbeit diskutiert. Die Schlussfolgerungen unterstützen Entwicklungsingenieure und Projektleiter, die in internationalen Produktentwicklungsprojekten arbeiten.*

Abstract: *In international development cooperation, project members come from various countries and continents, from different cultures, educational backgrounds, and native languages. It is helpful to be aware of the profiles of the various cultures and the different processes during the planning of the project teams. Fast growing international cooperation can be seen especially in projects with China. In this paper, the experience of project managers and engineering designers who have worked on international projects is discussed and characterised to clarify the cultural influence in German-Chinese project cooperation. The conclusions can be helpful for engineering designers and project managers working on international product development projects.*

Stichwörter: *Verteilte Produktentwicklung, Internationale Projekte, Kulturelle Einflüsse.*

Keywords: *Distributed Development, International Projects, Cultural Influences.*

1 Einleitung

Konsumgüter, wie z.B. Hausgeräte oder Automobile, werden in großen Stückzahlen produziert und in zahlreichen Ländern verkauft. Unterschiedliche Kundenwünsche in diesen Märkten führen zu regionalen Produktvarianten. Die Entwicklung dieser Varianten und Baureihen erfolgt oft im Rahmen von verteilten Produktentwicklungsprojekten mit Ingenieurteams aus mehreren Ländern. Die Zusammenarbeit der Ingenieure aus

unterschiedlichen Ländern und Kontinenten mit unterschiedlichen Kulturen, Bildungssystemen und Muttersprachen, kann dabei zu erheblichen Herausforderungen führen [1], [2], [3], [4], [5] und [6].
Die Bedeutung der internationalen Zusammenarbeit zeigt sich sehr deutlich bei zahlreichen Projekten mit europäischen Ländern und mit China [7].

2 Verteilte Produktentwicklung

Die verteilte Produktentwicklung von Hausgeräten ist ein typisches Beispiel für die Großserienentwicklung, das auch auf andere Branchen, wie z.B. die Automobilindustrie übertragen, werden kann. Die auftretenden Chancen und Herausforderungen sind bei international durchgeführten Projekten oft branchenunabhängig vergleichbar.

2.1 Chancen und Herausforderungen bei einer verteilten Produktentwicklung

Bei geografisch weit entfernten Projektteams entstehen Chancen durch unterschiedliche Arbeitszeiten aufgrund unterschiedlicher Zeitzonen, durch kulturelle Vielfalt, durch vielfältige Betrachtungsweisen der heterogenen Projektteammitglieder [1], [4] und durch größere Marktnähe. Große Unternehmen mit Standorten in mehreren Ländern können außerdem für große Entwicklungsprojekte zusätzlich die Ressourcen ihrer Standorte besser nutzen.
Herausforderungen entstehen durch geringere überlappende Arbeitszeiten aufgrund unterschiedlicher Zeitzonen, durch Kommunikationsprobleme, durch hohen Reiseaufwand von Projekttreffen [3] und teilweise auch durch konkurrierende Ziele verschiedener Standorte [4].

2.2 Erfahrungen mit einer verteilten Produktentwicklung

In einer Studie zur verteilten Produktentwicklung von Hausgeräten führten Projektmitglieder (Projektleiter und Entwicklungsingenieure) ein Ranking von relevanten Einflüssen auf internationale Produktentwicklungsprojekte durch. Die wichtigsten Einflüsse sind hier in abfallender Reihenfolge dargestellt:

- Verwendung und Beherrschung einer gemeinsamen Arbeitssprache
- Intensive Kommunikation und Datentransfer
- Definition und Vereinbarung gemeinsamer Ziele der Projektpartner
- Besonders systematische und detaillierte Projektorganisation

- Verständnis der kulturellen Hintergründe der Projektpartner
- Harmonisierter Entwicklungsprozess
- Verständnis der bevorzugten Herangehensweisen und Methoden

2.3 Bedeutung von kulturellen Einflüssen

Eine genauere Analyse der Befragungen zeigte, dass das Ranking von der internationalen Projekterfahrung der befragten Projektmitglieder abhängt [4].

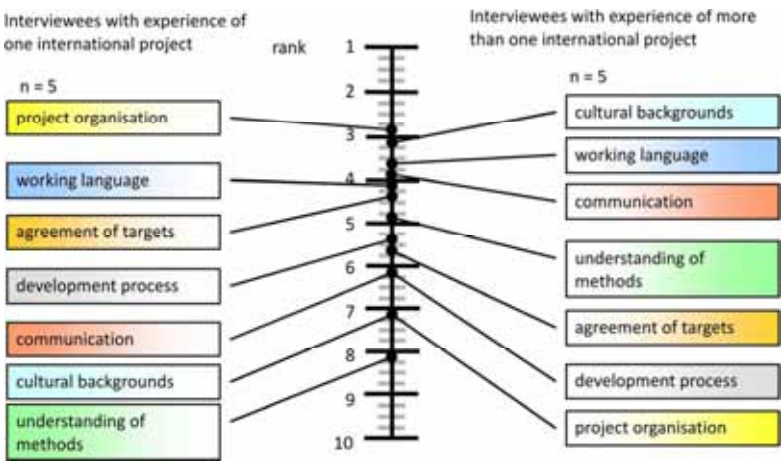


Bild 1: Gemitteltes Ranking der wichtigsten Einflüsse [4]

In Bild 1 sind die unterschiedlichen Rankings erkennbar. Der Einfluss „Verständnis der kulturellen Hintergründe der Projektpartner (cultural backgrounds)“ wurde von den befragten Projektmitgliedern mit nur einem internationalen Projekt auf Position 6 eingestuft, während Projektmitglieder mit einer Projekterfahrung von mehreren internationalen Projekten diesen Einfluss auf Position 1 sahen.

In anschließenden Interviews sprachen Projektmitglieder mit einer Projekterfahrung von mehreren internationalen Projekten von Reibungsverlusten zwischen den Projektpartnern infolge von Missverständnissen [4].

Nach HOFSTEDE ist Kultur als eine Art Software der menschlichen Gedanken *„software of the mind“* definiert [8]. Demnach nutzt jeder Mensch typische Wege bzw. Verhaltensweisen zu denken, zu fühlen und zu handeln. Dieses Erklärungsmodell zeigt,

dass Menschen aus unterschiedlichen Kulturkreisen oft unterschiedlich agieren und reagieren.

3 Analyse der Zusammenarbeit in Europäisch-Chinesischen Projekten

Zur Klärung der wichtigsten Punkte in der interkulturellen Zusammenarbeit wurde ein Workshop mit einem Unternehmen durchgeführt, das Hausgeräte insbesondere für Deutschland, Spanien, Polen, Türkei, China, Indien und USA entwickelt und produziert. Der Workshop, an dem Projektleiter, Konstrukteure des Unternehmens und Wissenschaftler der Technischen Universität Berlin teilnahmen, wurde vom Autor dieses Artikels organisiert und durchgeführt und ist in [7] näher beschrieben.

3.1 Kernfragen zur europäisch-chinesischen Zusammenarbeit

Die wichtigsten Diskussionspunkte des soeben genannten Workshops wurden in Form von sieben Kernfragen zusammengefasst. Aufgrund der besseren Nachvollziehbarkeit sind diese Fragen in der englischen Originalformulierung aufgeführt:

- What are the different profiles of the cultures involved?
- What are the advantages of the different profiles of the cultures (including education)?
- How can German development engineers coach their Chinese colleagues to work more independently?
- Which profiles of cultures fit together?
- What is the influence of personal relationships in China?
- Which processes are different?
- How should one deal with persons from the other culture?

3.2 Ausgewählte Ergebnisse aus Interviews zur europäisch-chinesischen Zusammenarbeit

Die ergebnisoffenen Fragen führten teilweise zu weitgefächerten Aussagen, so dass eine Zusammenfassung erfolgte, aus der vier wesentliche Kernaussagen abgeleitet wurden [7]:

- Die Kommunikation zwischen den Teammitgliedern ist sehr bedeutend.
- Die Sprachkenntnisse der deutschen und chinesischen Kollegen sind oftmals nicht ausreichend.
- Der persönliche Kontakt ist nicht nur in Teambesprechungen, sondern auch in Zwei-Personen-Gesprächen wesentlich.

- Das Kennenlernen der Projektpartner ist in der Startphase der Projektarbeiten besonders wichtig.

3.3 Vorgehensweisen von Konstrukteuren verschiedener Kulturen

In einer Studie in Kooperation mit einem global arbeitenden Hausgerätehersteller wurden die Herangehensweisen von Konstrukteuren aus Deutschland, Indien und China untersucht. In jedem Land wurden drei Teams mit je zwei Konstrukteuren gebildet. Jedes Team erhielt dann die gleiche Konstruktionsaufgabe und vergleichbare Rahmenbedingungen [9].

Die Auswertung zeigte zusammenfassend, dass die Konstruktionsteams aus Deutschland eher analytisch vorgingen und die Konstruktionsaufgabe überwiegend in Teilaufgaben bearbeiteten. Die Konstruktionsteams aus Indien und aus China gingen die gestellte Aufgabe hingegen meist ganzheitlich an, so dass Teilaufgaben nicht so deutlich erkennbar waren [9].

3.4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der jeweilige kulturelle Hintergrund der Projektpartner sollte bereits bei der Projektplanung und Projektvorbereitung intensiv berücksichtigt werden. Bei internationalen Projekten sollte der Projektleiter / die Projektleiterin die verschiedenen kulturell bedingten Denk- und Handlungsweisen genau kennen.

Grundsätzlich ändern sich diese kulturell bedingten Denk- und Handlungsweisen sehr langsam. Aufgrund der schnellen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen, die die Ingenieure in China und in anderen Ländern erfahren, müssen allerdings die aus den Studien gewonnenen Erkenntnisse regelmäßig überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Eine frühzeitige Vorbereitung auf interkulturelle Themen wird bereits für angehende Führungskräfte in internationalen Projekten empfohlen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aus mehreren Studien zeigt sich, dass in internationalen Produktentwicklungsprojekten der jeweilige kulturelle Hintergrund der Projektpartner einen deutlichen Einfluss auf die Projektarbeiten haben kann. Dieser Einfluss sollte daher ausreichend bei der Planung, Vorbereitung und Bearbeitung von Projekten berücksichtigt werden. Aufgrund der hohen

wirtschaftlichen Bedeutung von internationalen Projekten empfiehlt der Autor dieses Beitrags eine weiterführende anwendungsnahe Forschung in Kooperation mit global arbeitenden Unternehmen.

Literatur

[1] Baumgärtner, C.E. and Blessing, L.T.M. Characteristics of successful collaboration between engineering consultants and clients in the automotive industry. In International Conference on Engineering Design, Munich, August 1999, pp. 983-988, WDK 26, TU Munich.

[2] Felgen, L., Grieb, J., Lindemann, U., Pulm, U., Chakrabarti, A., Vijaykumar, G.: The Impact of Cultural Aspects on the Design Process. International Design Conference – Design 2004. Dubrovnic, May 2004.

[3] Larsson, A., Toerlind, P., Karlsson, L., Mabogunje, A., Leifer, L., Larsson, T. Elfstroem, B.-O.: Distributed team innovation – a framework for distributed product development. International Conference on Engineering Design, ICED '03, Stockholm, August 2003.

[4] Meyer-Eschenbach, A. and Blessing, L.: Experience with Distributed Development of Household Appliances. International Conference of Engineering Design, ICED '05, Melbourne, August 2005.

[5] Petermann, M., Trevelyan, J., Felgen, L., Lindemann, U.: Cross-Cultural Collaboration in Design Engineering – Influence Factors and their Impact on Work Performance. International Conference of Engineering Design, ICED '07, Paris, August 2007.

[6] Whitfield, R.I., Duffy A.H.B., Coates, G., Hills, W.: Distributed design coordination. Research in Engineering Design 13 (2002) 243-252. Springer-Verlag 2002.

[7] Meyer-Eschenbach, A.; Gautam, V.; Schüler, P.; Wildung, W.: Experience with Cultural Influences in German-Chinese Development Project Cooperations. International Design Conference – Design 2008. Dubrovnic, May 2008.

[8] Hofstede, G. Culture's consequences, 2001 (Sage Publications Ltd, Beverly Hills).

[9] Gautam, V.; Blessing, L.: Cultural Influences on Design Processes – An Empirical Study. Conference of Engineering Design, ICED '09, Stanford, August 2009.

[10] Pauwels, M. Interkulturelle Produktentwicklung – Produktentwicklung mit Wertanalyse und interkultureller Kompetenz, 2001 (Shaker Verlag Aachen).

[11] Kasperk, G., Woywode, M. and Kalmbach, R.: Erfolgreich in China – Strategien für die Automobilzulieferindustrie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

Topologieorientierte Verformung von FEM- Netzen in iterativen Reverse Engineering Prozessen[1)]

Matthias Klaus, Stefan Holtzhausen, Christine Schöne, Ralph Stelzer

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD
TU-Dresden, 01062 Dresden
Email: Matthias.Klaus@tu-dresden.de;
Internet: http://tu-dresden.de

Inhalt: *Reverse Engineering ist in Produktentwicklungsphasen etablierter Bestandteil zur schnellen Geometrieerfassung von Objekten. Für Aufgaben, die über die reine Visualisierung der erhaltenen Daten hinausgehen, stellt die notwendige Datenaufbereitung jedoch einen sehr hohen Aufwand dar. So sind die durch Scanverfahren erhaltenen Punktwolken für numerische Festigkeits- und Schwingungsuntersuchungen eines Bauteiles nicht direkt nutzbar. Flächenrückführungsprozesse und die FEM- Modellerstellung erfordern sowohl spezielles Fachwissen als auch Zeit selbst dann, wenn bereits CAD- oder FEM- Modelle dieses oder ähnlicher Objekte vorhanden sind. Der Beitrag präsentiert daher Untersuchungen und Methoden zum effizienten Einsatz von Scandaten für die FEM- Berechnung topologisch ähnlicher Bauteile.*

Abstract: *Reverse engineering is a well- established component for geometry acquisition of objects in product development phases. However, the data- preparation for tasks going beyond the pure visualization of the received data produces a very high complexity. Thus point clouds achieved by 3D- Scanning are not usable for numerical strength- and vibration- analyses directly. Surface reconstruction and building of FEM- models require specific knowledge and time even in cases, where CAD- or FEM- models of this or similar objects are already available. Hence this article presents researches and methods for an efficient usage of scan data for the finite element analysis of topologically similar mechanical parts.*

Stichwörter: *FEM, Topologie, Featureerkennung, Bildbearbeitung, 3D- Scannen*

Keywords: *FEM, topology, feature detection, image processing, 3D- Scanning*

1 Problemstellung und Motivation

Die optische 3D-Scantechnik ist im Umfeld der Produktentwicklung zur Erfassung der Geometrie von Bauteilen etabliert. Als Scanergebnis liegen je nach angewendeter Methode 3D- Punktwolken oder facettierte Oberflächen vor, die in der Regel für einen Geometrievergleich direkt verwendet werden können. Gilt es nun aber, diese Geometrieinformationen im weiteren Produktentwicklungsprozess für Simulationsrechnungen oder für die endgültige Bauteilefertigung zu nutzen, müssen

topologische Oberflächen- und Volumeninformationen der Bauteile wiederum in einem aufwändigen Prozess aus den Punkt- bzw. Dreieckswolken extrahiert werden. Dieser Prozess wird als Flächenrückführung oder Reverse Engineering bezeichnet. Im Ergebnis entstehen CAD- Modelle, aus denen anschließend FEM- Modelle erstellt werden können. Je nach Detaillierung, Art der Elemente und Randbedingungen stellt dieser Prozess ebenfalls einen hohen Zeit- und Kostenfaktor dar. Zwar existieren kommerzielle Softwarepakete zur Flächenrückführung (z. B. Geomagic Studio, Firma Geomagic), gilt es aber FEM- Berechnungen auf dieser Datengrundlage durchzuführen, sind diese Rückführungsmethoden ungeeignet. Zum einen werden die originalen und für die FEM notwendigen Objekteigenschaften (Kanten, begrenzte Oberflächen, geometrische Grundelemente, etc.) nur unzureichend berücksichtigt, zum anderen kommt es durch die Beschreibung der Oberfläche durch Non- Uniform Rational B- Splines (NURBS) zu einer Approximation und somit zur Reduzierung von Oberflächendetails. Die zweite Möglichkeit zur Nutzung der diskreten Scandaten für eine FEM-Berechnung liegt darin, die oberflächenbeschreibenden Dreiecke direkt für die Berechnung zu verwenden (z. B. 3-matic, Firma Materialise). Problematisch bei dieser Methode ist, dass durch die Netzoptimierung vorgenommene Reduzierung der Facettenanzahl eine Verringerung des Detailgrades auftritt. Ferner werden topologische Eigenschaften nicht berücksichtigt. Des Weiteren bieten CAE-Softwarelösungen Morphingpakete für FEM- Netze (z. B. Hypermesh, Firma Altair) an. Diese ändern parametrisch die Position vorher definierter Elemente und Features und verzerren das angrenzende Netz. Die Auswahl und Verschiebung der Knoten wird vom Nutzer manuell bzw. über Parameter gesteuert. Die Adaption an eine gescannte Geometrie ist nicht möglich.

Es zeigt sich ein deutliches Defizit in der Geometrieverarbeitung derart, dass einmal generierte FEM- Netze mit allen gesetzten Randbedingungen und Materialeigenschaften für gescannte Bauteile mit einer ähnlichen Topologie für die weiteren Berechnungen nicht direkt angewendet werden können. Unabhängig davon, ob Informationen zum gescannten Objekt in digitaler Form bereits vorhanden sind oder nicht, müssen sowohl die CAD-Volumenmodelle, das FEM- Modell als auch die Vernetzung ähnlicher Teile immer wieder neu erzeugt werden. Der Beitrag beschäftigt sich daher mit einem topologieorientierten Ansatz zur Verformung von FEM- Netzen auf Messpunktwolken bzw. Dreiecksnetzen.

2 Zielstellung und Lösungsweg

2.1 Zielstellung

Der zielgerichteten Verschiebung der Elementknoten der Netzoberfläche - nachfolgend als Adaption bezeichnet - werden die topologischen Eigenschaften sowohl des FEM- Netzes als auch des Scandatensatzes zu Grunde gelegt. Dafür ist neben der Definition dieser Merkmale auch deren Erkennung in den Bauteilen notwendig. Mit Hilfe dieser Strukturen können Korrespondenzen, die einen höheren Nutzen als reine Punkt- Polygon- oder Punkt- Knoten- Beziehungen mit sich bringen, zwischen Netz und Punktwolke hergestellt werden. Über Geometrievergleiche der einander zugeordneten Teilbereiche oder Gruppen zusammengefasster Topologien werden eventuelle Abweichungen identifiziert. Diese gilt es im Weiteren durch Knotenpunktverschiebungen zu reduzieren. Der prinzipielle Ablauf ist in Bild 1 dargestellt.

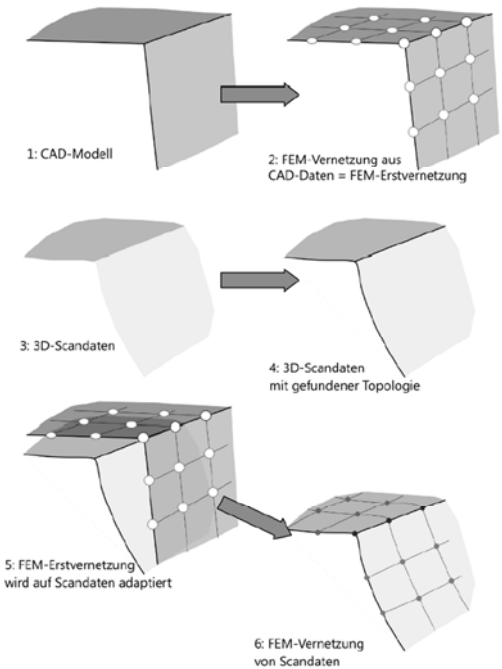


Bild 1: Teilschritte der Netzadaption

Die als Ergebnis der Zielstellung zu erarbeitende Methode ist in Bild 2 rechts dem bisherigen Vorgehen (Bild 2 links) gegenübergestellt. Ein erstes generiertes FEM- Netz mit vollständig beschriebenen Randbedingungen und Materialien dient als FEM-Erstvernetzung. Dieses ergibt sich entweder aus der Vernetzung eines verfügbaren CAD-Modells oder aus einem 3D- gescannten Bauteil, das einer Flächenrückführung unterzogen wurde. Bei der FEM- Vernetzung ähnlicher Bauteile entfällt damit das aufwendige Reverse Engineering anhand der Scandaten und die erneute Vernetzung.

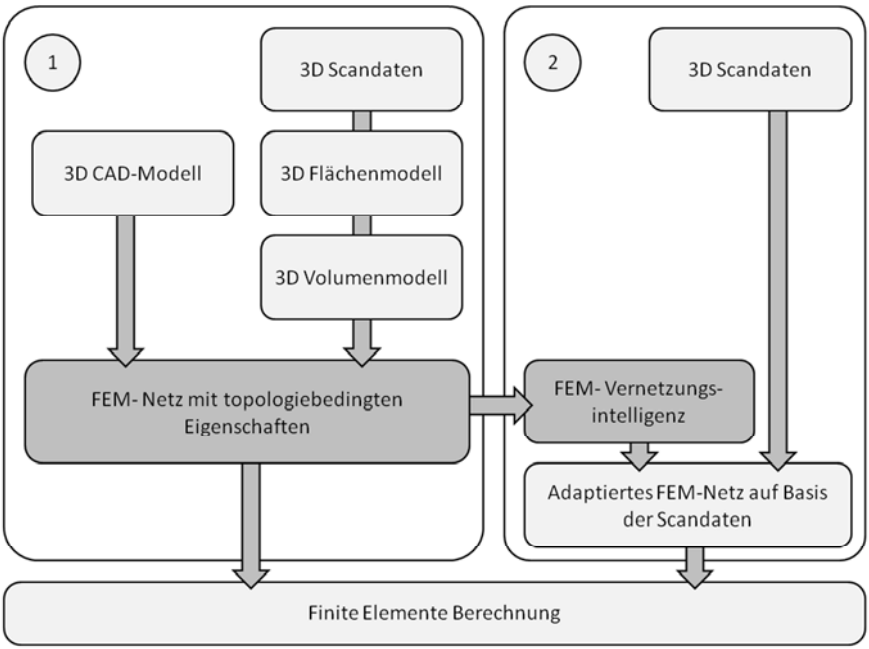


Bild 2: Bisheriges Vorgehen bei der FEM- Vernetzung ähnlicher Bauteile (links) und geplanter Ablauf (rechts)

2.2 Erzeugung der Objekttopologie aus diskreten Daten

Einführung

Als Topologiemerkmale werden im Rahmen dieses Beitrages Ecken, Kanten und Flächen herangezogen. Im allgemeinen Fall liegen die Punktdaten ohne übergeordnete Struktur vor. Die Objekttopologien sind demnach aus lokalen, geometrischen Eigenschaften der

Punktwolke abzuleiten. Die Segmentierung ist dabei nicht eindeutig. Sie hängt neben der Objektgeometrie von den zu Grunde gelegten Suchkriterien und –strategien ab.

In [1] wird ein vorhandenes Polygonnetz unter Verwendung von Ausgleichsebenen in eine hierarchische Struktur von annähernd ebenen Flächen gegliedert. Das Ziel der Formenvereinfachung für effektive Berechnungen im Bereich der Computergrafik führt hierbei zu einer starken Flächenteilung auch in geometrisch ähnlichen Bereichen. Unter Verwendung der Oberflächennormalen werden z. B. in [2] separate Bereiche in Polygonnetzen gebildet. Aus der Bestimmung eines (Schätz-) Maßes für die Krümmung von Objektoberflächen werden in [3] nach der Watershed- Methode erhöhte und vertiefte Flächenbereiche identifiziert und getrennt. In [4] werden aus Regionen erhöhter Krümmung sog. Segmenttrennungslinien erzeugt, die die Grenze für ein separates Oberflächengebiet darstellen. Die Arbeit beschreibt zugleich ein umgekehrtes Vorgehen, bei dem schwach gekrümmte Bereiche nach dem Region- Growing- Verfahren solange erweitert werden, bis die zu Grunde liegende Krümmung einen Grenzwert überschreitet. Einen auf der RANSAC- Methode (Random Sample Consensus) basierenden, effizienten Algorithmus zur Identifikation geometrischer Primitive, wie Ebenen oder Kugel(teil)flächen, in ungeordneten Punktmengen wird in [5] präsentiert. Weitere Ansätze finden sich z. B. in [6], einer Vergleichsstudie zur Netzsegmentierung.

Anwendung von 2D- Bildverarbeitung zur Segmentierung von 3D- Punktewolken

Die angeführten Methoden operieren direkt auf den dreidimensionalen Datensätzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird vermehrt der 2D- Bildraum zur Topologiefindung genutzt. Um Algorithmen und Operatoren der Bildbearbeitung für diesen Anwendungsfall sinnvoll nutzen zu können, ist der Scandatensatz in Form einer geschlossenen Fläche erforderlich. Dazu wird die in [7] beschriebene Methode zur Triangulation von dreidimensionalen Oberflächen genutzt und um eine gleichzeitige, lokale Krümmungsabschätzung erweitert. Um das Dreiecksnetz im 2D- Bildraum auf topologische Merkmale zu untersuchen, wird ein Modell des virtuellen Beobachtens angewendet (Bild 3). Damit werden mittels eines Kameramodells zweidimensionale Abbildungen des dreidimensionalen Objektes erzeugt. In die unterschiedlichen Objektansichten fließen die bei der Triangulierung gewonnen Informationen zu Normalen und Krümmungen ein. Dadurch ergibt sich für eine

Perspektive ein sog. Normalen-, Tiefen- und Krümmungsbild, auf die sog. Ecken-, Kanten- und Bereichsdetektoren zur Topologiefindung angewendet werden.

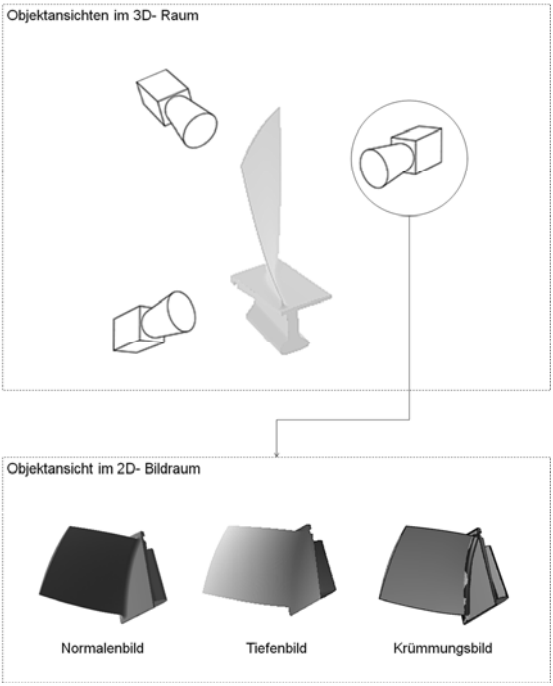


Bild 3: Anwendung der 2D- Bildverarbeitung zur 3D- Segmentierung

Für eine effektive Objektrepräsentation ist die Wahl sowohl der Anzahl als auch der Position und Orientierung der virtuellen Kamerapositionen von großer Bedeutung. Zum einen muss die Sichtbarkeit jedes Objektpunktes in mindestens einer Ansicht gewährleistet sein. Zum anderen muss die Perspektive sicher stellen, dass ein sich in der Ansicht befindliches topologisches Merkmal als solches auch identifizierbar ist. Aktuelle Untersuchungen beschäftigen sich damit, die Sichtbarkeitsproblematik bei der Erfassung von Bauteiloberflächen mit optischen Messsystemen als mathematische Optimierungsaufgabe zu beschreiben [8].

2.3 Netzadaption

Die erkannten Topologiemerkmale werden für die Weiterverarbeitung in eine geeignete Datenstruktur überführt. Dabei werden auch die Korrespondenzen zwischen Scan- und FEM- Datensatz berücksichtigt. Die Verformung der Netzknoten basiert auf den Abständen der einander zugeordneten topologischen Elemente beider Datensätze. Dafür ist eine Registrierung in einem gemeinsamen Koordinatensystem notwendig. Eine andere Möglichkeit der Netzadaption ohne Registrierung beruht auf der Ähnlichkeit korrespondierender Topologien. Welche Parameter als Maß für die Ähnlichkeit topologischer Merkmale herangezogen werden können, ist zum gegebenen Zeitpunkt noch offen. Um die Eignung des veränderten Netzes für die FEM- Berechnung beizubehalten, ist auf eine gleichmäßige Deformation aller beteiligten finiten Elemente zu achten. Dazu wird ein Federsteifigkeitsmodell auf die Knotenstruktur angewendet, das eine spannungsminimierte Transformation der Elemente erlaubt, Bild 4. Dazu wird für jeden zu verschiebenden Netzknoten m_j ein Scanpunkt k_j bestimmt, dessen Position adaptiert werden soll. Die Verschiebung der Netzknoten (Verschiebungsvektoren v_j) auf die Scanoberfläche erfolgt unter der Maßgabe, dass die Summe aller Dehnungen der Federelemente minimal ist. Dadurch wird eine minimale Verformung der Oberflächenelemente des FEM- Netzes und die weitere Eignung für FEM- Berechnungen gewährleistet.

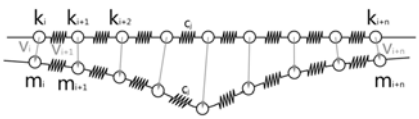


Bild 4: Federsteifigkeitsmodell für Netzverformung

3 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Die vorgestellte Methode zur Adaption von Scandaten auf FEM- Netze erlaubt einmal generierte Informationen für eine FEM- Berechnung auf topologisch ähnliche Werkstücke zu übertragen. In den ersten Arbeitsschritten wurden die Methoden zur Identifizierung der Objekttopologie fixiert. Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit der

- Entwicklung einer Datenstruktur zur Topologieverwaltung
- Entwicklung eines parametrischen Verformungsalgorithmus
- Untersuchung über die Eignung von unterschiedlichen FEM- Elementtypen

- Netzoptimierung
- Bewertung der erarbeiteten Verformungsalgorithmen
- Evaluierung der Ergebnisse an realen Bauteilen

Literatur

[1] Garland, Michael; et al.: Hierarchical Face Clustering on Polygonal Surfaces, 2001, I3D '01 Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics, ISBN: 1-58113-292-1

[2] Yamauchi, Hitoshi; et al.: Feature Sensitive Mesh Segmentation with Mean Shift, 2005, SMI '05 Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications, ISBN: 0-7695-2379-X

[3] Mangan, Alan; Whitaker, Ross: Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation, 1999, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, Nr. 4, pp. 308- 321

[4] Wilke, Wilhelm: Segmentierung und Approximation großer Punktwolken, Dissertation TU Darmstadt Fachbereich Mathematik, 2002

[5] Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R.: Efficient RANSAC for Point- Cloud Shape Detection, 2007, Computer Graphics Forum, Vol. 26, Nr. 2, pp. 214- 226

[6] Attene, M.; et al.: Mesh segmentation – A comparative study, 2006, SMI '06 Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications, ISBN: 0-7695-2591-1

[7] Di Angelo, L; Di Stefano, Paolo; Giaccari, L: A new mesh-growing algorithm for fast surface reconstruction, 2011, Computer- Aided Design 43, Issue 6, 2011, pp. 639- 650

[8] Holtzhausen, Stefan; Schöne, Christine; Stelzer, Ralph: Berechnung des sichtbaren Bereiches für einzelne Posen beim Streifenprojektionsverfahren, 2010, 13. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D- Drucken, Berlin, 09.- 10.12.2010, ISBN: 978-3-942709-00-2

[1)] Das Vorhaben wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Laufzeit: 01.09.2011 – 31.08.2013

Erweiterung und Evaluation einer Methode zur Bestimmung des Modularen Grads

Thomas Hohnen, Ino Schliefer, Jörg Feldhusen

RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstr. 54 B, 52074 Aachen
Email: hohnen@ikt.rwth-aachen.de;
Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

Inhalt: *Im Produktentwicklungsprozess werden fortlaufend Rationalisierungsmöglichkeiten gesucht. Der in der Literatur bekannte Ansatz zur Berechnung des Singular Value Modularity Index (SMI) stellt eine Möglichkeit der quantitativen Bestimmung des Modularen Grads dar. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass nur die Produktstruktur als Grundlage der Berechnung dient. Aufgrund dieser Einschränkung haben die Autoren den Ansatz zur Bestimmung des SMI auf die Produktarchitektur erweitert und diesen an einem Beispielprodukt angewendet und evaluiert.*

Abstract: *The rationalization of the Engineering Design Process is one of the main targets of Engineering Design research. One known approach to calculate a Singular Value Modularity Index (SMI) can be used to quantify a "degree of modularity". The drawback of this method is that only the product structure is considered for the calculation. In this paper, an extended approach is presented that includes the product architecture to determine the SMI; it is applied to an example product and evaluated.*

Stichwörter: *Singular Value Modularity Index, Modulare Grad, Modularisierung, Produktarchitektur*

Keywords: *Singular Value Modularity Index, degree of modularity, modularity, modularization, product architecture*

1 Einleitung

Im Produktentwicklungsprozess werden fortlaufend Rationalisierungsmöglichkeiten gesucht. Besonders betroffen sind die Konstruktions- und Fertigungsbereiche. Zur Einsparung von Kosten wird häufig die Modularisierung der Produkte angestrebt. Jedoch muss ein modulares Produkt nicht zwangsläufig günstiger als ein integrales Produkt sein.

Nach BAUMGART ist die Modularität eines Produktes eine graduelle Eigenschaft der Produktarchitektur [1]. Ob ein Produkt tendenziell einen integralen oder modularen Aufbau besitzt, wird durch den „Modularen Grad“ beschrieben.

In der Literatur gibt es mehrere Ansätze, die den Modularen Grad quantitativ beschreiben. Ein vielversprechender Ansatz ist die Bestimmung des Singular Value Modularity Index (SMI) [2,3]. HÖLLTÄ-OTTO klassifiziert mit diesem Ansatz ein Produkt auf alleiniger Basis der Produktstruktur, wodurch die physische Unabhängigkeit ermittelt werden kann. Eine zusätzliche funktionale Unabhängigkeit des Produktes wird nicht ermittelt. Sowohl die physische als auch die funktionale Unabhängigkeit sind aber notwendig zur Bestimmung der Modularität (vgl. [4]).

2 Ansatz: Singular Value Modularity Index

Ein Ansatz zur quantitativen Bestimmung des Modularen Grad wurde von HÖLLTÄ-OTTO 2005 vorgestellt und 2007 verändert [2,3]. Im Rahmen dieser Arbeit soll das Vorgehen der Bestimmung des Singular Value Modularity Index (SMI) in Kürze vorgestellt werden.
Die Ausgangsdaten für die Berechnung des Kennwerts ist die interne Verbindungsstruktur der Komponenten eines technischen Produktes. Mit Hilfe dieser Verbindungsstruktur wird die Besetzungsstruktur einer binären Design Structur Matrix (DSM) erzeugt. An der erzeugten Matrix wird anschließend eine Singulärwertzerlegung (SVD) durchgeführt.
Auf Grundlage der berechneten Singulärwerte σ_1, σ_2, …, σ_N wird der SMI berechnet, der als Kennwert des modularen Grads verstanden werden kann. Dieser Wert soll laut Definition zwischen null und eins liegen.
In der Literatur gibt es zwei unterschiedliche Berechnungsansätze von HÖLLTÄ-OTTO. Der erste wurde 2005 vorgestellt [2], siehe Formel (1).

$$SMI_{2005}=1-\frac{1}{N\cdot\sigma_1}\sum_{i=1}^{N-1}\sigma_i(\sigma_i-\sigma_{i+1}) \tag{1}$$

Eine weiter entwickelte Formel wurde 2007 veröffentlicht [3], siehe Formel (2).

$$SMI_{2007}=\frac{1}{N}\arg\min_{\alpha}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{\sigma_i}{\sigma_1}-e^{\frac{-(i-1)}{\alpha}}\right| \tag{2}$$

Als zusätzlicher Vergleichswert wird der Nicht-Null-Anteil (NZF: englisch: non-zero fraction) hinzugezogen, der Aufschluss über die Besetzung der DSM gibt, siehe Formel (3).

$$NZF = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} DSM_{ij}}{N(N-1)} \tag{3}$$

Wenn die Matrix vollständig unbesetzt ist, ergibt die NZF-Formel den Wert „null“.

Tabelle 1 zeigt beispielhaft die kalkulierten Werte für ideale Produkte mit 7 bzw. 134 Komponenten.

Tabelle 1: SMI-Werte für ideale Strukturen

Bezeichnung	Matrix	SMI_{2005}	SMI_{2007}	NZF
Integral	7x7	0,2857	0,1595	1,0000
Busmodular	7x7	0,6501	0,1167	0,2857
Modular	7x7	0,8218	0,8104	0,2857
Integral	134x134	0,0015	0,0015	1,000
Busmodular	134x134	0,9149	0,0059	0,0146
Modular	134x134	0,9926	1,0276	0,0146

Die mit den beiden SMI-Formeln berechneten Werte sind nicht gleich. Besonders das busmodulare System wird je nach Ansatz unterschiedlich bewertet. Nach dem SMI_{2005} ist das System zwischen dem integralen und modularen Aufbau angeordnet, wohingegen das Ergebnis für 7 Komponenten nach dem SMI_{2007} integraler als das ideal, vollständig integrale System ist. Ein weiterer Unterschied wird bei einer Erhöhung der Komponenten deutlich. Obwohl der Ansatz aus dem Jahr 2007 mit dem Ziel entwickelt wurde, dass ein Kennwert mit einer Skala von null bis eins entwickelt wurde, steigt der Wert für eine modulare Struktur über eins. Eine Erklärung für das Verhalten bei großen Matrizen ist die Rechengenauigkeit.

3 Erweiterung des SMI-Ansatzes auf die Produktarchitektur

Ein Nachteil der Methode von HÖLLTÄ-OTTO ist, dass nur die Produktstruktur als Grundlage der Berechnung angenommen wird. Die Produktarchitektur – das Beziehungsschema zwischen Funktionsstruktur eines Produktes und seiner physikalischen Struktur [1] – wird nicht berücksichtigt. Aufgrund dieser Einschränkung

haben die Autoren den Ansatz zur Bestimmung des SMI auf die Produktarchitektur erweitert.

Für die Erweiterung wird eine Matrixdarstellung der Produktarchitektur benötigt. Im Gegensatz zur Design Structure Matrix (DSM) der Produktstruktur, werden bei der Produktarchitektur den einzelnen Komponenten die jeweiligen Funktionen zugeordnet. Da die Anzahl der Funktionen nicht notwendigerweise gleich der Anzahl der Komponenten ist, kann eine DSM nicht genutzt werden. In dieser Erweiterung muss daher auf eine Domain Mapping Matrix (DMM) zurückgegriffen werden.

Analog der Berechnung des SMI für die Produktstruktur wird mit diesen DMMs eine Singulärwertzerlegung durchgeführt auf deren Basis der SMI-Formeln von HÖLLTÄ-OTTO die SMI-Werte berechnet werden können.

Da bei der Produktarchitektur keine DSM-, sondern eine DMM-Struktur verwendet wird, muss die Formel zur Berechnung des NZF angepasst werden, siehe Formel 4.

$$NZF_{PA} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} DMM_{ij}}{n \cdot m} \tag{4}$$

Der Unterschied besteht darin, dass auch rechteckige Matrizen vorkommen können und die Diagonalen nicht zwangsläufig leer bleiben müssen wie bei einer DSM. Deshalb wird im Nenner die gesamte Anzahl der Elemente der Matrix berücksichtigt, im Gegensatz zu der Formel aus Kapitel 2 also auch die der Diagonalen. Auch diese Messgröße ergibt bei binären Matrizen einen Wert zwischen null und eins. Letzterer wird bei einer vollständig besetzten Matrix erreicht, welche eine integrale Produktarchitektur wiedergibt.

4 Evaluierung der Erweiterung anhand eines Beispielprodukt

Die Berechnung des Modularen Grads eines Produkts nach dem Prinzip des Singular Value Modularity Index ist bisher theoretisch beschrieben worden. In diesem Abschnitt wird zu Beginn die Methode auf ideale Produkte, einem ideal-integralen und einem ideal-modularen Produkt, durchgeführt, um anschließend die Ergebnisse eines Beispielproduktes damit zu vergleichen und zu evaluieren.

4.1 Ideale Produktstrukturen

Eine Eigenschaft zur Beschreibung eines modularen Produkts ist die Zuordnung von Funktionen zu physikalischen Elementen. Laut ULRICH ist ein Produkt modular, wenn eine

Komponente genau einer Funktion zugeordnet ist. Wenn eine Komponente mehrere Funktionen erfüllt oder eine Funktion von mehreren Komponenten erfüllt wird, besitzt das Produkt eine integrale Produktarchitektur [5].

Nach dieser Definition muss bei einem ideal-modularen Produkt die Anzahl der Funktionen gleich der Anzahl der Kombinationen sein. Daraus ergeben sich beispielhaft folgende Besetzungsstrukturen, siehe Bild 1a) und b).

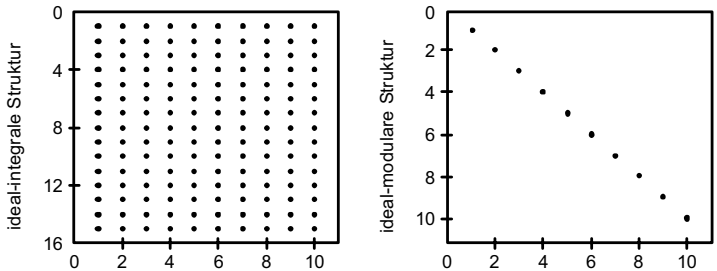


Bild 1: a) Besetzungsstruktur einer ideal-integralen 15 x 10 Matrix;
b) und einer ideal-modularen 10 x 10 Matrix

Die von Hölltä-Otto entwickelten Formeln sind in Tabelle 2 auf drei ideale Strukturen angewendet worden.

Tabelle 2: SMI-Werte für ideale Produktarchitekturen

Bezeichnung	Matrix	SMI_{2005}	SMI_{2007}	NZF_{PA}
Integral	15x10	-0,2247	0,0026	1,000
Integral	10x15	-0,2247	0,0026	1,000
Modular	10x10	1,000	8,6469E15	0,1000

Für eine vollständig modulare Produktarchitektur ergibt sich mit der Berechnungsmethode von 2005 ein SMI von 1,0 und für integrale Produktarchitekturen sinkt der SMI. Wenn sich die Anzahl der Funktionen stark von der Anzahl der Komponenten unterscheidet, wächst der SMI ins Negative. In diesem Fall wird der erste Singulärwert größer als die Anzahl der Singulärwerte. Andere Werte ergeben sich mit dem Ansatz von 2007. Hier strebt eine integrale Produktarchitektur gegen null und eine modulare Produktarchitektur wächst ins Unendliche. Die Ursache für dieses Verhalten liegt in den konstanten Singulärwerten einer

modularen Produktarchitektur. Dadurch wächst die Summenfunktion aus der Formel stetig und ein Minimum wird bei großen Werten für α gefunden. Die Werte der Methode von 2005 bewegen sich im Vergleich zu der Methode von 2007 in einem kleineren Bereich und liefern eine feinere Differenzierung des Modularen Grads. Zudem kann festgestellt werden, dass die Werte unabhängig von der Ausrichtung der Matrix (m x n oder n x m) sind.

4.2 Beispielprodukt

Als Beispiel dient ein einfach ausgestattetes Fahrrad. Um den SMI-Kennwert zu bestimmen, wurden im ersten Schritt für dieses Produkt die Produktstruktur aus Montagesicht und eine Funktionsstruktur aus Konfigurationssicht aufgestellt. Mit diesen beiden Strukturen wurde anschließend die Produktarchitektur ermittelt. Bild 2 zeigt auszugsweise die Produktarchitektur.

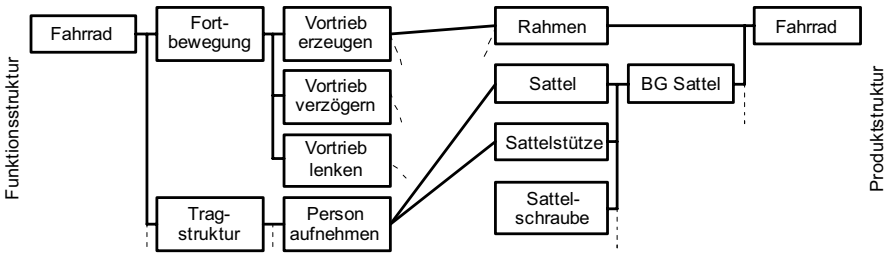


Bild 2: Ausschnitt der Produktarchitektur des Beispielproduktes

Mit Hilfe der zwei Strukturen und der Produktarchitektur wurden die Besetzungsstrukturen, siehe Bild 3a und b, für die folgende Berechnung erzeugt.

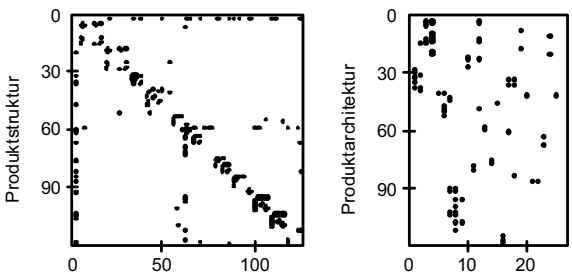


Bild 3: Besetzungsstrukturen a) der Produktstruktur und b) der Produktarchitektur

An der Besetzungsstruktur der Produktstruktur sind die typischen busmodularen Muster zu erkennen (vgl [3]). Bei der Besetzungsstruktur der Produktarchitektur ist die geringe Besetzung der Matrix auffällig. Beide Aspekte weisen somit auf einen eher hohen Modularen Grad hin.
Die berechneten Kennwerte für die Produktstruktur und die Produktarchitektur sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Berechnung der Kennwerte für das Beispielprodukt

Bezeichnung	Matrix	SMI_{2005}	SMI_{2007}	NZF/NZF_{PA}
Produktstruktur	137x137	0,9583	0,1479	0,0155
Produktarchitektur	26x137	0,9136	0,4201	0,0354

Die Ergebnisse sind in dem betrachteten Beispiel ähnlich, unterscheiden sich aber je nach verwendeter Berechnungsmethode erheblich. Nach der 2005 vorgestellten Formel ist die Produktstruktur des Fahrrads mit einem SMI von 0,96 sehr modular aufgebaut. Nach der Formel von 2007 weist sie dagegen mit einem SMI von 0,15 eine integrale Struktur auf. Der NZF-Wert weist wie der SMI_{2005}-Wert auf ein modulares System hin, da der Wert mit 0,0155 auf eine verhältnismäßig schwach besetzte Matrix deutet.
Gleiche Diskrepanzen der beiden Formeln weisen die Werte für die Produktarchitektur auf.

5 Zusammenfassung

Die Erweiterung des Singular Value Modularity Index an dem Beispielprodukt Fahrrad zeigt sowohl Stärken als auch Schwächen der Methode.
Ein Vorteil des Ansatzes ist, dass er allgemein anwendbar ist. Er ist unabhängig vom Produkt und kann bei vorhandener Produkt- und Funktionsstruktur sowie der Produktarchitektur schnell durchgeführt werden. Die physische Modularität ist durch die Aufstellung der Produktstruktur als Design Structure Matrix unabhängig vom Ersteller. Außerdem ist die Messgröße durch ihre Skalierung gut geeignet, um verschiedene Produkte hinsichtlich ihrer Modularität zu vergleichen. Die Berechnung der physischen und funktionalen Unabhängigkeit wird durch die einheitliche Formel vereinfacht.
Neben den Vorzügen gibt es auch Defizite, die bei der Nutzung des Ansatzes berücksichtigt werden müssen. Dazu zählt die Abhängigkeit des Modularen Grads von der

Detaillierung der Produktstruktur, der Funktionsstruktur und der Produktarchitektur. Weiterhin erzeugt die Formel zur Berechnung des SMI von 2007 keine eindeutigen, konsistenten Ergebnisse. Insgesamt ist die betrachtete Formel von 2005 sehr gut geeignet, um verschiedene Konzepte auf ihre Modularität zu überprüfen und miteinander zu vergleichen. Dabei sollte jedoch ein einheitlicher Detaillierungsgrad der Strukturen zugrunde gelegt werden.

6 Literatur

[1] Baumgart, Inka: Modularisierung von Produkten im Anlagenbau Aachen, Mainz, 2005

[2] Hölttä, Katja; Suh, Eun Suk; de Weck, Olivier (Hg.): Tradeoff Between Modularity and Performance for Engineered Systems International Conference on Engineering Design. Melbourne, August 15 - 18, 2005.

[3] Hölttä-Otto, Katja: Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. In: Concurrent engineering, Vol. 15; Numb 2; 2007

[4] Göpfert, Jan: Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Diss. (Markt- und Unternehmensentwicklung): Deutscher Universitätsverlag, 1998

[5] Ulrich, Karl: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy 24, S. 419–440, 1995

Global Engineering – Ganzheitliche Produktentwicklung unter Beachtung internationaler, religiöser und kultureller Einflüsse

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar

University of Applied Sciences: Technology, Business and Design

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

FB Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik

Philipp-Müller-Str. 14, Postfach 1210, 23952 Wismar

Email: henrik.schnegas@hs-wismar.de

Inhalt: *Globalisierung bedeutet nicht nur die Erschließung neuer Märkte und das Anbieten von Produkten international, sondern auch das Verschmelzen von Unternehmen, wodurch eine internationale Zusammenarbeit zum Beispiel auch in der Konstruktion notwendig wird. Diese Kooperation bedarf der verstärkten Zusammenarbeit nicht nur von Teammitgliedern unterschiedlicher Sprach-, sondern z.B. auch unterschiedlicher Kultur- und Religionskreise. Mental und psychologisch gibt es oft gravierende regionale Unterschiede zwischen möglichen Teammitgliedern, die für eine erfolgreiche Produktentwicklung harmonisiert werden müssen. Diese Harmonisierung basiert vordergründig auf Toleranz, Verständnis und vor allem Kenntnis des jeweils anderen Kulturkreises. Bedeutend sensibler ist jedoch die eigentliche Produktentwicklung. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass eine fehlende Berücksichtigung regionaler Besonderheiten, den Erfolg eines Produktes verhindern kann. Aus diesem Grund ist es heute erforderlich, dem Konstrukteur nicht nur fachliches Wissen mitzugeben, sondern auch ein umfassendes Wissen über den Marktbereich eines zukünftigen Produktes. Im Rahmen des Design for X soll zu den herkömmlichen Gestaltungsprinzipien auch eine Art Softskill hinzukommen, zu denen eine religions-, mental,- kulturkreisgerechte Produktgestaltung gehört. Im Rahmen des vorliegenden Vortrages werden in Bezug auf eine durchzuführende globale Produktentwicklung eine religionsspezifische Produktgestaltung, Produktfarben, Symbole, Zahlen in unterschiedlichen Kulturkreisen, Produktnamen unter dem Einfluss marktrelevanter Sprachen im Zeichen des CE-Siegels und marktspezifische Tabuthemen im Rahmen der Entwicklung neuer Produkte betrachtet.*

Abstract: *A global market is a normal characteristic of our time. Companies works for international markets. Companies are global players. Engineers and staff must work together in international teams. Because there are a lot of linguistic, cultural, religious or mental differences we need new rules for teamwork in design process. In the talk are any facts for better understanding in multicultural teamwork. The facts will help to avoid or settle conflicts or reduce psychological stress by intercultural differences in international teams.*

Stichwörter: *Globale Ingenieurarbeit, interkulturelle Konstruktionsteams, mental-religiöse / multikulturelle Wissenskompetenz, Softskills für die Konzept- und Gestaltungsarbeit*

Keywords: *Global Engineering, intercultural Design teams mental-religious / multicultural knowledge competence,softskills for concept and Design process*

1 Globalisierung und Produktentwicklung

Bedingt durch die Kommunikationstechnik und vor allem uneingeschränkte Mobilität rückt die Welt seit Jahren immer mehr zusammen. Vormals nationale Märkte werden globalisiert. Das heißt vor allem, dass die Produktion von Gütern dort angesiedelt wird, wo Marktvorteile wie z.B. niedrige Löhne, niedrige Materialkosten, moderate Produktionsbedingungen oder auch besondere wissensspezifische Fähigkeiten und Fertigkeiten den Markt bestimmen. Eine weitere Entwicklungstendenz gehört Produkten, die nicht nur regional, sondern nach Möglichkeit auch international angeboten werden sollen.

Egal welche Tendenz vordergründig betrachtet wird, ein globales Agieren erfordert in einem immer stärkeren Maße auch für Konstrukteure ein internationales Denken und Handeln. Dieses wiederum ist naturgemäß nicht nur mit sprachlichen, sondern auch mit kulturellen, religiösen, mentalen, psychologischen oder ethischen Herausforderungen verbunden. Nicht zuletzt der unvorbereitete Kontakt unterschiedlicher Kulturen und vor allem Religionen führt oft zu Unsicherheiten und nicht selten auch zu Konflikten, die ein wirtschaftlich erfolgreiches Agieren gefährdet oder zumindest beeinträchtigen kann.

Aus diesem Grund ist Konstrukteuren, die internationale Produkte z.B. in einem internationalen und oft interkulturellen Team entwickeln sollen, ein zusätzliches „Werkzeug“ während des Produktentwicklungsprozesses an die Seite zu stellen, welches als Softskill bezeichnet werden kann. In Bild 1 ist dieses zusätzliches „Werkzeug“ mit *Interkultureller Kompetenz* umschrieben, die in den folgenden Ausführungen weiter untersetzt werden soll.

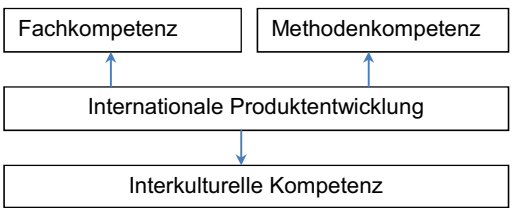


Bild 1: Kompetenzfelder erfolgreicher Produktentwicklung

2 Interkulturelle Kompetenz

Interkulturelle Kompetenz beschreibt die allgemeine Fähigkeit, in internationalen und international agierenden Teams tolerant und möglichst konfliktarm zu kommunizieren und zusammenzuarbeiten. Dafür erforderlich ist die Fähigkeit aller Teammitglieder, mit Neugierde, Offenheit und Interesse, sich auf andere Kulturen, Personen und Nationen einzulassen, aber auch ein natürliches Bestreben, andere Kulturen, Religionen und z.B. deren Moralvorstellungen kennenzulernen und das so gewonnene Wissen konsequent bei der Produktentwicklung einzusetzen. Ändern werden sich Menschen in der Regel nicht, denn dass, was seit der Jugend anerzogen und erlernt wurde, wird aus psychologischer Sicht zu einem untrennbaren Bestandteil der Persönlichkeit. Im Rahmen einer Produktentwicklung schafft so eine positive offene Einstellung den notwendigen Rahmen z.B. in der Planungsphase bei der Erstellung einer Anforderungsliste, landesspezifische Besonderheiten angemessen zu berücksichtigen. Gleichzeitig werden bei der Zusammenstellung von Entwicklungsteams personenspezifische kulturelle, ethisch - moralische und religiöse Besonderheiten berücksichtigt.

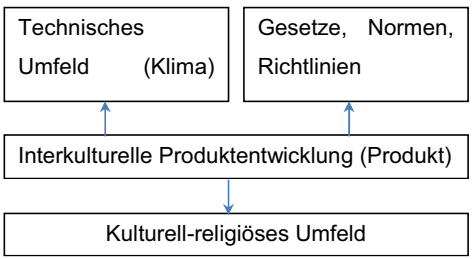


Bild 2: Einflussfaktoren auf internationale Produkte

3 Interkulturelle Kompetenz in der Produktentwicklung

3.1 Zusammenstellung interkultureller Entwicklerteams

Betrachten wir den klassischen Entwicklungsprozess nach VDI 2221 mit den Hauptphasen Planung, Konzept, Entwurf und Ausarbeitung, so kann ein sehr markantes Persönlichkeitsmuster für die beteiligten Produktentwickler in jeder Phase definiert werden. Während in der **Planungsphase** im Sinn eines internationalen Produktes neben den herkömmlichen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen vor allem moralisch -

ethische, religiöse Kenntnisse von Bedeutung sind und Tabuthemen oder sogar Verbote für das Zielgebiet bekannt sein sollten, müssen in der **Konzeptphase** vor allem Persönlichkeiten integriert werden, die nach Möglichkeit hierarchiefrei, eigenständig, selbstbewusst, selbstbestimmt und objektiv arbeiten können. Wenn Ideen generiert werden, die aus den Grenzen des Gewohnten ausbrechen und am Ende auch noch objektiv bewertet und als beste Lösung ausgewählt werden müssen, dann ist der oben beschriebene Menschentyp unabdingbar.

In der **Entwurfsphase** wird primär das reine Fachwissen benötigt. Interessant dürfte hier das allgemeine Zeitverhalten im Projekt sein. In der abschließenden **Ausarbeitungsphase** stehen sprachliche Fähigkeiten im Vordergrund und Eigenschaften wie Empathiefähigkeit, denn es geht hier primär um Dokumentationen und Betriebsanleitungen, die natürlich der marktspezifischen Mentalitäten entsprechen müssen.

Hilfreich beim Identifizieren, aber auch Verstehen geeigneter Teammitglieder ist das Modell des Sozialpsychologen und Organisationsanthropologen **Gerard (Geert) Hendrik Hofstede**. Nach Hofstede [1] können Teammitglieder z.B. nach den 4 Hauptkriterien beurteilt werden. Diese Zuordnung soll geeignete Teammitglieder für die jeweiligen Entwicklungsphasen identifizieren. Genannt werden bei Hofstede als Kategorien:

- Machtdistanz
- Individualismus/Kollektivismus
- Maskulinität/Feminität und
- Unsicherheitsvermeidung.

Die ***Machtdistanz*** gibt das Verhältnis zu einer Autorität an. Hier werden diktatorische Bedingungen mit großer Machtdistanz bzw. demokratische mit geringer Machtdistanz beschrieben. In Staaten mit großer Machtdistanz stehen Befehle, Anweisungen bzw. Aufträge im Vordergrund. Eigenständiges Arbeiten ist kaum ausgeprägt. Erwartet werden klare Aufgabenstellungen, die dann zielstrebig erfüllt werden. Ausgeprägt ist eine große Machtdistanz ins besonders in asiatischen, arabischen und auch afrikanischen Ländern.

Individualismus/Kollektivismus gibt die Fähigkeit an, in der Gruppe zu agieren. Kollektivismus strebt nach Harmonie, Teammitglieder werden auch bei Fehlern nicht bloßgestellt, direkte Auseinandersetzungen werden vermieden, auch Reden oder Präsentationen werden ohne Abstimmung nicht gehalten. Dieses Verhaltensmuster ist ebenfalls dem asiatischen bzw. auch skandinavischen Markt zuzuordnen.

Maskulinität/ Feminität bezeichnet die eigene Dominanz. Feminität steht für Bescheidenheit, Zurückhaltung, Sensibilität und Kompromissbereitschaft. Regionen für Feminität sind die Niederlande, Skandinavien, Lateinamerika, Osteuropa und Ostafrika. Regionen für Maskulinität, wobei Zielstrebigkeit, uneingeschränkter Ehrgeiz, das Streben zum Ausdiskutieren oder Versagen als Tabu dominieren, sind z.B. USA, Großbritannien, Irland oder Südafrika und Deutschland. Im letzten Punkt der ***Unsicherheitsvermeidung*** wird eine kleine bzw. große Unsicherheitsvermeidung unterschieden. Eine kleine Vermeidung steht für Spontanität, Kreativität. Mut zu Neuem ist gegeben. Im Unterschied dazu steht große Unsicherheitsvermeidung für Zurückhaltung. Stress bzw. Angst oder Unbehagen vor Neuem stehen oft bei großer Unsicherheitsvermeidung im Vordergrund.

3.2 Nonverbale Kommunikation

Die im Punkt 3.1 genannten Eigenschaften stellen anerzogene, gesellschaftlich bedingte Charakterzüge dar, die sehr schwer zu verändern sind. Leichter verändert werden kann dazu im Gegenzug die *Nonverbale Kommunikation*, die zwar auch ein Ergebnis des sozialen und gesellschaftlichen Umfeldes ist, jedoch an- oder bewusst um trainiert werden kann. Zur Nonverbalen Kommunikation gehören:

> Mimik, Gestik, Kopfbewegungen, Blickrichtungen, Körperhaltung, Distanzverhalten, oder Körperkontakt,

was in vielen Fällen regional unterschiedlich empfunden wird. In vielen arabischen Ländern wird so z.B. eine eher kurze Distanz bei Diskussionen zwischen zwei Personen gewählt. Körperkontakt, wie z.B. das Auflegen einer Hand auf den Arm des Gesprächspartners sind normal. Dieses verursacht in Europa eher Unbehagen und gilt in asiatischen Ländern sogar als Bedrohung bzw. als Beleidigung. Während in Europa ein nach oben getreckter Daumen „super“ oder „gut gemacht“ bedeutet, stellt er in arabischen Ländern eine Beleidigung dar, da er dem ausgestreckten Mittelfinger in Europa entspricht.

3.3 Religiöse Einflüsse

Bedeutend schwieriger und vor allem komplexer stellen sich die religiösen Beziehungen dar. Handlungsanweisungen für den Alltag, Gebetszeiten, Essen- und Trinkvorschriften, Tabuthemen, Mann-Frau-Beziehung und andere Wertvorstellungen stehen im Fokus. Beim Miteinander von Teammitgliedern unterschiedlicher Religionen sollte ein

Mindestmaß an Kenntnis der jeweils anderen Religion und darauf bezogen an Toleranz dem Team eingeprägt sei. Ein Mindestmaß ist z.B. die Kenntnis von Frei- und Feiertagen (Islam: Freitag, Juden: Samstag, Christen: Sonntag, Weihnachten, Ramadan, Hchanuka,…) sein. Die Kenntnis über Gebetspraktiken und deren Zeiten (z.B. Islam gemäß sonnenstandabhängigen Gebetskalender), oder der Umgang mit Essen- und Trinkregeln (Islam kein Alkohol und keine toten Tiere oder gar keine Schweine, Juden nur Tiere mit gespaltenen Hufen, Hinduismus gar kein Fleisch,……) oder die Zusammenarbeit von Mann und Frau und der damit verbundenen Offenbarungscharakteristik z.B. hinsichtlich Kritik und Verständnisfragen ist ebenfalls ein Bestandteil des Basiswissens.

Im Rahmen von Produktentwicklungen kann eine multireligiöse Zusammenarbeit aber auch Vorteile hervorbringen, wie die Produkte der Firma Kosher Innovations aus Israel zeigt. Mit Blick auf die jüdische Religion sind so in den letzten Jahren neue Produktideen und vor allem neue Märkte entstanden, die in Details auch von anderen Religionen wie z.B. dem Islam als interessant erachtet worden sind.

Bild 3: Von orthodoxen Juden initiierte Innovative Sabbat-Produkte

3.4 Sprachliche Einflüsse

Ein besonderes Augenmerk liegt auf der sprachlichen Orientierung eines Entwicklungsteams. Normal erscheint die Anwendung der englischen Sprache, die jedoch nicht immer durchgängig angewendet werden sollte, da die Mehrheit der Teammitglieder nicht gelernt hat, in dieser Sprache zu denken und zu fühlen, was aber sehr wichtig ist zum Beispiel bei

der Anwendung von Kreativitätstechniken bei der Suche nach innovativen Produktideen in der Konzeptphase. Da viele Kreativitätstechniken auf intuitive Mechanismen verweisen, ist eine Anwendung in der eigentlichen Muttersprache zu empfehlen, da nur so die mental und psychisch abgespeicherten Empfindungen, Gefühle und im Unterbewusstsein abgespeicherten Erfahrungen abgerufen werden können. Es ist eine Tatsache, dass eine mehrsprachige Ideensuche vielschichtigere Ideen hervorbringt. Gleiches gilt übrigens auch für Recherchen im Internet bzw. in der Literatur. Die Praxis hat gezeigt, dass Recherchen z.B. in arabischen oder chinesischen Datenbanken aus europäischer Sicht ungeahnte Ideen hervorbringen.

Ein weiterer Vorteil ist in internationalen mehrsprachigen Teams die bessere Bedienung von Dokumentationswünschen. Kaum eine Einzelperson ist in der Lage, so z.B. die im Rahmen der CE-Kennzeichnung geforderten 23 europäischen Amtssprachen einzubringen bzw. den weltweiten Markt mit chinesisch oder arabisch zu bedienen. Gefahren liegen bei unzureichender sprachlicher Vielfältigkeit auch im Versagen oder Fehldeuten von Produktnamen. In Bild 4 sind hierzu 3 Beispiele aus der Autoindustrie angeführt, die im jeweiligen Land oft zu einer Ablehnung führten. (étron frz. Kothaufen, merdeux frz. Scheisser, iiee Mief dt. ….)

Bild 4: Sprachliche Fehlbenennungen bei Automobilen

4 Zusammenfassung

Wie in den vorhergehenden Ausführungen dargestellt, ist für eine erfolgreiche Zusammenarbeit in internationalen Teams eine Reihe von interkulturellen Kompetenzen bei den Teammitgliedern aufzubauen. Neben der Sprache sind das vor allem die kulturell-mentale und die religions-tolerante Kompetenz. Diese Kompetenzen als „Werkzeug“ zu

bezeichnen wird der Realität nicht ganz gerecht, da Werkzeuge in der Regel nicht geeignet sind, rational angewendet, menschliche Beziehungen tiefgehend zu beeinflussen. Diese „Werkzeuge“ müssen unbedingt verinnerlicht werden und somit zu einem Grundwesenszug eines menschlichen Charakters werden. Denn genau diese Kompetenzen wirken sich nicht nur auf eine erfolgreiche Produktentwicklung aus, sondern auch auf den ganz normalen Alltag. Mit Neugierde, Offenheit und Interesse, sich auf andere Kulturen, Personen und Nationen einzulassen können menschliche Konflikte weltweit reduziert und ein friedliches Miteinander gefördert werden.

Literatur

[1] Hofstede, Geert: *Lokales Denken, globales Handeln*. Interkulturelle Zusammen-arbeit und globales Management. DTV Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 4. durchgesehene Auflage, 2009.

[2] Schnegas, Henrik: Skript „Innovations- und Kreativitätstechniken / Entrepreneur-ship“, Wismar, 2010.

Maschinenelemente aus Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr, Dipl.-Ing. André Knopp

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
Email: gerhard.scharr@uni-rostock.de; andre.knopp@uni-rostock.de;
Internet: http://www.leichtbau.uni-rostock.de

Inhalt: *Die vorteilhaften gewichtsbezogenen Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe eröffnen für den Bereich der Maschinenelemente ein großes Weiterentwicklungspotential. Im Vergleich zu den herkömmlich eingesetzten Maschinenelementen, die aus konventionellen metallischen Materialien bestehen, bietet der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden wesentliche Vorteile. Neben einem geringeren Gewicht der Elemente, das zu einer Reduzierung der Gesamtmassen technischer Systeme beiträgt und damit eine effektivere Ressourcennutzung ermöglicht, können vorteilhafte Eigenschaften, wie z.B. verbesserte spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten, sowie ein günstiges Ermüdungsverhalten beobachtet werden. Aufgrund der daraus resultierenden hervorragenden mechanischen Eigenschaften sind Faser-Kunststoff-Verbunde z.B. als Federwerkstoff besonders gut geeignet, da eine optimale Materialausnutzung durch die maßgeschneiderte Konstruktion des Werkstoffes, in Bezug auf die Art der Beanspruchung des Federmaterials, erreicht werden kann. Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien werden hier bereits in Form von Kunststoff-Blattfedern erfolgreich eingesetzt. Im Bereich von rotierenden Massen spielt die Minimierung von Bauteilgewichten eine besondere Rolle. Durch eine zusätzliche Erhöhung der Verschleiß- und Schlagfestigkeit, sowie eine geringere Geräuschemission im Betrieb eröffnen diese Materialien ein bedeutendes Einsatzgebiet, speziell im Bereich der Zahnräder.*

Abstract: *Fibre-Reinforced Plastics (FRP) are lightweight materials with high specific stiffness and strength. It also has other advantages such as increased impact strength and better fatigue properties compared to conventional materials. These properties make it a particularly suitable material for composite gear-wheels and springs. Lightweight FRP gear-wheels would require a lower turning moment thereby saving a lot of energy. Additionally, FRP gear-wheels offer a much reduced noise emission during its service period. Composite springs are lighter and more durable than those made up of metals.*

Stichwörter: *Maschinenelemente, Faser-Kunststoff-Verbunde, Federn, Zahnräder*

Keywords: *machine elements, fibre reinforced material, composite material, composite springs, composite gear wheel*

1 Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien sind durch ihre speziellen Eigenschaften heute bereits in viele Bereiche des Maschinenbaus vorgedrungen und in einigen Anwendungsgebieten unersetzbar geworden, wenn es um die Notwendigkeit konsequenter Ausnutzung möglicher Leichtbaupotenziale zur Erzielung wirtschaftlich arbeitender technischer Systeme geht. Die hervorragenden gewichtsbezogenen Eigenschaften dieser Materialkonfigurationen, die sich je nach Anwendungsfall aus einer intelligenten Kombination der Einzelkomponenten ergeben und damit neue Materialeigenschaften erzielen, eröffnen immer weitere Anwendungsbereiche in allen technischen Disziplinen. Zur Erreichung eines möglichst optimalen Leichtbaugrades ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Systeme vorzunehmen. Diese Materialkonzepte werden heute vorrangig nur dort eingesetzt, wo durch geringe konstruktive Anpassungen hohe Einsparpotentiale erreicht werden können. Nach einmaligen großen Fortschritten sind bei einer weiteren Gewichtsreduzierung schnell Grenzen erreicht. Vielmehr bestehen diese technischen Systeme aus einzelnen Bauteilen und Baugruppen, die zur Realisierung der angestrebten Funktionen zusammengeschaltet werden. Diese werden üblicherweise als Maschinenelemente bezeichnet und definieren, durch die Kombination einer Vielzahl dieser Elemente, die Funktion des technischen Gebildes. Eine weitergehende Optimierung technischer Systeme aus dem Blickwinkel des Leichtbaus kann daher durch die Betrachtung der Maschinenelemente im Einzelnen und einer damit einhergehenden Materialsubstitution erreicht werden.

2 Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien

Der Einsatz von Kunststoffen in der technischen Anwendung hat zahlreiche Gründe, zu denen neben der geringen Dichte auch eine gute Formbarkeit zählt. Die Substitution herkömmlicher metallischer Werkstoffe durch unverstärkte Kunststoffe ist nur bei niedrigbeanspruchten Maschinenelementen möglich. Erst die Verstärkung dieser Werkstoffe mit Fasermaterialien, wie Glas- oder Kohlenstofffasern, die sehr hohe spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserlängsrichtung betrachtet aufweisen, führt dazu, dass ein Einsatz nach Leichtbauaspekten sinnvoll ist.

Beispielhaft zeigt Bild 1 die jeweiligen spezifischen Zugfestigkeiten über den spezifischen Steifigkeiten ausgewählter Leichtbaumaterialien mit unidirektionaler Faserausrichtung, im Vergleich zu konventionellen metallischen Konstruktionswerkstoffen.

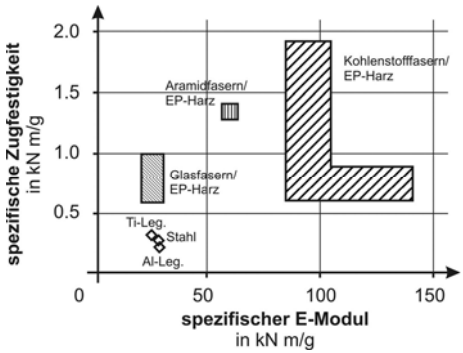


Bild 1: Spezifische Festigkeit über der spezifischen Steifigkeit ausgewählter Materialien

Die in die Kunststoffmatrix eingebetteten Fasermaterialien, die aus unidirektional ausgerichteten, gewobenen und/oder willkürlichen Kurz- oder Langfaseranordnungen bestehen, sind maßgeblich für die Eigenschaften dieser Werkstoffkombinationen verantwortlich. Aufgrund der dargestellten Eigenschaften der Kohlenstofffaser wird häufig kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff im Bereich der Luft- und Raumfahrt, im militärischen Sektor sowie für Spezialanwendungen eingesetzt. Für preiswertere Systeme ist der Einsatz von glasfaserverstärktem Kunststoff aufgrund der geringeren Kosten der Grundmaterialien sinnvoll. Aus der Kombination der Einzelkomponenten resultierend, können allgemein vorteilhafte und nachteilige Werkstoffeigenschaften der Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien beschrieben werden, wobei die Vorteile zu gezielten Anwendungen bei den verschiedenen Maschinenelementen führen.

Die hohe Elastizität, ein gutes Dämpfungsverhalten und eine geringe Kriechneigung führen zu einer besonderen Eignung dieser Materialien für Federn und Zahnräder. Weiterhin bietet ein durch die Verstärkungsfasern deutlich herabgesetzter Wärmeausdehnungskoeffizient die Möglichkeit im Bereich von Messwerkzeugen die thermische Beeinflussung durch Wärmeausdehnungseffekte gezielt auf ein Minimum zu reduzieren. Nachteile, wie die hohen Kosten zur Herstellung der Fasern und der enorme Fertigungsaufwand, ein noch nicht vollständig gelöstes Recyclingproblem sowie die

schwierigen Berechnungsmöglichkeiten, stehen den positiven mechanischen Eigenschaften gegenüber.

3 Maschinenelemente aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Beim Einsatz von faserverstärkten Kunststoffmaterialien für den Bereich der Maschinenelemente, wie z.B. Federn, Zahnräder und Verbindungselemente, werden vorrangig glasfaser- und kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe auf duroplastischer, seltener auf thermoplastischer Basis, genutzt. Die Anwendung dieser Werkstoffe setzt eine umfassende Analyse auftretender betriebsbedingter Beanspruchungen und die daraus resultierenden Spannungsverläufe in den Bauteilen voraus. Dieses Wissen um die örtlich vorliegenden Bauteileigenschaften ist notwendig, um eine gezielte Konstruktion des Werkstoffes und damit eine optimale Werkstoffanpassung an die bestehenden Bauteileigenschaften vornehmen zu können. Gemein ist allen Maschinenelementen, die aus Faser-Kunststoff-Verbunden aufgebaut werden, dass nicht nur umfangreiche Materialeigenschaften des Werkstoffverbundes, bestimmt u.a. durch die Anteile und die Art der Werkstoffkomponenten, sondern auch die genauen geometrischen Eigenschaften des Elementes bekannt sein müssen. Ferner sind umfassende Kenntnisse über die umfangreichen Berechnungsalgorithmen und Versagenshypothesen notwendig, um eine Auslegung für den konkreten Anwendungsfall vornehmen zu können. Hierzu wird hauptsächlich auf geeignete FE-Berechnungsmethoden zurückgegriffen.

3.1 Federn aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Die Einteilung der Federn nach ihrer Gestalt und Belastungsart in zug-/druck-, biege- und torsionsbeanspruchte Federn ist Grundlage dafür, ein Leichtbau-Federelement aus Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien zu entwickeln. Vorrangig werden Endlosfaserverstärkungen verwendet, die primär in Hauptbeanspruchungsrichtung angeordnet sind. Grundlegend kann der Vorteil dieser Anwendung in dem besonders guten Energiespeichervermögen und einem günstigen Ermüdungsverhalten der Materialien beschrieben werden. Allgemein kann für derartige Federelemente unter dynamischer Beanspruchung das Verhältnis von Kraftamplitude und Federweg über der Anzahl der Lastwechsel beschrieben werden. Derartige Ergebnisse, wie in Bild 2 dargestellt, zeigen Untersuchungen an verschiedenen CFK-Federelementen, die bei unterschiedlichen Federungsamplituden und –frequenzen durchgeführt wurden.

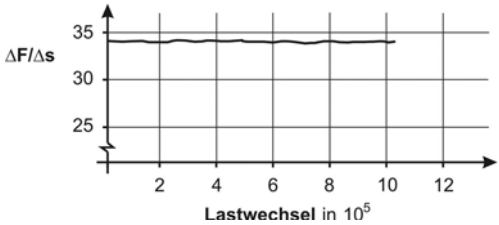


Bild 2: Federsteifigkeit eines CFK-Federelementes über der Lebensdauer

Über einer untersuchten Lebensdauer von $1 \cdot 10^6$ Lastwechseln ist kein Abfall der Federsteifigkeit des Federelementes zu beobachten. Das garantiert eine gleich bleibende Funktion über der gesamten Bauteillebensdauer. Weiterhin ist die Federsteifigkeit nicht nur unabhängig von der aufgebrachten Amplitude und Frequenz der Beanspruchung, sondern auch von der Umgebungs- und somit Bauteiltemperatur.

Zug-/Druckbeanspruchte Federn

Die Ringfeder, die ihrer Belastungsart nach den zug-/druckbeanspruchten Federn zuzuordnen ist, dient vorrangig zur Aufnahme von axial aufgebrachten Druckkräften. Bei Belastungen in axialer Richtung entsteht eine Relativbewegung der Ringe zueinander, die große Reibung in den Berührungsflächen zur Folge hat. Dabei werden die Außenringe gedehnt und die Innenringe gestaucht. Die durch die Deformation der Ringe eingebrachten Spannungen können vorzugsweise von den in Umfangsrichtung angeordneten Fasern aufgenommen werden. Bild 3 zeigt eine derartige Ring-/ Reibungsfeder aus einem CFK-Material.

Bild 3: CFK-Ringfeder

So ist es möglich, neben einer 70%igen Gewichtseinsparung gegenüber vergleichbaren Stahlfedern, ein deutlich verbessertes dynamisches Verhalten zu erreichen und dabei die typischen Federkennwerte (Kraftaufnahme, Dämpfung) einer Reibungsfeder, trotz deutlich besserem Gewichtsnutzungswert, zu erreichen. Ein Einsatz ist im Bereich der Luft- und Raumfahrt denkbar, wo hohe Anforderungen an eine Minimierung der Masse bestehen und große stoßartige Belastungen bei geringen Federwegen auftreten.

Biegefedern

Neben den heute schon in Nutzfahrzeugen (Sprinter von MB) und Personenkraftwagen (Corvette von GM) oder auch in der Orthopädietechnik und im Freizeit- sowie Leistungssportbereich in Serie eingesetzten FKV-Blattfedern, gibt es Anstrengungen dahingehend auch weitere FKV-Biegefederelemente zu entwickeln.

Die Rollfeder sowie die Spiralfeder sind weitere typische Vertreter der biegebeanspruchten Federn, bei denen die Faseranordnung vorrangig in Längsrichtung des Federbandes erfolgt. Bild 4 zeigt eine Rollfeder als CFK-Federelement.

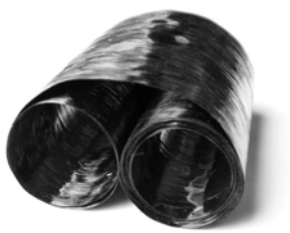


Bild 4: CFK-Rollfeder

Es existieren umfangreiche Untersuchungen zu mechanischen Kennwerten sowie umfassende Betrachtungen zu verschiedenen Fertigungsmöglichkeiten dieser Elemente.

Torsionsbeanspruchte Federn

Die einfachste Form torsionsbeanspruchter Federn stellen die Torsionsstäbe dar. Diese werden bereits als FKV-Drehrohrfedern bzw. GFK-Hinterradstabilisatoren in PKW- und LKW-Fahrwerken eingesetzt und lassen sich mit geeigneten Fertigungstechnologien in reproduzierbarer Qualität herstellen, so dass geforderte Bruchlastschwingzahlen von mindestens $2 \cdot 10^5$ erreicht werden. [3]

Die zylindrischen Schraubendruck- und –zugfedern, deren Federdraht ebenfalls vorrangig auf Torsion beansprucht wird, sind bereits umfassend untersucht und geeignete Berechnungsmethoden zur Auslegung ermittelt worden. Die Fertigung in hohen Stückzahlen, sowie eine reproduzierbare Qualität sind derzeit noch sehr schwer realisierbar.

Weitere Einsatzgebiete

Die positiven Effekte, die sich aus den entwickelten FKV-Federelementen ergeben, eröffnen immer weitere Einsatzgebiete. Beispielhaft können hier die entwickelten Konzepte zur Realisierung eines wartungsfreien pannensicheren Reifens aufgeführt werden, bei denen u.a. die eingesetzten Federn nicht nur die Federungseigenschaften realisieren, sondern auch weitere Funktionen, z.B. Stützfunktionen, erfüllen müssen. Dies stellt besondere Herausforderungen an die Gestaltung der verwendeten Federelemente, die je nach Anwendungsfall individuell nicht nur an die eigentlichen Federungsaufgaben, sondern auch an weitere Funktionen, angepasst werden müssen. Bild 5 zeigt Konzepte druckluftloser Reifensysteme, deren Funktion maßgeblich durch die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbund-Federelementen bestimmt wird.

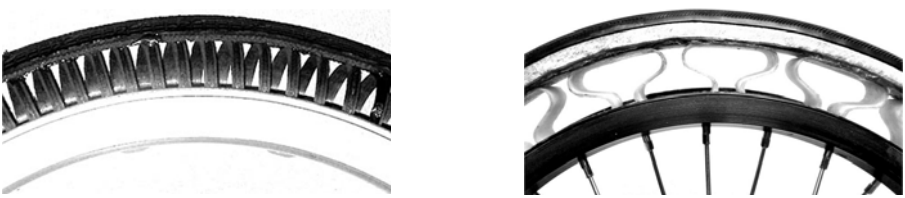


Bild 5: Druckluftlose Reifenkonzepte mit CFK-Schraubenfeder und Biegefedern als Stützelemente

Ein weiteres Beispiel stellt ein Torsionsschwingungsdämpfer dar, dessen Dämpfungs- und Verstimmungsverhalten auf ein schwingendes System durch GFK-Blattfederpakete erreicht wird. Grundlage für diese Entwicklung ist dabei ein bereits bestehendes System eines Gummidrehschwingungsdämpfers, der die für die Kurbelwelle eines Motors schädlichen Schwingungsamplituden über dem gesamten Frequenzbereich verringert. Die Dämpfung erfolgt dabei durch ein Gummielement. Die Nachteile dieser Variante sollen, durch den Einsatz von Federelementen aus Kunststoff mit Faserverstärkung, die anstelle des Gummizylinders eingesetzt werden, eliminiert werden. Bild 6 zeigt eine derartige Entwicklung. [4]

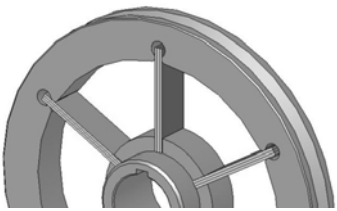


Bild 6: Torsionsschwingungsdämpfer mit Blattfederpaketen [4]

3.2 Zahnräder aus FKV

Im Vergleich zu konventionellen Zahnrädern aus metallischen Werkstoffen kann bei der Nutzung faserverstärkter Kunststoffe eine Reihe von Vorteilen beschrieben werden, die sich aus der gezielten Kombination von Verstärkungs- und Matrixwerkstoff erreichen lassen. Durch deren Variation kann, neben einer hohen Verschleiß- und Schlagfestigkeit, die spezifische Flächenpressung durch eine hohe Eigenelastizität des Matrixwerkstoffes reduziert werden. Einer Werkstoffübertragung zwischen den Zahnflanken ineinander greifender Zahnräder (Fressen) kann damit entgegengewirkt werden. In Abhängigkeit von der Werkstoffkombination können, neben einer hervorragenden Korrosionsbeständigkeit und geringerer Geräuschemission während des Betriebes, ausgezeichnete Selbstschmiereigenschaften erzielt werden, die optimale Notlaufeigenschaften hervorrufen. Die Entwicklung eines Evolventenzahnes mit einer optimierten Anordnung der Verstärkungsfasern im Bauteil, entsprechend des Verlaufes der Hauptnormalspannungen, wurde bereits durch Mitarbeiter des Lehrstuhls durchgeführt. Bild 7 zeigt einen derartigen Evolventenzahn mit dargestelltem optimalem Faserverlauf. [2]

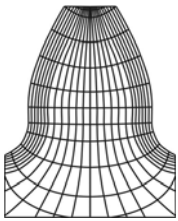


Bild 7: Evolventenzahn mit belastungsoptimierter Faseranordnung [2]

Es ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich der Zahnflanken die Ausrichtung der Fasern in der Weise vorgesehen sind, dass diese senkrecht zur Flanke verlaufen. Die Probleme, die sich aus dieser Anordnung ergeben, schließen die Fertigung eines solchen Elementes mit ein. Die Lösung der Fragen kann zu einem serientauglichen Hochleistungszahnrad, das eine annähernd unbegrenzte Lebensdauer erreicht, führen.

3.3 Verbindungselemente

CFK-Scherstifte

Untersuchungen an Scherstiften unterschiedlicher Materialien und Materialkombinationen haben die Einsatzmöglichkeiten dieser FKV-Elemente, im Gegensatz zu den herkömmlich eingesetzten Werkstoffen, umfassend dargestellt. Hier können exemplarisch die ermittelten Ergebnisse genannt werden, die in Bild 8 eine Gegenüberstellung der absoluten und spezifischen Scherfestigkeit zeigen. [5]

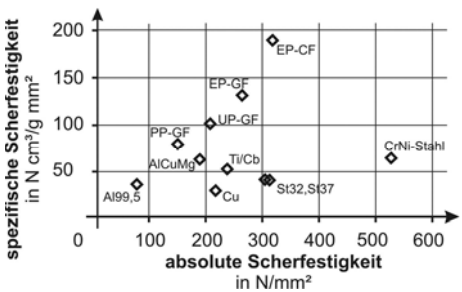


Bild 8: Gegenüberstellung der absoluten und spezifischen Scherfestigkeit untersuchter Scherstiftmaterialien [5]

Es ist zu erkennen, dass beim Vergleich der Scherfestigkeiten von Faser-Kunststoff-Verbunden mit unidirektionaler Faserausrichtung mit den metallischen Bolzen, die Beanspruchbarkeit von CFK-Elementen mit den Werten von konventionellen Stahlbolzen vergleichbar sind. Das Festigkeitsniveau der GFK-Bolzen ist demnach mit herkömmlichen Kupferbolzen vergleichbar. Unter dem Aspekt, dass für gewichtskritische Anwendungen die spezifischen Werte von Interesse sind, kann festgestellt werden, dass die GFK- und CFK-Bolzen ein weitaus besseres Leichtbaupotential besitzen, als die Bolzen aus CrNi-Stahl. [5] Die Anwendung der hierbei ermittelten Eigenschaften bei Scherbeanspruchung können weiterführend auch auf ähnliche Bereiche, wie z.B. Blindniete aus faserverstärkten Materialien, übertragen und daraufhin untersucht werden.

CFK-Blindniete

Es existieren derzeit erste Untersuchungen zu den bereits entwickelten FKV-Blindnieten, die sich mit der Herstellung dieser Elemente aus thermoplastischen Halbzeugen beschäftigen. Eine umfassende Betrachtung des Potentials der CFK-Blindnieten kann erfolgen, wenn eine wiederholbare Bauteilqualität in der Fertigung erreicht werden kann.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Maschinenelemente aus FKV-Materialien eröffnen durch ihre besonderen Eigenschaften nicht nur ein außerordentliches Leichtbaupotential, sondern es können ebenfalls neue nutzbare Eigenschaften erzeugt werden, die eine umfangreichere Nutzung der Maschinenelemente aus FKV-Materialien ermöglichen. Trotz dieser enormen Potentiale sind weitere Anstrengungen notwendig, um eine höhere Akzeptanz dieser Materialien für deren Einsatz in den Maschinenelementen zu erreichen und die genannten Vorteile optimal ausnutzen zu können und diese damit deutlicher herauszuarbeiten. Hinderungsgründe für deren Einsatz sind momentan zum Einen die noch immer schwierigen Berechnungs- und Dimensionierungsmethoden, wie z.B. die Betrachtung von Kontaktproblemen bei Faser-Kunststoff-Verbundmaterialien, zum anderen sind Weiterentwicklungen bezüglich wirtschaftlicher Herstellungsverfahren notwendig, die gleichzeitig wiederholbare Fertigungsqualitäten erreichen.

Literatur

[1] Brökel, Klaus; Grote, Karl-Heinz; Stelzer, Ralph: *4. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2006.* Aachen: Shaker-Verlag, 2006. – ISBN-10: 3-8322-5484-6

[2] Brökel, Klaus; Schlottmann, Dietrich; Scharr, Gerhard: *2. Workshop Konstruktionstechnik-Innovation-Konstruktion-Berechnung.* Shaker-Verlag, 1998. – ISBN: 3-8265-4256-8

[3] Erhard, Gunter: *Konstruieren mit Kunststoffen.* München, Wien: Carl-Hanser-Verlag, 1993. – ISBN 3-446-17397-8

[4] Scharr, Gerhard; Knopp, André: Vorentwurf und Prototypenbau eines Torsionsschwingungsdämpfers unter Verwendung eines Dämpfungselementes auf der Basis von Glasfaserverstärktem Kunststoff. unveröffentlichte Diplomarbeit; 2007.

[5] Fries, Holger: Untersuchungen zur Scherfestigkeit von Bolzen aus unidirektional verstärkten Faser/Kunststoff-Verbunden. Dissertation; 2000.

Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung

Michael Frisch, Andreas Dörnhöfer, Florian Nützel, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth
Email: michael.frisch@uni-bayreuth.de; Internet: http:// www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Die Integration von Fertigungsrestriktionen in den Topologieoptimierungsablauf ermöglicht es dem Benutzer, ein optimiertes und zugleich fertigungsgerechtes Bauteil zu erstellen. Kommerzielle Optimierungsprogramme stellen bereits heute eine Auswahl an Restriktionen für die Fertigung zur Verfügung. Nur für wenige Fertigungsverfahren sind diese Fertigungsrestriktionen jedoch direkt wählbar. Der Großteil der Fertigungsverfahren kann indirekt über eine Kombination von Fertigungsrestriktionen auf Kosten der Rechenzeit und tatsächlichen Wirksamkeit definiert werden. Andere Fertigungsverfahren, wie z.B. Fräsen, Drehen oder Sintern, sind bisher nicht über Restriktionen in der Optimierung berücksichtigt. Auch fehlen quantitative Angaben zur normgerechten Gestaltung für unterschiedliche Werkstoffe bei gleichem Fertigungsverfahren. Eine direkte Einbindung dieser Punkte in Optimierungsprogramme würde den Entwicklungsprozess verkürzen und verbessern.*

Abstract: *The integration of manufacturing constraints for topology optimization allows the user to create a part, which is optimal and suitable for production. A range selection of manufacturing constraints exists in commercial tools. But the choice for direct constraints of the manufacturing process is limited: Most of the constraints for the manufacturing process can be reached by an indirect combination of other constraints. Disadvantages for such combinations are the calculating time and the efficiency of this procedure. Other manufacturing practices like milling, rotating or sintering are not integrated in the process of optimization, yet. Even quantitative data for a standardized structuring of different materials for the same manufacturing process are missing. To improve and shorten the process of development a direct integration of these items is desirable.*

Stichwörter: *Topologieoptimierung, Fertigungsrestriktionen, Fertigungsverfahren*

Keywords: *Topology optimization, Manufacturing constraints, Manufacturing process*

1 Einleitung

Eine hohe Produktivität bei der Entwicklung und Fertigung ist für viele Unternehmen wettbewerbsentscheidend. Wichtige Merkmale, um diese zu steigern, sind z.B. die Einsparung von Materialkosten und die Verringerung von Entwicklungszeiten. Je nach Fertigungsprozess besteht die Möglichkeit, mittels Kostenwachstumsgesetzen aufzuzeigen, wie die Kosten der Fertigung eines Bauteils variieren. Dabei kann

beispielsweise das Verhältnis der Materialeinzelkosten und Fertigungseinzelkosten für den Grundentwurf berechnet und analysiert werden [1]. Aspekte bei der Entwicklung eines neuen Produktes, die heute zum Stand der Technik zählen, sind die Konstruktion mittels CAD-Werkzeugen (Computer Aided Design) [2] sowie die anschließende numerische Simulation [3],[4]. Ein geeignetes Mittel, um Iterationen aus virtuellen und realen Prototypen bei der Entwicklung zu reduzieren, ist der Einsatz von Software zur Strukturoptimierung [5]. Die Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen in den mathematischen Optimierungsalgorithmen hilft dabei, den konstruktiven und fertigungstechnischen Prozess deutlich zu beschleunigen, Materialkosten zu senken und so die Produktivität zu steigern.

2 Topologieoptimierung

Eine Möglichkeit zur automatisierten Erzeugung einer „optimalen“ Bauteilgeometrie im virtuellen Entwicklungsprozess ist die Topologieoptimierung. Diese ist ein Teilgebiet der Strukturoptimierung und beinhaltet eine Synthese aus Finite-Elemente-Analyse (FEA), Optimierungsalgorithmen sowie der Einbindung von Restriktionen zur Fertigung [6].
In der Topologieoptimierung können Zielfunktionen, wie z.B. Steifigkeit, Eigenfrequenzen oder Gewicht durch Änderung der Designvariablen (z.B. Elementdichten) und unter Berücksichtigung von Randbedingungen (z.B. Bauteilvolumen, Verschiebungen oder Fertigungsrandbedingungen) maximiert oder minimiert werden [5], [7]. Für die Lösung des Optimierungsproblems können u.a. Homogenisierungsverfahren, wie bspw. der SIMP-Ansatz (Solid Isotropic Material Penalisation) [7], oder empirische Algorithmen, wie z.B. der SKO-Ansatz (Soft Kill Option) [8] Verwendung finden.
Abhängig von Optimierungsverfahren, Implementierung und Software unterscheiden sich die Ergebnisse von Topologieoptimierungsprogrammen z.T. deutlich [5]. Neben bekannten und weitverbreiteten kommerziellen Tools gibt es zahlreiche zur freien Verfügung stehende, wissenschaftliche Algorithmen [9], [10], die als Basis für eigene Weiterentwicklungen dienen können [11].

3 Fertigungsrandbedingungen

Fertigungsgerechtes Gestalten strebt durch konstruktive Maßnahmen eine Minimierung der Fertigungskosten und -zeiten sowie eine anforderungsgemäße Einhaltung

fertigungsabhängiger Qualitätsmerkmale an [1]. Jeder Werkstoff besitzt demnach funktionsbestimmende Merkmale, die in Kombination mit dem jeweiligen Fertigungsverfahren unter genormten Restriktionen bei der Herstellung berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden unterschiedliche Fertigungsverfahren sowie deren direkte Einbindung in den Topologieoptimierungsprozess über Fertigungsrandbedingungen exemplarisch aufgezeigt.

3.1 Fertigung

Für eine fertigungs- und beanspruchungsorientierte Gestaltung gibt es, je nach Werkstoff und Prozess, gemäß [12], zahlreiche Gestaltungsrichtlinien (Bild 1). Diese Richtlinien lassen sich in Hinweise, Empfehlungen und Vorgaben untergliedern. Am Beispiel von Gussteilen können Gestaltungsrichtlinien anschaulich verdeutlicht werden. So sollten bereits in der Konstruktion Aushebeschrägen festgesetzt, scharfe Kanten vermieden und Wanddicken nur in zulässigen Grenzen modelliert werden. Neben einer modellformgerechten Gestaltung müssen auch die Werkzeugausläufe im Fokus stehen.

Legende:
X = Berücksichtigung notwendig
/ = Berücksichtigung nicht notwendig

		Fertigungsverfahren						
		Guss	*Stanzen*	*Schmieden*	*Pressen*	*Drehen*	*Fräsen*	*Sinteln*
Randbedingungen in der Fertigung	*Entformungs-schrägen*	X	X	X	X	/	/	X
	Unterschnitte/ Hinterschnei-dungen	X	X	X	X	X	X	X
	Winkelmaße	/	X	/	/	X	X	/
	Wanddicken-maße	X	X	/	X	X	X	X
	Symmetrische Konturen	X	X	X	X	X	X	X
	Tiefenmaße	X	X	/	X	X	X	X
	Schleifbare Querschnitte	X	X	X	X	X	X	X
	Freischnitt / -stich	/	/	/	/	X	X	/

Bild 1: Zu berücksichtigende Fertigungsrandbedingungen in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens

Qualitative Formulierungen sind in den DIN-Taschenbücher 454 und 455 explizit beschrieben. So werden anhand des Beispiels Guss die Formschrägen für innere und äußere Flächen an Modellen sowie an Kernmarken je nach Höhe mit unterschiedlichen Schrägenwinkeln angegeben [16]. Weiterführend sind für unterschiedliche, gießbare Werkstoffe (z.B. Stahlguss, Temperguss, Gusseisen mit Kugelgraphit oder Lamellengraphit) Abmaße für Dicken (Wanddicken, Stege, Rippen) vorgeschrieben [14], [15]. Für andere Fertigungsverfahren, wie z.B. Pressen oder Umformen, sind analog zum

Guss ebenfalls Richtlinien, Normen und Empfehlungen mit Konstruktionshinweisen verfügbar.

3.2 Topologieoptimierung

Um eine schnelle und automatisierte Umsetzbarkeit von Gestaltungsrichtlinien im virtuellen Konstruktionsprozess zu gewährleisten, ist deren direkte Berücksichtigung in der Bauteilsynthese durch Topologieoptimierung notwendig. Nur so lassen sich manuelle Iterationen auf Kosten von Entwicklungszeit und Optimierungsergebnis vermeiden. Fertigungsrestriktionen sind in begrenztem Maße bereits heute in kommerziellen Topologieoptimierungsprogrammen integriert. Deren Anwendung setzt jedoch gerade bei realen Praxisbeispielen oft Expertenwissen voraus. Die genaue Funktionsweise und die Implementierung derartiger Restriktionen im Code sind in der Literatur nur vereinzelt beschrieben. So befassen sich z.B. *Zou et al*. mit Herstellungs- und Bearbeitungsrandbedingungen, die dabei helfen sollen Bauteilkonturen ohne eingeschlossenen Hohlraum zu erzeugen und symmetrische Anordnungen bei der Optimierung zu berücksichtigen [22]. Rippenmodellierungen zur Versteifung werden von *Harzheim* erörtert und ein Vergleich von Gussrandbedingungen bei kommerziellen Tools wird dargestellt [18], [19]. Einen neuen Ansatz zur Einbindung von Gussrestriktionen mittels einer Heaviside-Design-Parametrisierung zeigt *Gersborg*, um die Anzahl an Designvariablen zu minimieren und somit die Berechnungszeit zu verkürzen [21]. Fertigungsrestriktionen werden bei kommerziellen Tools vorrangig von der Anwenderseite aus betrachtet [23], [24], [25]. Genauere Informationen über Implementierungen sind meist nicht bekannt.

Anhand zweier weit verbreiteter Optimierungsprogramme wurden exemplarisch die Funktion und Anwendbarkeit von Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung untersucht (Bild 2).

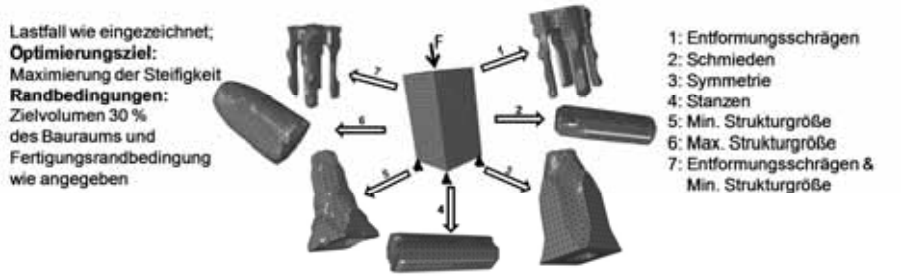


Bild 2: Topologieoptimierung unter Fertigungsrestriktionen bei einem einfachen Testbeispiel

Diese an einfachen Testbeispielen und realen Bauteilen durchgeführten Beispielrechnungen zeigen, dass die in Topologieoptimierungsprogrammen integrierten direkten Restriktionen einzeln angewendet nicht alle gängigen Fertigungsverfahren abdecken (Bild 3). Durch Kombination von mehreren direkten Restriktionen wurde versucht, eine indirekte Berücksichtigung dieser Fertigungsverfahren zu erzielen.

Legende:
X = Berücksichtigung vorhanden
/ = Berücksichtigung nicht vorhanden
⌂ = Berücksichtigung notwendig

Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung	Fertigungsverfahren						
	Guss	*Stanzen*	*Schmieden*	*Pressen*	*Drehen*	*Fräsen*	*Sintern*
Minimale Strukturgröße	X	/	/	⌂	/	/	⌂
Maximale Strukturgröße	X	/	/	⌂	/	/	⌂
Entformungs-richtung	X	X	X	⌂	/	/	⌂
Symmetrie	X	X	X	⌂	⌂	⌂	⌂
Fixierte Elemente	X	X	X	⌂	⌂	⌂	⌂

Bild 3: Direkte Fertigungsrestriktionen in der Topologieoptimierung

Bei den untersuchten klassischen Fertigungsverfahren, wie z.B. Strangpressen, Spritzgießen, Fräsen, Drehen, Gesenkformen, Pressen oder auch neuen generativen Verfahren wie z.B. Lasersintern gelingt dies z.T. nur partiell oder mit unbefriedigendem Ergebnis. Zum einen sind einige direkte Restriktionen gar nicht oder in nicht ausreichendem Maße verfügbar (Berücksichtigung der Zustellung bei Fräsbearbeitung), zum anderen ist eine Kombination unterschiedlicher Restriktionen in einem Optimierungsprozess nur eingeschränkt möglich, da teilweise explizit durch die Software

ausgeschlossen, teilweise durch die schlechte Güte des Optimierungsergebnisses und die lange Berechnungszeit nicht sinnvoll. Sind in einem Programm verschiedene Optimierungsalgorithmen vorhanden, so sind darüber hinaus auch nicht alle Restriktionen damit kombinierbar [23]. Die sinnvolle Anwendung und Kombination der direkten Restriktionen verlangt angesichts dieser Schwierigkeiten nach Expertenwissen und Erfahrung.

Ein Lösungsansatz dafür könnte daraus bestehen, alle vorhandenen Restriktionen des Optimierungsprogramms sowie die für zahlreiche Fertigungsverfahren benötigten direkten Restriktionen und Kombinationen daraus in eine benutzerfreundliche und einfach bedienbare GUI (Graphical User Interface) einzubinden. *Alber-Laukant* beschreibt für die FEA ein solches Modell, welches dem Benutzer eine intuitive Hilfe und Vereinfachung der Simulation bietet [17]. Dieses Beispiel kann als Grundlage für den Einsatz in der Topologieoptimierung mit Fertigungsrandbedingungen dienen. Der Benutzer soll nach Definition der Zielfunktion und der Designvariablen das Fertigungsverfahren und den Werkstoff für das zu optimierende Bauteil auswählen können. Bei der Selektion des Verfahrens können dabei die zu berücksichtigten Restriktionen nach Norm (z.B. Rundungs-, Tiefen-, Winkeltoleranzen, Abmessungsgrenzen und -verhältnisse, Freistiche, Fräsflächen, etc.) in einer Maske eingegeben und die Randbedingungen dem Bauraum bzw. den restriktiven Oberflächen zugewiesen werden. Durch die Logik der GUI werden dem Benutzer nur sinnvolle und nach Norm kombinierbare Restriktionen vorgeschlagen und quantitative Werte empfohlen. Auf diese Weise wird die Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens in der Topologieoptimierung auch ohne Expertenwissen möglich.

Die optimierten Ergebnisse der Topologieoptimierung sind nicht geglättet und weisen eine zerklüftete Elementstruktur an der Oberfläche auf. Dieses Resultat soll durch eine nachgeschaltete Glättung verbessert werden. Ein aktuell noch nicht zufrieden stellend gelöster und nach wie vor notwendiger Punkt in der Prozesskette ist die manuelle Neumodellierung des optimierten Bauteils im CAD-System [26]. Das Optimierungsergebnis muss dabei per Schnittstelle in das CAD-Programm als grafische Vorlage überführt werden. Hier gestaltet der Konstrukteur die optimierte Struktur fertigungsgerecht nach und übergibt das virtuelle Bauteil dem Fertigungsprozess. Durch eine direkte Berücksichtigung der Fertigungsrandbedingungen in der Topologieoptimierung kann dieser Schritt zwar nicht vermieden werden, der Aufwand zur Neumodellierung reduziert sich jedoch durch größere Modellnähe zwischen

Optimierungsergebnis mit bereits berücksichtigtem Fertigungsverfahren und Neumodell drastisch. Darüber hinaus weist das Neumodell meist Bauteileigenschaften auf, die näher am rechnerischen Optimum liegen als bei einer alleinigen Berücksichtigung der Fertigung durch den Konstrukteur.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um Fertigungskosten und Materialbedarf im Herstellprozess zu minimieren, ist die Simulation mit Hilfe der Topologieoptimierung ein geeignetes Mittel. Die direkte Berücksichtigung des gewünschten Fertigungsverfahrens im Optimierungsprozess hilft dabei, die Integration in die Prozesskette deutlich zu verbessern. Einzelne Restriktionen wie Entformungsrichtungen, minimale und maximale Größenanordnungen oder Symmetrieeigenschaften sind in kommerziellen Programmen bereits heute verfügbar. Je nach Anwendung können diese jedoch nur sehr allgemeingültig definiert werden. Reale Fertigungsverfahren erfordern oft auch nicht nur die Anwendung einer einzelnen Restriktion, sondern die Kombination aus mehreren. Eine gezielte Auswahl des Fertigungsverfahrens, wie z.B. Fräsen, Drehen oder Strangpressen mit einer kontextsensitiven Wahl von Restriktionen und quantitativen Parametern nach definierten Normen und Richtlinien ist bisher nicht möglich. Dies könnte durch die Einbindung in eine GUI verbessert werden, die darüber hinaus eine Auswahl an Fertigungsrandbedingungen mit quantitativen Normmaßen beinhaltet und diese in die Optimierung integriert. Die Kombination von einzelnen Restriktionen in einem Optimierungsschritt ist bereits jetzt möglich, aber aufgrund von Ergebnisgüte und Rechenzeit nicht in jedem Fall zielführend. Gezielte Verbesserungen in der Implementierung der Restriktionen unter dem Aspekt bestimmter Kombinationen erscheinen hier für den praxisgerechten Einsatz notwendig.
Grundlage für die flächendeckende Nutzung der Topologieoptimierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen ist es insbesondere, die Bedienbarkeit von Fertigungsrestriktionen im Speziellen und der Topologieoptimierung im Allgemeinen zu vereinfachen und an die spezifischen Bedürfnisse der jeweiligen KMUs anzupassen.

Literatur

[1] Rieg, F.: Kostenwachstumsgesetze für Baureihen. Darmstadt. 1982.

[2] Troll, A.; Zapf, J.; Rieg, F.: *Analysis of CAx-Interpendencies for an Efficient Buisness-Oriented Training*. In: The Design Society: Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design – ICED 09. Stanford, USA. 2009.

[3] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2007.

[4] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*. 3. Aufl. München: Hanser-Verlag, 2009.

[5] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung – Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt am Main: Harri Deutsch-Verlag, 2008.

[6] Dörnhöfer, A.: Leichtbau mit partikelverstärkten Magnesiumlegierungen. Bayreuth, 2008.

[7] Bendsoe, M.; Kikuchi, N.: *Generating optimal topologies in optimal design using a homogenizationmethod*. In: Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Bd. 71, S. 197-224, 1988.

[8] Baumgartner, A.; Harzheim, L.;Mattheck, C.: *SKO (Soft Kill Option): The biological way to find an optimum structure topology*. In: Int. J. Fatigue, Bd. 14, S. 387-393, 1990.

[9] Andreassen, E.; Clausen, A.; Schevenels, M.; Lazarov, B. S.; Sigmund, O.: *Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code*. In: Struct. Multidisc. Optim., Bd. 43, S. 1-16, 2010.

[10] Svanberg, K.: *MMA and GCMMA – version September 2007*. Technical Report, KTH, Stockholm, Schweden, 2007.

[11] Cho, T. M.; Lee, B. C.: Reliability-based design optimization using a family of methods of moving asymptotes. In: Struct. Multidisc. Optim., Bd. 42, S. 255-268, 2010.

[12] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2003.

[13] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich: Konstruktionslehre : Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer, 2007.

[14] DIN-Taschenbuch 454:*Gießereiwesen 1 – Stahlguss und Gusseisen*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2004.

[15] DIN-Taschenbuch 455:*Gießereiwesen 2 – Nichteisenmetallguss*. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2005.

[16] DIN EN 12890: Gießereiwesen - Modelle, Modelleinrichtungen und Kernkästen zur Herstellung von Sandformen und Sandkernen. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2000.

[17] Alber-Laukant, B.; Roith, B.; Zapf, J.; Hackenschmidt, R.; Rieg, F.: *Program design meets engineer´s requirements – a new concept of a freeware finite-element-program*. In: NAFEMS World Congress. Boston, USA, 2011.

[18] Harzheim, L.: Anwendung der Topologieoptimierung mit Fertigungsrestriktionen für Gussteile. In: Industriearbeitskreis Strukturoptimierung, Karlsruhe, 2005.

[19] Harzheim, L.; Graf, G.: *A review of optimization of cast parts using topology optimization*. In: Struct. Multidisc. Optim., Bd. 31, S. 388-399, 2005.

[20] Sigmund, O.: *Manufacturing tolerant topology optimization*. In: Acta Mech. Sin., Bd. 25, S. 227-239, 2009

[21] Gersborg, A. R.; Andreasen, C. S.: An explicit parameterization for casting constraints in gradient driven topology optimization. In: Struct. Multidisc. Optim., 2011.

[22] Zuo, K.-T.; Chen, L.-P.; Zhang, Y.-Q.; Yang, J.: *Manufacturing- and machining-based topology optimization*. In: Int. J. Manuf. Technol., Bd. 27, S. 531-536, 2005.

[23] Anonymous: *TOSCA-Manual, Version 7.0*. Karlsruhe: FE-Design, 2009.

[24] Thomas, H; Zhou, M.; Schramm, U.: *Issues of commercial optimization software development. In:* Struct. Multidisc optim., Bd. 23, S. 97-110, 2002.

[25] Roos, D.; Nelz, J.; Grosche, A.; Stoll, P.: Workflow-Konzepte zum benutzerfreundlichen, robusten und sicheren Einsatz automatischer Optimierungsmethoden. In: 21th CAD-FEM Users` Meeting, Berlin, 2003.

[26] Roy, R.; Hinduja, S.; Teti, R.: *Recent advances on engineering design optimization: Challenges and future trends*. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Bd. 57, S. 697-715, 2008.

Cross-Industry-Innovation in der Antriebstechnik

Dr. Ingo Schulz, Florian Wohlfeil

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

Inhalt: *Aufgrund der in den letzten Jahrzehnten geänderten globalen Markt- und Wettbewerbsbedingungen sehen sich Unternehmen zunehmend mit der Aufgabe konfrontiert, ihre Produktentwicklung sowohl effektiver als auch effizienter zu organisieren. Cross-Industry-Innovation (CII) ist ein leistungsfähiger methodischer Ansatz, welcher zur Lösung dieser Aufgabe beiträgt. Hiermit können neue Produkte schnell, mit beherrschten Kosten und einer bereits zu Beginn hohen Qualität entwickelt werden. In diesem Beitrag wird der Prozess der Cross-Industry-Innovation in der SKF sowie die eingesetzten Methoden und Werkzeuge vorgestellt. Anhand eines Beispiels wird das Potenzial der CII aufgezeigt.*

Abstract: *Due to the global change in respect to markets and competition companies are forced to organize their product development more effective and efficient. Cross-Industry-Innovation (CII) is a powerful approach that helps to fulfil this task. With CII it is possible to develop new products fast with cost control and high quality right from the beginning. In this paper the process of Cross-Industry-Innovation in SKF as well as the used methods and tools are described. A short example of a real product shows the potential of CII.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, Innovation, Cross-Industry-Innovation, Qualität, Zeit, Kosten*

Keywords: *Product Development, Innovation, Cross-Industry-Innovation, Quality, Time, Cost*

1 Einleitung

Durch die Globalisierung der Märkte und das Auftreten neuer, insbesondere asiatischer Wettbewerber wird es für europäische Unternehmen immer wichtiger, neue Produkte schnell und kostengünstig zu entwickeln. Gleichzeitig steigen allerdings auch die Qualitätsansprüche an neue Produkte seitens der Kunden. Aufgrund des Trends zu kundenindividuellen Lösungen droht darüber hinaus die zunehmende Produktvielfalt die Unternehmen aufgrund interner Komplexität ‚zu lähmen'. Ein methodischer Ansatz, diesen Randbedingungen gerecht zu werden, ist das ‚Cross-Industry-Innovation (CII)'.

2 Cross-Industry-Innovation CII

Eine effiziente Vorgehensweise für die Entwicklung von Produkten ist es, bereits bestehendes Wissen zu nutzen und zu neuen Produkten zusammen zu führen. Besonders

die Rekombination von eigenem mit branchenfremden Wissen verspricht hierbei innovative Produkte und neue Differenzierungspotenziale. Hierdurch können für das eigene Unternehmen radikale Innovationen entstehen, die gleichzeitig ein überschaubares Entwicklungsrisiko bieten. Dieses Überschreiten von Grenzen der jeweiligen Industriebranche wird in der jüngeren Vergangenheit häufig als Cross-Industry-Innovation bezeichnet.

2.1 Prozess des Cross-Industry-Innovation

Enkel und Dürmüller bezeichnen Cross-Industry-Innovation als „[…] Transfer von Know-how und Lösungsansätzen über Branchengrenzen hinaus auf der Basis von Analogiebetrachtungen […]“ [1]. Der Prozess der Cross-Industry-Innovation besteht dabei aus drei Phasen:

- Abstraktion: Verlassen des gewohnten Denkschemas, Öffnen des Lösungsraumes.
- Analogie: Auffinden möglicher Lösungen aus anderen Branchen und Industrien.
- Adaption: Auswertung und Auswahl möglicher Lösungen.

Dieser Prozess ist aus der klassischen Konstruktionsmethodik bekannt (vgl. [2][3][5]). Hierdurch existieren bereits zahlreiche Methoden, die Unternehmen anwenden können, um ein erfolgreiches Cross-Industry-Innovation zu etablieren. Als prominentestes Beispiel kann die Funktionsstrukturierung und Effektsynthese nach Koller oder Roth gelten [3][4][5]. In der SKF werden diese Methoden aktiv eingesetzt, um neue Produkte zu generieren. Darüber hinaus hat sich in der Anwendungsberatung eine eigene Methode der CII entwickelt: Sogenannte Cross-Industry-Innovation-Workshops. Da die SKF als ein führendes Unternehmen der Antriebstechnik Entwicklungspartner zahlreicher Unternehmen unterschiedlicher Industrien ist, findet automatisch ein kontinuierlicher Austausch von Lösungen statt. Beispielsweise gelingt es so, etablierte Lösungen aus der Stahlindustrie in die aufstrebende Windenergieindustrie zu transferieren. Hierdurch wird zum einen die Lösungsfindung erheblich beschleunigt und zum anderen ein hohes Niveau der Qualität der Lösung von Anfang an gewährleistet.

2.2 Methoden des Cross-Industry-Innovation

Zwei wesentliche Methoden des Cross-Industry-Innovation, die in der Praxis bei SKF eingesetzt werden, sind Funktions-Effekt-Kataloge und Workshops.

Funktions-Effekt-Kataloge (Funktionsstrukturierung und Effektsynthese)

Funktions-Effekt-Kataloge sind etablierte Methoden der Konstruktionsmethodik und wurden seit den 1970er Jahren intensiv erforscht und entwickelt. Wesentliche Vertreter dieser Methoden waren z. B. Prof. Koller von der RWTH Aachen und Prof. Roth von der TU Braunschweig [3][5].

Durch die Abstraktion des Produkts in Form der Funktionsstruktur wird der eigentliche Zweck des Produkts definiert. Gleichzeitig werden durch die geforderte Lösungsneutralität Begrenzungen des Denkens durch Erfahrungen innerhalb der eigenen Branche aufgebrochen und der Lösungsraum weit aufgespannt. Für die Funktionsstrukturierung können verschiedene Vorgehensweisen genutzt werden [1][3][5][6], wichtig ist am Ende vor allem, dass die Funktionsbezeichnungen kompatibel sind mit den verwendeten Effektkatalogen.

Durch Effektkataloge werden den zu erfüllenden Funktionen physikalische Effekte zugeordnet. Durch die bereits erfolgte Anwendung dieser Effekte in technischen Produkten werden zahlreiche, häufig branchenfremde Analogien aufgezeigt, die die Ideenfindung anregen können.

Aus den Analogien kann dann eine mögliche Lösung adaptiert, also bewertet und ausgewählt werden. Damit kann die Konzeptfindung auf bereits bewährte, trotzdem für die Branche neue Lösungsansätze zurückgreifen.

Cross-Industry-Innovation-Workshops

Letztlich sind Menschen die Träger von Wissen, auch von technologischem Wissen. In der Anwendungsberatung der SKF, Industrial Division Europe Central, besteht die ausgesprochen positive Situation, dass ca. 40 Ingenieure mehr als 20 unterschiedliche Branchen betreuen. Damit verfügt jeder der Ingenieure über spezifisches Branchenwissen auf der Basis des allgemeinen Wissens über Lösungen der Antriebstechnik.

Um dieses Wissen verfügbar zu machen und auf andere Branchen zu übertragen, werden Ideenfindungsworkshops bei der SKF branchenübergreifend durchgeführt. Hierdurch wird eine anregende Durchmischung des Wissens erreicht. Ein wesentliches Ziel hierbei ist es, erfolgreiche Lösungskonzepte von einer Branche in die andere zu transferieren.

Diese ‚Cross-Industry-Innovation-Workshops' basieren hierbei auf dem ‚Bahnhofsmodell', einer von der SKF entwickelten Methodik zur systematischen Ideenfindung [7]. Typischer Weise teilt sich ein CII-Workshop in zwei Teile:

- Die Identifikation der Erfolg versprechenden Technologien.
- Die Ausarbeitung von Produktideen innerhalb der ausgewählten Technologie.

Für die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung der Workshops werden standardisierte Prozesse, Methoden und Werkzeuge genutzt [8]. Diese erlauben eine effektive und effiziente Ideenfindung.

3 Praxisbeispiel SKF Agrihub

Die SKF Agrihub ist ein Beispiel der vergangenen Jahre, bei dem ein erfolgreiches Lösungskonzept aus einer Branche erfolgreich in ein Produkt einer anderen Branche transferiert wurde, Bild 1 [9].

Bild 1: Agri Hub zur Lagerung einer Scheibenegge [9]

Ausgangspunkt war das Bedürfnis nach einer verbesserten Lösung bei der Lagerung von sogenannten ‚Scheibeneggen', einem landwirtschaftlichen Gerät zur Lockerung der oberen Bodenschicht von Feldern. Neben den speziellen Anforderungen der Landwirtschaft nach einem wartungsfreien, einfach auszutauschenden und die Produktivität steigernden Produkt, sollte die neue Lagerung vor allem preisgünstig sein.
Statt für diese Problemstellung von Grund auf eine Lagerung zu entwerfen, wurde bei der Entwicklung der Agri Hub von Anfang an nach bewährten Lösungskonzepten in anderen

Branchen gesucht. Hierbei wurden insbesondere die integrierten Radlagereinheiten betrachtet. Diese wurden Ende der 1930er Jahre von SKF entwickelt und sind heute die etablierten Radlagerlösungen für Pkws und leichte Nutzfahrzeuge.

Aufbauend auf der sogenannten ‚HUB2' für Pkw-Anwendungen wurde die Agri Hub entwickelt, Bild 2. Im Wesentlichen handelt es sich um das Grundkonzept der HUB2, angepasst an die speziellen Anforderungen der Landwirtschaft, z. B. durch ein leistungsfähigeres Dichtungssystem. Hierdurch wurde eine Produktivitätssteigerung von ca. 150 % und eine Kostenreduktion von ca. 30 % für den Landwirt erreicht [Broschüre].

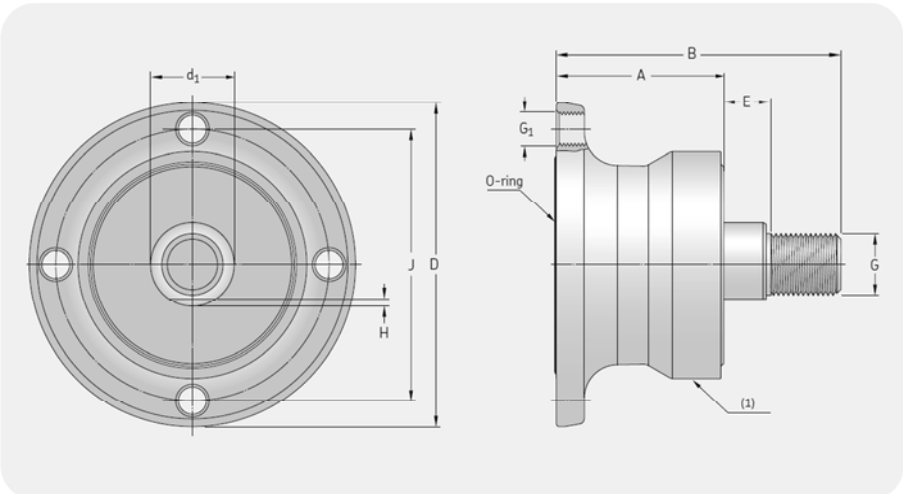


Bild 2: Technische Darstellung der Agri Hub [9]

4 Fazit und Ausblick

Das Cross-Industry-Innovation CII bildet eine leistungsfähige Methodenbasis, um Impulse aus fremden Branchen in den eigenen Produktentstehungsprozess einzubinden. Durch den Rückgriff auf bestehende, in anderen Anwendungen und Branchen bereits bewährte Lösungen kann zum einen die Produktentwicklungszeit verkürzt sowie das Qualitätsniveau von Anfang an hoch gehalten werden. Gleichzeitig bietet das Cross-Industry-Innovation die Möglichkeit, die interne Komplexität der Produktvielfalt, welche nun auf gleiche Grundlagen zugreift, beherrschbarer zu machen.

Bei SKF haben sich verschiedene Methoden des CII in der Praxis bewährt. Durch die Funktions-Effekt-Synthese können insbesondere neue Lösungsansätze aus anderen Branchen und Unternehmen im eigenen Unternehmen angewendet werden. Durch Cross-Industry-Innovation-Workshops wird besonders der interne Transfer von Lösungskonzepten und technologischem Wissen ermöglicht.

Es muss allerdings festgestellt werden, dass die Grundlagen der Funktions-Effekt-Kataloge nunmehr einige Jahrzehnte alt sind. Es ist zu hoffen, dass unter dem Schlagwort ‚Cross-Industry-Innovation' bewährte Methoden der Konstruktionsmethodik wieder die Beachtung finden, die sie verdienen und darüber hinaus weiterentwickelt werden. Im Hinblick auf den Industriestandort Deutschland sollte diese Weiterentwicklung an deutschen Hochschulen erfolgen – und nicht, wie die Anglisierung dieses Forschungsbereichs bereits signalisiert, später von Beratern teuer ‚zurückgekauft' werden müssen.

Literatur

[1] Enkel, Ellen; Dürmüller, Christoph: *Cross-Industry-Innovation : Der Blick über den Gartenzaun*, in: Gassmann, Oliver; Sutter, Phillip (Hrsg.): *Praxiswissen Innovationsmanagement*. München: Hanser, 2008. – ISBN 978-3-446-41481-5

[2] 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

[3] Koller, Rudolf: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau.* 3. Aufl. Berlin: Springer, 1998. – ISBN 3-540-63037-6

[4] Koller, Rudolf; Kastrup, Norbert: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1998. – ISBN 978-3-540-63060-9

[5] Roth, Karlheinz.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen : Band 1; Konstruktionslehre*. Berlin: Springer, 2000. – ISBN 978-3-540-67142-8

[6] VDI 2803 Blatt 1: Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode. Berlin: Beuth, 1996.

[7] Schulz, Ingo; Kern-Trautmann, Andreas: *Effizient vom Megatrend zur Produktidee – das Bahnhofsmodell*. Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe. Düsseldorf: Springer-VDI, 11/12-2009.

[8] Schulz, Ingo; Kern-Trautmann, Andreas: Systematisch innovative Ideen finden : Ein Workshopkonzept zur effizienten Unterstützung der Ideenfindung. Friedrichshafen: VDI Innovationspraxis 2011, 06.-07.07.2011.

[9] SKF Publication 6614 EN: Increase farm productivity with SKF Agri Hub for tillage discs : Relubrication-free, sustainable, cost-effective. Göteborg: SKF Group, 2007.

Finding optimal parameters with fuzzy evaluation of generalized mechanical functions

Attila Piros, Tibor Bercsey

Budapest University of Technology and Economics
Department of Machine and Product Design
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
Email: piros.attila@gt3.bme.hu; Internet: http://www.gt3.bme.hu
Email: bercsey.tibor@gt3.bme.hu; Internet: http://www. gt3.bme.hu

Inhalt: *In Maschinenbauingenieuren oft haben, die Art der Parameter, die nicht bekannt sind, sondern müssen realistisch sein zu finden. Um diesem Fall noch schwieriger manchmal mehrdeutig Parameter ausgewertet werden müssen. Dieser Beitrag stellt zwei mathematische Methoden, um die optimalen Parameter der mechanischen Funktionen zu finden. Fuzzy-Methode hilft die Auswertung der mechanischen Funktionen und deren Kombinationen. Die statistisch basierte verallgemeinerte Funktion Modelle realistische Input für dieses Fuzzy-Auswertung. Beide Methoden sind einfach in Algorithmus zu konvertieren und sie sind in ein aktuelles Design Aufgabe getestet.*

Abstract: *In mechanical design engineers many times have to find the kind of parameters which are not known but must be realistic. To make this case even harder sometimes ambiguous parameters have to be evaluated. This paper introduces two mathematical methods to find the optimal parameters of the mechanical functions. Fuzzy method helps the evaluation of the mechanical functions and their combinations. The statistically based generalized function models provide realistic input for this fuzzy evaluation. Both methods are easy to convert into algorithm and they are tested in an up to date design task.*

Stichwörter: *Fuzzy Evaluation, Generalized mechanischen Funktionen, Daten-Interpolation*

Keywords: *Fuzzy Evaluation, Generalized Mechanical Functions, Data Interpolation*

1 Introduction

Nowadays engineers have to work with high complexity mechanical models. It is a difficult task to find the good parameters of a non-existing construction or to select the proper combinations of the existing components. Due to the strict deadlines and the high variety of parameters and components, advanced mathematical methods need to be introduced to help the engineers in the design procedure. This paper describes a fuzzy evaluation method which, if applied on generalized mechanical models, helps the designers to find

the proper values of the required design variables. The generalized mechanical functions are based on statistically preprocessed data of realized mechanical components.

These functions in the design model can simulate the main components of the construction. These simulated components produce different mechanical properties on these outputs. These properties are further processed with fuzzy evaluating and compatibility check. The compatibility functions define taboo zones to radically decrease the calculating time. Fuzzy evaluation helps to find the best combinations also in ambiguous cases.

In a design process engineers usually try to find the optimal solution of a specific problem. In the case described in this paper the optimal solution means the best combination of the components. The quality of a specific combination depends on the parameters of the selected components. If the selection is only based on existing and well known components probably some good combination would be missed. The statistically based generalized mechanical functions eliminate this problem because these mathematical models use interpolated data therefore they cover the whole solution space.

With traditional evaluation specific components may be excluded because of these properties. e.g. sometimes a value of a property is out of the traditional accepted range but this component can be a member of the optimal combination. Fuzzy evaluation helps to avoid ignoring this kind of component. Fuzzy method enables handling cases when a parameter is not obviously in a good range. Special functions (fuzzy membership functions) can be defined to mathematically handle these cases.

2 Fuzzy evaluation in mechanical conceptual design

Fuzzy logic handles the ambiguous cases of parameter evaluation. This way is close to human thinking because by answering some simple questions the concerning fuzzy membership functions can be set up. A typical fuzzy membership function results on its output a number between 0 and 1. Zero means that the studied value is totally outside the set or range. 1 marks that the value is totally inside the range. Any other value between 0 and 1 shows the ratio of the membership.

There is a servo motor with a given speed-torque characteristic. There is a required torque from the load side of the construction. The evaluation of this case is not as simple as it seems at first sight. The motor can produce more torque than its maximum torque in overloaded case (see Figure 1).

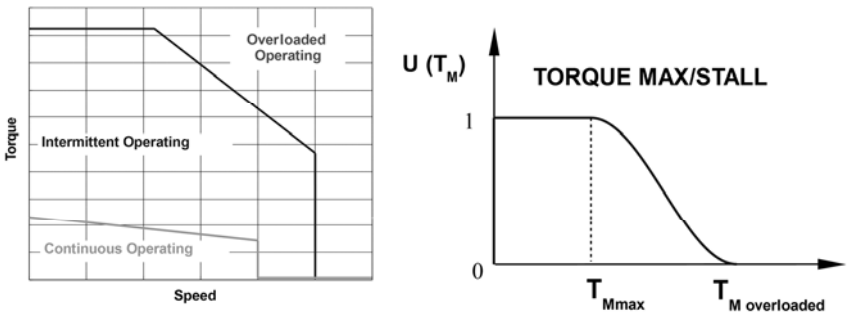


Figure 1: Speed-torque characteristic and the Fuzzy membership function of a specific servo motor

Fuzzy membership functions can handle this special case of overload very well (see Figure 1). The decreasing fuzzy value after the maximum torque simulates the case of overload well.

The evaluation needs special preparation to have proper results at the end of the procedure. Besides establishing the fuzzy membership functions, the design properties must also be classified. There are two kinds of design properties. One of them depends on one or more design variables. Some other properties are independent of any design variables.

The P_{VARn} variant parameters of the created configurations must be calculated. The u_{VARi} fuzzy values are defined with the concerning U_i fuzzy membership functions:

$$u_{VARi} = U_i(P_{VARi}) \tag{1}$$

There are many different functions that must be evaluated in the solution space. Generally the number of the handled fuzzy membership functions are too big to unify them. Literature has examples of unification of only two or three functions. Usually in practice there are five or more membership functions in a simplified case. The different design variations need to have a single, quality related value for comparison.

Introducing the corrected fuzzy mean (R_{FZ}) there is a good opportunity to summarize as many results of the fuzzy membership function as it is required to evaluate the specific design. This value is much simpler to calculate than the traditional results of the fuzzy inference systems.

$$R_{FZ} = \frac{u_{VAR1} \cdot u_{VAR2} \cdot \ldots \cdot u_{VARn}}{\frac{\sum_{i=1}^{n} u_{VARi}}{n}} \tag{2}$$

The evaluated design variation is unequivocally characterized by using the corrected fuzzy mean. The Q_{VAR} variant quality value is calculated from the related fuzzy values in each design variation. The highest Q_{VAR} value marks the best design among the different variations.

$$Q_{VARi} = R_{FZ}(u_{VARi}) \tag{3}$$

3 Generalized mechanical functions

During the conceptual design many different physical principles and mechanical functions are handled. The following section introduces a statistically based method to create mathematical models for these functions.

The statistically based model is established on analyses of the existing solutions. The aim of this method is to create a usable model without knowing the exact principles and the inside relations of the function. The method statistically analyses many instances and fits generalized functions to the results. The mathematical model is based on these functions. The different variations of a function are resulted by modifying this model.

In case if there is only one dimensional parameter that describes a property the creation of the generalized function is quite obvious.

In the following example the objective is to create the generalized function of friction torque (T_{FR}) for servo motor. In this simplified case there are three different values of the friction torque for three different servo motors characterized by different inertia values. Figure 2 shows the result of fit.

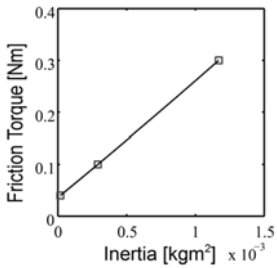


Figure 2: Generalized inertia - friction torque function

Some of the parameters of the existing components are not one dimensional. The typical two dimensional properties are displayed in characteristic diagrams. The three dimensional extension of these diagrams results the generalized function for this case. The previous servo motors have several speed-torque diagrams. The building of the generalized speed-torque function requires the following steps.

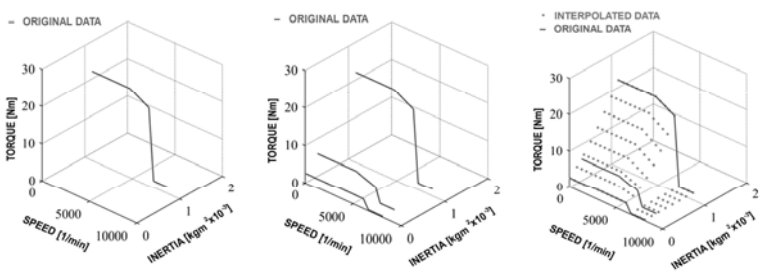


Figure 3: The building of the generalized speed-torque function

STEP 1. The diagram must be sampled for further processing (see Figure 3).

STEP 2. Other digitized diagram is placed in the three dimensional space concerning the inertias of the motors (see Figure 3).

STEP 3. Intermediate data is generated using interpolation to estimate the non-existing values (see Figure 3).

The previously described examples use polynomial fitting to produce the generalized functions.

$$y = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \cdots + p_n x + p_{n+1} \tag{4}$$

Although in these ultimately simplified cases the polynomial fitting gives satisfying results, in other cases different method is required. In case of higher number of initial data the spline interpolation has to be considered.

Some of the parameters are totally out of the range of the existing data. A typical case of this kind of theoretic functions is when there is a direct connection between a motor and a guide instead of applying intermediate gearbox and coupling. Both the gearbox and the coupling have specific limited parameters (inertia, maximum torque, etc.). But an idealistic component usually has extreme data values (zero inertia, infinite maximum torque, etc.). These kinds of parameters require special handling. These need to be separated from the other data therefore the interpolation results in inappropriate functions.

The generating of the design parameters are quite simple using the statistically based mathematical models. All of the parameters can easily be calculated with the generalized functions. In this way the whole design space can be fully covered. For the previously described servo motor a calculated torque value is displayed on Figure 4.

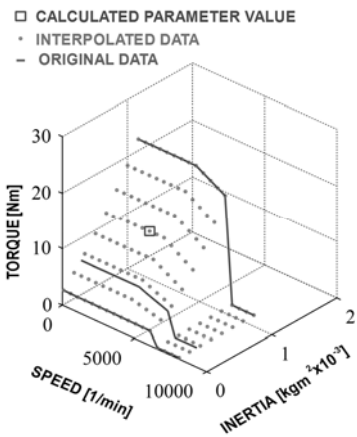


Figure 4: The generalized speed-torque function with interpolated data

4 Case study: design of linear drive system

This paper introduces a typical case study of mechanical design. In this case the task is to find the appropriate parameters for the components of a linear drive system. The arrangement of this robot motion system is shown on Figure 5.

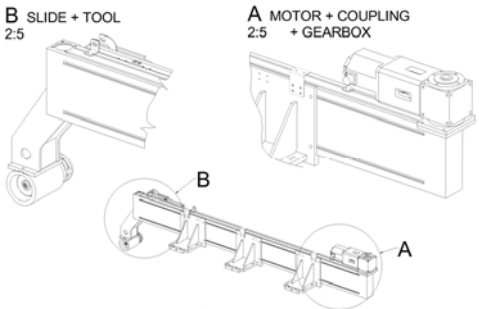


Figure 5: The arrangement of a robot axis

This example is only limited to the calculation and evaluation of the variant properties. In this case these properties are listed in Table 1.

Table 1: The variant properties in the design process

speed (n_M)	Speed of the moving load at the end of the kinematic chain.
inertia ratio (R_{IL})	Ratio between the reflected load inertia and the motor inertia.
maximum torque (T_M)	The required torque at the motor shaft in case of acceleration.
stall torque (T_S)	The required torque at the motor shaft in case of constant velocity.
utilization ratio (U_M)	Ratio between the motor maximum torque and the required acceleration torque.

The object of this project was to find the optimal parameters of the linear drive components (servo motor, coupling, gearbox, guide). The study runs on three different robot axes with different boundary conditions. The variant parameters at the servo motor are evaluated by using the following fuzzy membership functions (see Figure 6).

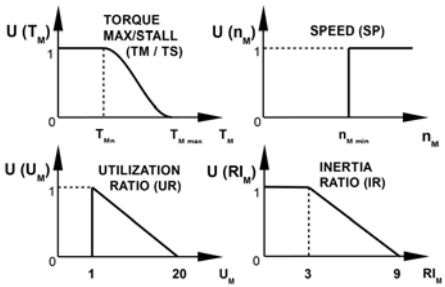


Figure 6: Fuzzy membership functions for the variant properties

The results are organized into a 6-dimensional matrix. By fixing 3 coordinates there is a good opportunity to visualize a 3-dimensional subset from this matrix. Figure 7 shows the selected portion of the matrix with the different fuzzy values in cases of X and Y axes of robot.

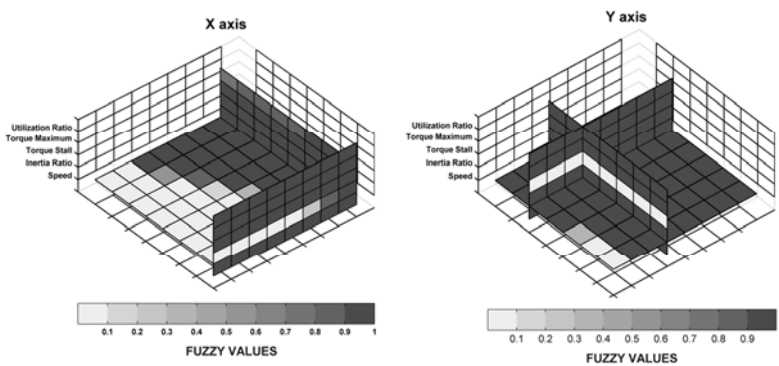


Figure 7: Fuzzy values in the solution space at the X and Y axis of the robot

5 Summary

This paper clearly shows that fuzzy evaluation is definitely an effective method to calculate the optimal parameters of the design. The introduction of the generalized function/component models brings some new opportunities in handling the unknown parameter values. This mathematical method is founded on real data of realized functions.

Therefore the calculated intermediate values are realistic. In this way the parameters of the optimized function are close to the realizable ones.

References

[1] Deciu, E. R. , Ostrosi, E. , Ferney, M. and Gheorghe, M. “Configurable product design using multiple fuzzy models”, Journal of Engineering Design, Vol. 16 No: 2 (2005)

[2] Jozsef Dombi, Zsolt Gera, “Rule based fuzzy classification using squashing functions”, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, Vol. 19 , No: 1 (2008)

[3] Sandor Vajna, Konstantin Kittel, Tibor Bercsey “Designing the solution space for the autogenetic design theory (ADT)”, International Design Conference - Design 2010 Dubrovnik

[4] M. Barajas, B. Agard “A ranking procedure for fuzzy decision-making in product design”, International Journal of Production Research, IDMME - Virtual Concept 2008, Beijing

Anforderungen an eine wissensbasierte Softwareumgebung im Konstruktionsprozess

Robert Furian[1], Maksim Maksimovic[2], Karl-Heinrich Grote[3]

[1]Volkswagen AG
Brieffach 011/13190
38440 Wolfsburg
Email: Robert.Furian@volkswagen.de; Internet: http://www.volkswagenag.com

[2]Cranfield University
Manufacturing Department, School of Applied Sciences
MK43 0AL, United Kingdom
Email: M.Maksimovic@cranfield.ac.uk; Internet: http://www.cranfield.ac.uk/sas/

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

Inhalt: *Im Rahmen des europäischen Projektes LeanPPD wird untersucht, wie sich die Ansätze des Lean Thinking in der Produktentwicklung anwenden lassen. Neben verschiedenen Methoden und Instrumenten zur Erfassung und Auswertung von Entwicklungsprozessen wird der Lebenszyklus von Wissen in einem Unternehmen aufgezeigt und Anforderungen für eine wissensbasierte Softwareumgebung spezifiziert, welche die Entwickler bei ihren Tätigkeiten mit allen relevanten Informationen versorgt. Bei der Implementierung im Business Case soll dies in Form eines Bauteillebenslaufes geschehen, welcher sämtliche Änderungen am Bauteil dokumentiert.*

Abstract: *In the context of the European LeanPPD project it is evaluated, how lean principles can be implemented in product development. Beside different methodologies and tools for capturing and analysing of development processes, the knowledge life cycle within a company is explained and the requirements for a knowledge based environment are specified for supporting the developer by providing the needed information for his activities. In the business case this shall be realized by a component life documentation, which shows all changes that have been done on this part.*

Stichwörter: *LeanPPD, Schlanke Entwicklung, Wissensdatenbank, Knowledge Based Environment, Produktentstehungsprozess, Bauteillebenslauf*

Keywords: *LeanPPD, Lean Development, Knowledge Based Environment, Product Emerge Process*

1 Einleitung

In Zeiten immer kürzerer Produktzyklen und des stärker werdenden weltweiten Wettbewerbs sieht sich die Automobilindustrie gezwungen, ihre Modelle gezielt auf die Marktbedürfnisse anzupassen und schnell und kosteneffizient auf dem Markt einzuführen. Die Entwicklungskosten wachsen jedoch ständig auf Grund von steigender Variantenvielfalt, beschleunigtem Technologiefortschritt und zunehmender Komplexität der Automobile. [1]

Lean Development transformiert das erfolgreiche Konzept des Lean Thinking in die Produktentwicklung und den gesamten Produktentstehungsprozess (PEP). Doch während in der Produktion immer die gleichen Produkte in genau definierten Prozessketten hergestellt werden, widmet sich die Produktentwicklung oft einmaligen und neuartigen Projektinhalten mit innovativem Charakter. Daher gestaltet sich in dieser Phase die Identifikation und die Reduzierung von Verschwendung im Lean Development deutlich schwieriger. [2]

In Begleitung mit verschiedenen Partnern des EU-Projektes „Lean Product and Process Development (LeanPPD)“ wird bei der Volkswagen AG untersucht, inwieweit die erarbeiteten Ansätze des Lean Development in die Praxis umsetzbar sind. Dazu werden neue Ideen und Vorgehensweisen erarbeitet, um schlanke Produkte und Prozesse während der Entwicklungsphase eines Automobils zu generieren.

2 Das LeanPPD-Projekt

Das Lean Product and Process Development Konsortium wurde im März 2009 für eine Laufzeit von vier Jahren gegründet und setzt sich aus 7 Forschungsinstitutionen und 5 Industriepartnern (u.a. Rolls-Royce, Indesit, Volkswagen) zusammen. Ziel des Projektes ist es, Leitfäden, Vorgehensweisen und Werkzeuge zu entwickeln, mit denen Entwicklungsprozesse schlanker und effizienter gestaltet werden können.

Bild 1: Bausteine des LeanPPD Modells

Die aus dem LeanPPD Modell resultierenden Methoden und Instrumente können wie folgt in vier Module zusammengefasst werden: [3]

Self-Assessment and Transformation Tool

Mit diesem Instrument zur Selbstbewertung kann der aktuelle Stand abgefragt werden, inwieweit ein Unternehmen oder auch nur ein Teilbereich davon bereits „Lean"-Methoden im Produktentstehungsprozess anwendet. Anhand dessen erfolgt eine Einstufung in fünf Level, welche den Lean-Fortschritt symbolisieren sollen.

Product Development Value Mapping Tool

Durch diese Software zur Wertstromanalyse ist es möglich, Prozesse auf unterschiedlichste Weisen abzubilden. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Visualisierung, Kategorisierung und Analyse von Wertsteigerungspotenzialen und Verschwendungen bei verschiedenen Prozessschritten. Als Ergebnis erhält man einen durchstrukturierten und optimierten Prozess.

Set Based Lean Design Tool

In Verbindung mit Set Based Concurrent Engineering soll beim Lean Design dem Entwickler eine Reihe von verschiedenen Produktvarianten zur Verfügung gestellt werden. Durch Ausschlusskriterien wie z.B. Herstellbarkeit und Wirtschaftlichkeit reduziert sich dieses Set mit fortschreitendem Entstehungsprozess auf einige wenige Möglichkeiten.

Knowledge Based Environment (KBE)

Im Rahmen des LeanPPD-Projektes soll eine Vorgehensweise und Methoden entwickelt werden, um Wissen, welches im Entwicklungsprozess entsteht, zu speichern, zu kategorisieren und zu einem späteren Zeitpunkt wiederzugeben.

3 Lean Knowledge Life Cycle

Der Lean Knowledge Life Cycle (LeanKLC) (Bild 2) wurde im Rahmen des LeanPPD-Projektes als ein Teil eines Arbeitspaketes definiert und dient dazu, den Kreislauf von Wissen in einem Unternehmen zu strukturieren und zu veranschaulichen.

Bild 2: Stadien im Lean Knowledge Life Cycle [4]

Der LeanKLC-Ablauf kann in 7 Phasen beschrieben werden: In Phase 1 ist das Ziel, das für den PEP relevante Wissen zu finden und zu identifizieren. Eine Möglichkeit dafür wäre das in Abschnitt 2 beschriebene Value Mapping Tool. In der zweiten Phase wird dieses Wissen erfasst und in eine Struktur gebracht. Dabei ist zwischen Wissen aus vorangegangenen Projekten und spezifischem Wissen, beispielsweise Konstruktionsregeln, Rechenformeln und Einschränkungen, zu unterscheiden. In Phase 3 wird das Wissen in einer allgemeinen Form (z.B. UML, OWL) dargestellt, um IT-technisch weiterverarbeitet werden zu können. Danach folgt die Speicherung dieses Wissens in Phase 4 zusammen mit neu gewonnenem Wissen in übersichtlicher Struktur in einer

Datenbank, bevor es in Phase 5 in die Knowledge Based Environment eingespeist wird und danach in Phase 6 bereitgestellt und verwendet werden kann. In der siebten und letzten Phase wird das dynamische Wissen aus den laufenden Tätigkeiten in den Wissenskreislauf eingepflegt, so dass es wieder ab der Phase 3 weitergeht.
Zusätzlich zur Beschreibung des Lebenszyklus werden noch verschiedene Methoden und Vorgehensweisen aufgezeigt, welche zur Wissensidentifizierung, -erfassung, und -bereitstellung genutzt werden können. [4]

4 Knowledge Based Environment

4.1 Grundlagen

Viele Informationen und Daten des Entwicklungsprozesses befinden sich nur in mäßig strukturierten Datenbanken, Daten-Management-Systemen, in nicht-digitaler Form oder schlicht als implizites Wissen in den Köpfen der Mitarbeiter. Die wissensbasierte Umgebung soll dazu dienen, um alle relevanten Informationen, welche von den Mitarbeitern im PEP erzeugt werden, methodisch abzuspeichern, zu filtern und dem Entwickler zum richtigen Zeitpunkt zur Problemlösung und Unterstützung in Form von strukturiertem Wissen und Anwendungen wieder zur Verfügung zu stellen. Dadurch ist es möglich, Mehrarbeit zu vermeiden, Entwicklungszeiten zu verkürzen und die Produktqualität zu erhöhen. Dies soll je nach Aufgabe im PEP in separaten Arbeitsschritten geschehen und an die individuellen Bedürfnisse des Benutzers angepasst werden, was durch eine anwenderfreundliche Echtzeit-Softwareumgebung ermöglicht werden soll.

4.2 Anforderungen

Im Folgenden werden die 5 wichtigsten funktionalen Anforderungen genannt und kurz erläutert, welche für die Entwicklung einer KBE von grundlegender Bedeutung sind: [5]

1. Alle relevanten Informationen und Dokumente aus den vorangegangenen Projekten sollen gesammelt und systematisch gespeichert werden, damit der Entwickler diese jederzeit abrufen kann.
2. Es soll eine Suchfunktion enthalten sein, mit deren Hilfe man die benötigten Projektdaten schnell wiederfinden kann.

3. Die KBE soll eine Funktion besitzen, die es möglich macht, Wissen (z.B. Zeit, Kosten) aufzubereiten und zu visualisieren, welches zur Entscheidungsunterstützung beitragen kann.
4. Das dynamische Wissen, welches der Entwickler im PEP generiert, soll systematisch erfasst und abgespeichert werden.
5. Alle Erfahrungswerte (Lessons Learned) der einzelnen Prozessschritte im PEP sollen aufgezeigt werden können.

Konkret soll durch diese Anforderungen eine wissensbasierte Konstruktionsumgebung formuliert werden, welche die Effizienz steigern soll. So werden in einem Lebenslauf sämtliche Änderungen am Bauteil, abgelehnte genauso wie in Bearbeitung befindliche und genehmigte, dokumentiert. Dabei kann die Software auf eine dynamische, standardisierte Datenbank zugreifen, die dem Nutzer hinreichende Informationen über die technischen Gegebenheiten und bereits bewährte Problemlösungen aus vorangegangenen Projekten zur Verfügung stellt. Ebenso soll die Möglichkeit vorhanden sein, neue Informationen direkt in die Datenbank zu implementieren, um hinzugewonnenes Wissen zu integrieren und bestehendes Wissen zu aktualisieren.

4.3 Implementierung bei der Volkswagen AG

Zusammen mit dem Geschäftsfeld Kunststoff soll in einem Pilotprojekt ein Softwareprototyp einer KBE in Form eines Bauteillebenslaufs an dem Produktentstehungsprozess einer Türverkleidung praktisch erprobt werden. Dazu wird der aktuelle Entwicklungs- und Konstruktionsprozess mit seinen unterschiedlichen Facetten und Arbeitspaketen analysiert und dargestellt. Wertschöpfende Prozesse und Tätigkeiten werden identifiziert und herausgehoben, während wertmindernde Prozesse und Verschwendungen diskutiert und beseitigt werden sollen. Anschließend müssen diese potenziellen Arbeitsschritte so definiert werden, dass sie sich zur Integration in die KBE eignen.

Bild 3: Startfenster mit Auswahlmöglichkeiten im Bauteillebenslauf

In der webbasierten Oberfläche des Bauteillebenslaufs hat der Entwickler die Möglichkeit, ab einem definierten Zeitpunkt sämtliche Änderungen und deren Status nachzuverfolgen. Änderungen können dokumentiert und beantragt werden und nach Bewertung durch andere Abteilungen (z.B. in Bezug auf Herstellbarkeit, Fertigungszeit und Änderungskosten) verworfen oder genehmigt und umgesetzt werden.

5 Fazit und Ausblick

Nach etwas mehr als der Hälfte der Laufzeit des EU-Projektes wurden eine Vielzahl theoretischer Ansätze und Vorgehensweisen entwickelt, um den Produktentstehungsprozess schlanker und wertschöpfungsorientierter gestalten zu können. Durch andauernde Untersuchungen und Umfragen bei den Industriepartnern werden diese nun vertieft, weiterentwickelt und teilweise bereits in Form von Business Cases bei den Industriepartnern praktisch umgesetzt und ergänzt. Eine Demo der KBE und der Bauteillebenslauf im Speziellen befinden sich im Moment in der (Software-) Entwicklungsphase und soll nach einer Testphase verbessert und evaluiert werden.

Danksagung

Das LeanPPD-Projekt wird durchgeführt im Rahmen des Förderprogramms der Europäischen Kommission „European Framework Programm 7 – Nanosciences, nanotechnologies, materials and new production technologies“ (Fördernummer NMP-

2008-214090, www.leanppd.eu). Die Autoren danken der EU sowie allen anderen Partnern des Konsortiums für ihre Unterstützung.

Literatur

[1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre* – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; *Methoden und Anwendung*, 7. Auflage, Berlin, Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-34060-7.

[2] Schuh, G. et al: Lean Innovation – Ein Widerspruch in sich?, in: Hacklin, F.; Marxt, C.: Business Excellence in technologieorientierten Unternehmen, S. 13-20, Berlin, Springer, 2008. - ISBN 978-3-540-73880-0.

[3] Sorli, M.; Sopelana, A.; Taisch, M.; Al-Ashaab, A.; Keast, J.; Flores, M.; Stokic, D.; Martinez, L.: Applying Lean thinking concepts to New Product Development; Conference paper, APMS Conference, September 2010.

[4] Maksimovic, M.; Al-Ashaab, A.; Shehab, E.; Sułowski, R.: A Lean Knowledge Life Cycle Methodology in Product Development; Conference paper, 8th International Conference on Intellectual Capital, Knowledge Management & Organisational Learning (ICICKM), Bangkok, Thailand, 2011 (eingereicht).

[5] Al-Ashaab, A.; Flores, M; Khan, M.; Maksimovic, M.; Alam, R.; Shehab, E.; Doultsinou, A.; Sopelana, A.: The Industrial KBE Requirements of the LeanPPD Model; Conference paper, APMS Conference, September 2010.

Methoden des zentralen Stammdatenmanagements für die integrierte Produktentwicklung

Prof. Dr.-Ing. Erhard Leidich, Dr. Werner Grahl, Dipl.-Wirt.-Ing. Michael Konarsky, Dipl.-Ing. Dirk Hofmann

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl Konstruktionslehre
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz
Email: info@ipe-lab.de; Internet: www.ipe-lab.de

Inhalt: *Redundante, inkonsistente und unvollständige Stammdaten sind Ursachen für Verluste in der Effizienz der Geschäftsprozesse und in der Qualität der hergestellten Güter und Dienstleistungen. Im Labor für integrierte Produktentwicklung werden daher Methoden für ein zentrales Stammdatenmanagement erarbeitet. Die entwickelten Methoden betreffen die Normung von Kauf- und Fertigungsteilen sowie die nachhaltige Gestaltung der Informationsflüsse und Stammdatenprozesse im Unternehmen. Die Validierung der Methoden erfolgt an einem durchgehenden Demonstratorbeispiel „Getriebe“.*

Abstract: *Redundant, inconsistent and incomplete master data are causes of inefficient business processes and defects in quality of manufactured goods and services. Therefore in the laboratory for integrated product development methods for a central master data management will be developed. The developed methods involve the standardization of purchase and manufacturing parts as well as the design of information flows and master data processes. The validation of the method is carried on a continuous example "gear".*

Stichwörter: *Stammdatenmanagement, Normung, Stammdatenprozesse, Informationsfluss, Produktentwicklung*

Keywords: *master data management, standardization, master data processes, information flow, product development*

1 Einleitung

Stammdaten sind gegenstandsorientierte Daten, welche die Eigenschaften der wesentlichen Objekte und Kernentitäten eines Unternehmens aus verschiedenen Perspektiven (bspw.: technisch, wirtschaftlich etc.) beschreiben [1]. Sie werden in den verschiedenen Funktionsbereichen innerhalb der integrierten Produktentwicklung erfasst und verwaltet sowie in unterschiedlichen IT-Systemen genutzt, jedoch durch operative Prozesse nicht oder nur selten verändert [2, 3]. Darüber hinaus bilden sie die Basis für die produktbezogene Kommunikation und Transaktion in allen Geschäftsprozessen [2, 4, 5,

6]. Somit wirkt sich die Qualität der Stammdaten, die durch ihre Vollständigkeit, Konsistenz und Redundanz charakterisiert werden kann, direkt auf die Effizienz der gesamten Geschäftsprozesse in der Produktentstehung aus [6, 7].

Der Stand der Umsetzung des Stammdatenmanagements in den Unternehmen belegt, unabhängig von der Unternehmensgröße, insgesamt noch einen erheblichen Handlungsbedarf. Insbesondere KMU sind aufgrund ihrer einfach strukturierten Organisation von dieser Situation betroffen [7].

Im vorliegenden Beitrag werden ausgewählte Methoden eines zentralen Stammdatenmanagements vorgestellt und am Beispiel der Qualitätsverbesserung der Produktdaten von Getrieben veranschaulicht. Diese sind im Rahmen eines durch Mittel der Europäischen Union des Freistaates Sachsen finanzierten Vorhabens „Labor für integrierte Produktentwicklung“ (IPE-Lab) entstanden. Kernstück der Methoden ist die komplexe Betrachtung der Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen

- Stammdaten bzw. Teilestamm,
- technische, wirtschaftliche, organisationale sowie Normungs-Regeln,
- IT-Systemen wie ERP-, PDM-, CAD/CAE - und Kosteninformationssystemen und
- Stammdatenprozessen (Anlegen, Suchen, Ändern, Sperren)

bei Beachtung der Entwicklungsdynamik der Stammdaten bzw. des Teilestammes (Bild 1). Es wird damit das Ziel des Aufbaus eines modularen Bausteinsystems mit Methoden für Typenlösungen zur nachhaltigen Vielfalts- und Komplexitätsreduktion unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für KMU verfolgt.

2 Stammdaten- und Prozessmanagement

Das Stammdaten- und Prozessmanagement ist eine über die IT hinausgehende gesamtbetriebliche Aufgabenstellung, die innerbetrieblich durch die Komplexe *Normung*, *Informationsflussgestaltung* und durch die *Stammdatenprozessgestaltung* charakterisiert werden kann (Bild 1). Diese Komplexe bilden jeweils die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Stammdaten, Regeln (internen bzw. externen Randbedingungen und Bewertungen), den IT-Systemen sowie den Stammdatenprozessen in einem Dreieck ab. Im Folgenden werden die dargestellten Komplexe näher beleuchtet und mit Methoden aus dem modularen Bausteinsystem des IPE-Lab untersetzt.

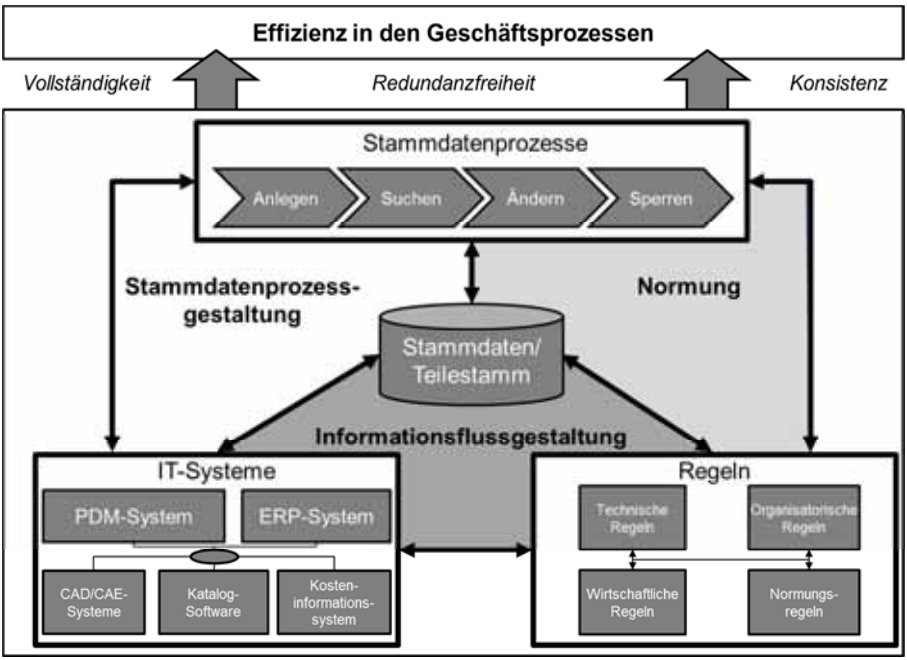


Bild 1: Beziehungen und Abhängigkeiten im zentralen Stammdatenmanagement

Durch *Normung* werden die Regeln zur verlässlichen Abbildung von Stammdaten und zur Reduzierung unnötiger Vielfalt im Bestand definiert. Somit wirken Normungen vereinheitlichend auf die Produktstruktur und reduzierend auf das Teilestammwachstum [4]. Der Normung, d.h. zum Beispiel Entwicklung von Klassifikatoren, Sachmerkmalleisten-Konzepten sowie innerbetrieblichen Terminologien, geht in der Regel eine Analyse, Vorbereinigung und Ordnung der vorhandenen technischen und betriebswirtschaftlichen Stammdaten voraus. Dazu wurden Lösungsbausteine zur Analyse (Potenzialcheck, Struktur- und Dublettenanalyse, u.a.) und Bereinigung (Dublettenbereinigung, Substitution, Artikelpriorisierung, etc.) der Stammdaten entwickelt. Hierbei sind unternehmensspezifische wie auch allgemeingültige Regeln zu beachten, um eine konsistente Überführung der Stammdaten in die neue Merkmalsstruktur und eine nachhaltige Nutzung in den Stammdatenprozessen (z.B. Anlegen und Suchen) sicherzustellen.

Diese Regularien können definiert sein durch:

- Technische Regeln (z.B. funktions- und kundenbedingte Randbedingungen)
- Organisatorische Regeln (z.B. Nutzerrechte im Unternehmen)
- Wirtschaftliche Regeln (z.B. Bewertung von Substitutionsalternativen)
- Normungsregeln (z.B. innerbetriebliche Normen / Richtlinien)

Eine Erweiterung zum Stand der Technik stellt die monetäre Bewertung von Normungsaktivitäten im Sinne von Kosten-Nutzen-Analysen dar. Mit diesen können Einsparpotenziale früh prognostiziert und die Ressourcen im Normungsprozess wirtschaftlich eingesetzt werden.

Die *Informationsflussgestaltung* wird beeinflusst durch das Zusammenwirken und der Interaktion der vorherrschenden IT-Systeme. Die Randbedingungen werden durch die technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Regeln bestimmt und drücken sich z.B. in Nutzerrechten, Filterkriterien und Schnittstellendefinitionen in den IT-Systemen aus. Die Wirkung dieser Merkmale wird durch die systembedingten Abbildungs- und Interaktionsmöglichkeiten der jeweiligen Softwarelandschaften geprägt. Mit Hilfe einer zentralen Datenhaltung und einer Durchgängigkeit des Informationsflusses zwischen den Systemen kann sichergestellt werden, dass die Daten redundanzfrei und konsistent sind und bleiben. Im Ergebnis sind alle Daten auf einem aktuellen Stand und abteilungsübergreifend in den jeweiligen Anwendungssystemen unter vereinheitlichten Sichten verfügbar, wodurch die Effizienz bei der Informationsweitergabe und -verarbeitung gesteigert wird.

Die *Stammdatenprozessgestaltung* steht für die prozessuale Gestaltung und Umsetzung der Stammdaten in der Ablauforganisation eines Unternehmens. Sie steuert mit Hilfe der zur Verfügung stehenden IT-Systeme die Abbildung und Einhaltung der Stammdatenprozesse. Durch festgelegte begriffliche Terminologien, welche in Form von definierten Masken, klaren Aufgabenzuordnungen und Schnittstellendefinitionen verankert sind (Informationsflussgestaltung), sichert es den Nutzern die physische Umsetzung der Regeln in den Stammdaten beim Anwenden der Stammdatenprozesse innerhalb von IT-Systemen. Dazu sind Instrumente wie das Workflowmanagement und die Gestaltung von Such- und Eingabemasken entsprechend der Normungsregeln, geeignete Werkzeuge. Erst die Unterstützung von festen Regeln für die Stammdatenprozesse wie das Anlegen, Suchen, Ändern oder Sperren von Datensätzen, garantiert eine vollständige, konsistente und redundanzfreie Datenhaltung. Beispiele für feste Regeln in den Partialprozessen des Stammdatenmanagements sind:

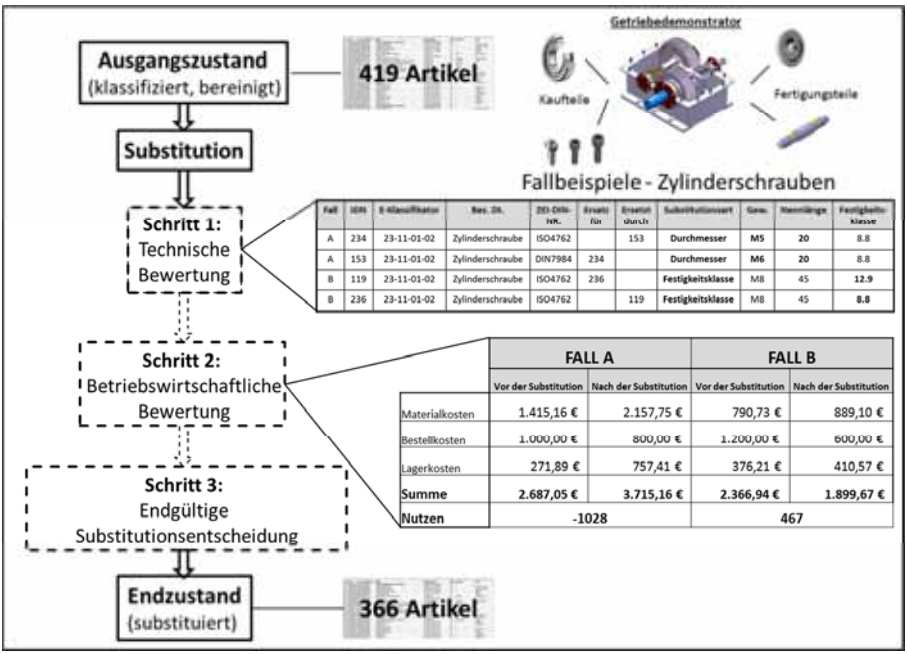
- **Anlegen:** Die Anlage eines neuen Stammdatensatzes erfolgt gemäß Vorgaben durch den entsprechenden Prozessverantwortlichen.
- **Suchen**: Die Suche nach Stammdaten erfolgt durch definierte Suchbegriffe, die der Terminologie der Unternehmen bzw. der Branche entsprechen, in den IT-Systemen hinterlegt sind und bei Bedarf abgebildet werden.
- **Ändern**: Durch Produkt- und Informationsänderungen ergeben sich Änderungen, die in den Datenstammsatz übernommen werden müssen.
- **Sperren**: Auf Dubletten, alte Versionsstände und ungültige Teile soll nur administrativer Zugriff möglich sein.

Für den Transfer in KMU sind die beschriebenen Methoden im Spannungsfeld der Normung, der Informationsflussgestaltung und der Stammdatenprozessgestaltung nachfolgend am Beispiel der Substitution von Zylinderschrauben als Bestandteil des Getriebedemonstrators ausgeführt.

3 Substitution im Stammdatenmanagement

Bei der Substitution im Bereich der *Normung* (vgl. Bild 1) werden ein oder mehrere Artikel teilweise oder vollständig aufgrund von Maßnahmen des Stammdatenmanagements durch andere ersetzt. Das Ziel ist die Reduktion des Teilestammes sowie die Verbesserung seiner Transparenz und dessen prozesssichere Anwendung.

Im vorliegenden Fallbeispiel sollen exemplarisch die methodischen Vorgehensweisen für eine Substitution an Zylinderschrauben verdeutlicht werden. Ausgehend von einem Teilestamm für Getriebe, der bereits analysiert, klassifiziert und von Dubletten bereinigt wurde (Ausgangszustand), wird eine Substitution durchgeführt (Bild 2). Dazu werden in einem ersten Schritt technische Substitutionsvorschläge erarbeitet, die in einem zweiten Schritt betriebswirtschaftlich bewertet werden. Auf Basis dieser technischen und betriebswirtschaftlichen Bewertung erfolgen die endgültige Substitutionsentscheidung (Schritt 3) und das Bereinigen des Teilestammes zu einem Endzustand.



Fall	DIN	E-Klassifikator	Bez. DN.	ZEI-DIN-NR.	Ersatz für	Ersatzt durch	Substitutionsart	Gew.	Nennlänge	Festigkeits-klasse
A	234	23-11-01-02	Zylinderschraube	ISO4762		153	**Durchmesser**	**M5**	**20**	8.8
A	153	23-11-01-02	Zylinderschraube	DIN7984	234		**Durchmesser**	**M6**	**20**	8.8
B	119	23-11-01-02	Zylinderschraube	ISO4762	236		**Festigkeitsklasse**	M8	45	**12.9**
B	236	23-11-01-02	Zylinderschraube	ISO4762		119	**Festigkeitsklasse**	M8	45	**8.8**

Bild 2: Technischer und betriebswirtschaftlicher Entscheidungsprozess bei der Substitution

Die betrachteten Zylinderschrauben sind typische C-Teile. Die technische Bewertung erfolgt mit Ansätzen zur Substitution, wie der Ersetzung der Normen (DIN-ISO), Festigkeitsklassen, Abmessungen oder Oberflächenbehandlungen und wird jeweils einem Fall zugeordnet, der nachfolgend betriebswirtschaftlich bewertet wird. Das Fallbeispiel A zeigt zwei Schrauben mit unterschiedlichen Gewindedurchmessern (M5, M6) und gleichen Nennlängen von 20mm. Unter Beachtung der späteren Anwendung und somit der Beibehaltung Ihrer Funktionalität soll M5 grundsätzlich durch M6 ersetzt werden. Für die betriebswirtschaftliche Bewertung der C-Teile, die in der Regel einen Beschaffungskostenanteil von 85% aufweisen, erfolgt die Bewertung des Substitutionsvorschlags auf Grundlage der Beschaffungskosten, die sich aus den Bestell-, Lager- und Materialkosten zusammensetzen. Vergleichsgrundlage für die Bewertung ist die Bestellstrategien, die mit dem exakten Verfahren von Wagner-Within berechnet worden sind.

Im Fall A würden durch die Substitution die Bestellkosten um 200,- € reduziert, weil zukünftig nur eine Teileart bezogen werden muss. Allerdings erhöhen sich die Materialkosten um 742,- € und die Lagerkosten um 485,- €. Demnach entstehen durch die Substitution einer M5- durch eine M6- Schraube Mehrkosten in Höhe von rund 1028,- € für das Unternehmen. Daher wird aus betriebswirtschaftlicher Sicht (Beschaffung) keine Substitutionsempfehlung gegeben.

Im Fall B soll die Schraube mit der Identnummer (IDN) 236 und der Festigkeitsklasse 8.8 durch die Zylinderschraube mit der IDN 119 und der Festigkeitsklasse 12.9 ersetzt werden. Durch diese Maßnahmen werden einerseits die Materialkosten um 98,- € und die Lagerkosten um 34,- € erhöht, andererseits die Bestellkosten aber um 600,- € reduziert. Daraus resultiert eine Einsparung von ca. 467,- € und damit eine Empfehlung zur Substitution (vgl. Bild 3). Die Kostenreduktion für den gesamten Teilestamm kumuliert sich über alle positiven Substitutionsentscheidungen.

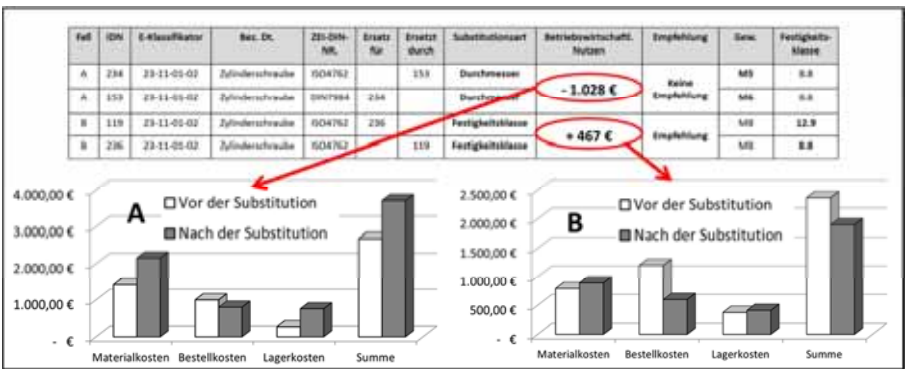


Bild 3: Beispiel Substitution von Zylinderschrauben

In Bezug auf die *Informationsflussgestaltung* (vgl. Bild 1) werden die festgelegten Normungsregeln in Form von Vorzugs- und Auswahlreihen den im Produktentwicklungsprozess involvierten Bereichen zur Verfügung gestellt. Durch vorgegebene Rollen und restriktive Freigabeprozesse werden diese Festlegungen nach den Maßgaben des Qualitätsmanagements gesichert. Im Sinne der *Stammdatenprozessgestaltung* sind die in der Normung geschaffenen unternehmensspezifischen Terminologien in Form von Eingabemasken in IT-Systemen (PDM-, ERP-System) hinterlegt. Außerdem sind gemäß der Terminologien Auswahl- oder

Suchfilter in den IT-Systemen implementiert. Mit Hilfe von Workflows werden die genannten Stammdatenprozesse entsprechend der organisatorischen Regeln (Freigabe) standardisiert.

4 Zusammenfassung

Bei Betrachtung der Abhängigkeiten und Beziehungen im zentralen Stammdatenmanagement wird deutlich, dass Partiallösungen in den Komplexen *Normung*, *Informationsflussgestaltung* und *Stammdatenprozessgestaltung* nicht zielführend sind. Daher ist eine ganzheitliche Betrachtung des Stammdatenmanagement unter Berücksichtigung von Kosten-Nutzen-Bewertungen und einem modularen Bausteinsystem zweckmäßig. Basierend auf den Methoden des IPE-Lab konnte am Beispiel der Zylinderschrauben eine Reduzierung des Teilestammumfangs und der Beschaffungskosten durch Substitution demonstriert werden. Auf dieser Grundlage und weiterführend mit der Abbildung von Normungsregeln in den IT-Systemen kann eine Standardisierung der Stammdatenprozesse durch Workflows im Hinblick auf die Konsistenz, Redundanzfreiheit und Vollständigkeit und damit eine nachhaltige Steigerung der Effizienz in den Geschäftsprozessen erreicht werden.

Literatur

[1] Schemm, J. W.: Zwischenbetriebliches Stammdatenmanagement, Lösungen für die Datenintegration zwischen Handel und Konsumgüterindustrie, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

[2] Naß, E.: Daten harmonisieren - Reibungen eliminieren, Konsistentes Stammdatenmanagement in Unternehmen, Unternehmen der Zukunft 3/2010, S. 68-70

[3] Otto, B.; Hüner, K. M.: Funktionsarchitektur für unternehmensweites Stammdatenmanagement, Bericht: BE HSG/CC CDQ/14, Universität St. Gallen, Institut für Wirtschaftsinformatik, 31.05.2009

[4] Leidich, E.; Grahl, W.: Toolbox Vielfaltsreduktion - Methoden, Konzepte, Musterlösungen und Softwaretools zur Reduzierung der Internen Vielfalt, 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Magdeburg, 2010, S. 7-10

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

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

[7] Is report: Datenqualität entscheidet über Erfolg, Jg. 13, 10/2009, S. 34-36

Adaptive FEM mit VR-basierter Interaktion und Visualisierung in der Produktentwicklung

Volker Wittstock, Janine Glänzel, Marco Schumann

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse
Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz
Email: janine.glaenzel@mb.tu-chemnitz.de; Internet: http://www.tu-chemnitz.de/mb/iwp/

Inhalt: *Der Einsatz von FEM-Simulationen sowie die Visualisierung mittels VR-Technologie sind feste Bestandteile in der virtuellen Produktentwicklung. Der vorliegende Artikel befasst sich mit der Kombination beider Bereiche. An einem Fallbeispiel werden Einsatz und Nutzen der adaptiven FEM erläutert, sowie Voraussetzungen und Lösungsvorschläge für die Verbindung beider Technologien präsentiert.*

Abstract: *The use of FEM simulations and the visualization through VR technology are basic parts of the virtual product developement. This paper describes the combination of both areas. Usage and benefit will be explained on a use case. Requirements and solutions for the connection of both technologies will be subsequently presented.*

Stichwörter: *Adaptive Finite-Elemente-Methode (AFEM), Virtual Reality (VR), Interaktionsgeräte*

Keywords: *adaptive finite element method (AFEM), Virtual Reality (VR), interaction devices*

1 Zielstellung und Lösungsansatz

Die VR-Technologie wird oft als Weiterentwicklung von CAD-Technologien gesehen. In der Tat verbessert die immersive Darstellung von Produkten und Prozessen die Vorstellung. Personen, die nicht direkt in den Entwicklungsprozess involviert und u. U. auch fachfremd sind, können in immer früheren Phasen der Produktentstehung bei Entscheidungen oder Stellungnahmen zu Neuentwicklungen unterstützt werden [1]. Die eigentlichen Produktentwickler stehen der VR-Darstellung eher skeptisch gegenüber, da diese bisher überwiegend den Zweck hat zu animieren. Dazu gehört beispielsweise auch die Animation von Bauteilverformungen, die auf rein geometrischen Beziehungen ohne physikalischen Hintergrund beruhen (mit dem Einsatz von DCC (Digital-Content-Creation)-Software können nur einachsige Verschiebungen exakt wiedergegeben werden, z. B. ausfahrende Zylinder). Die Vorstellungswelt der Entwickler ist dagegen von der CAx-Welt mit exakten Simulationen und Kennwerten geprägt.

Mit existierenden unidirektionalen Schnittstellen lassen sich zwar Simulationsergebnisse wie Verformungen visualisieren, jedoch führen Parameteränderungen und die notwendigen Neuberechnungen zu inakzeptablen Wartezeiten der agierenden Personen. Ziel ist es, dem Nutzer Interaktionen mit Simulationsprogrammen aus der immersiven Umgebung heraus zu ermöglichen. Dabei müssen zum einen relevante Parameter, wie z. B. Randbedingungen oder Materialeigenschaften, aus der VR-Umgebung heraus beeinflussbar sein. Zum anderen darf die Zeit bis zur Darstellung des neuen Berechnungsergebnisses nicht als störend empfunden werden.
Die Lösung setzt sich aus zwei aufeinander aufbauenden Ansätzen zusammen. Für die Simulation von darzustellenden Verformungen von Bauteilen wird ein adaptives Finite-Elemente-Programm (AFEM) benutzt. Das Konzept zur Ergebnisvisualisierung der AFEM in der VR-Umgebung muss gleichzeitig die Interaktion der Benutzer mit dem AFEM-Programm gewährleisten. Nachfolgend wird als aktuelles Zwischenergebnis die VR-Visualisierung einer interaktiv vorgegebenen Bauteilverformung vorgestellt, wie sie beispielsweise bei Mechanismen mit Festkörpergelenken (FKG) notwendig ist.

2 Ergebnisdarstellung der adaptiven FEM in der VR

2.1 Modellaufbereitung

Das CAD-Modell muss aufgrund der hohen Komplexität wie bei herkömmlichen FEM-Simulationen vereinfacht werden, um eine geeignete Modellvernetzung (Startnetz, welches so grob wie möglich ist) zu erhalten. Im ersten Schritt des Workflows können alle Bereiche des Modells entfernt werden, die die Berechnung nicht beeinflussen. Dazu zählen bestimmte Geometrieelemente außerhalb des Kraftflusses, wie z. B. Halterungen und Befestigungsbohrungen, deren Funktionalitäten in späteren Arbeitsschritten durch Randbedingungen ersetzt werden können. Basierend auf den durchgeführten Modifikationen ist die Generierung eines geeigneten grobvernetzten FE-Startnetzes möglich, das im zweiten Schritt diskretisiert wird. Dazu ist der Export des CAD-Modells in ein geeignetes Format notwendig. Das gewählte STL-Format wird im dritten Schritt, z. B. mit der freien Software netgen (http://www.hpfem.jku.at/netgen/), in eine Tiefenvernetzung unterteilt. Nach der Konvertierung liegt die FE-Vernetzung in Form von Tetraedern vor, die aber ungeeignet für das AFEM-Programm ist. Deshalb wird in einem vierten Schritt das Netz mit der eigens entwickelten Software SPCedit gewandelt, indem jedes

Tetraederelement in vier Hexaederelemente segmentiert wird. Anschließend liegt das STD-Format als konvertierte Eingabedatei für das AFEM-Programm vor, die die Tiefennetzinformationen (Anzahl der Knoten, Kanten, Flächen, Volumenelemente, Randbedingungen) beinhaltet. Bei komplexen CAD-Modellen müssen nach der FE-Netzgenerierung im nächsten Schritt die Randbedingungen mit der Software netgen festgelegt werden. Der Vorteil ist die gleichzeitige Auswahl von mehreren FE-Oberflächen, die ein zusammenhängendes Oberflächenstück des CAD-Modells beschreiben. Dem markierten Oberflächenstück kann somit eine Randbedingung, z. B. Flächenlast oder Verschiebung, zugeordnet werden. Die generierte STD-Eingabedatei inklusive der Randbedingungen wird für die AFEM-Berechnung als Startdatei eingelesen. Im Gegensatz zu klassischen FEM-Paketen wie ANSYS führt dieser Workflow zu einer für AFEM sinnvollen groben Startvernetzung. Der dahinter stehende iterative Algorithmus [3], der zu deutlich kürzerer Rechenzeit führt, prüft mit dem integrierten Fehlerschätzer alle FE-Elemente und markiert die stark fehlerbehafteten, welche im nächsten Iterationsdurchlauf zur Verkleinerung des Fehlers geteilt und berechnet werden. Die Qualität der Vernetzung spielt dabei eine maßgebliche Rolle für die Genauigkeit der FEM-Ergebnisse.

2.2 Numerische Berechnung

Der AFEM-Algorithmus, beschrieben in [2] und [7], ermöglicht hochgenaue Ergebnisse linearelastischer Verformungsberechnungen in sehr kurzer Berechnungszeit. Der Zeitvorteil gegenüber anderen FEM-Programmen ist wesentliche Voraussetzung für die interaktive Anbindung an VR-Technologien. An einem einfachen Berechnungsbeispiel soll der Unterschied zwischen einem in DCC-Software modellierten Bauteil und einem mit AFEM simulierten Bauteil erläutert werden. Im Bild 1(a) ist ein unter Verwendung der DCC-Software verformtes Bauteil dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine einfache Verschiebung der oberen Zylinderkreisfläche zu einer material- und geometrieunabhängigen Verformung (reine Scherung) führt. Im Bild 1(b) ist das entsprechende numerisch berechnete Ergebnis gegenübergestellt. Deutlich sind die asymmetrisch geometrieabhängigen Verformungen zu erkennen. Die lokale Netzverfeinerung hat sich entsprechend an die stark fehlerbehafteten Bereiche adaptiert. Die aktuelle FE-Elementanzahl nach der 16. Verfeinerungsschleife beträgt 39243 Stück.

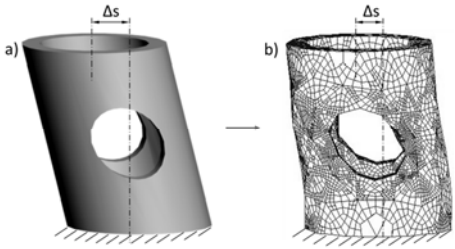


Bild 1: Gegenüberstellung einer DCC-modellierten (a) und einer berechneten (b) Verformung

3 Interaktive Steuerung der adaptiven FEM in VR

Klassische FEM-Verfahren benötigen für die Simulation eine hohe Rechenzeit (Minuten bis mehrere Stunden), was keine zeitnahe Interaktion ermöglicht. Der vorgestellte Performancevorteil der AFEM löst dieses Problem, wodurch eine interaktive Steuerung sinnvoll wird. Interaktiv bedeutet in diesem Zusammenhang nicht echtzeitfähig. Eine Wartezeit von mehreren Sekunden erlaubt jedoch eine Arbeit mit der Simulation, die bei Rechenzeiten im Minuten- oder Stundenbereich nicht gegeben ist. Eine weitere Voraussetzung für diese Kopplung besteht in einer Möglichkeit, die Simulation programmiertechnisch zu steuern (z. B. durch eine API). Zu diesem Zweck wurde ein prototypischer *FEM-File-Server* implementiert, welcher das AFEM-Programm kontrolliert, Befehle von Clients über eine Netzwerkverbindung entgegen nimmt und die Ergebnisse an den Client zurück überführt [2], [4], [5]. Dem Bediener der VR-Umgebung, welcher als Client agiert, wird es so ermöglicht, ein Startgrobnetz zu laden, Startparameter zu setzen, die AFEM-Berechnung anzustoßen und aus den Ergebnisdaten Geometrie mit Farbinformationen zu erzeugen, welche ihm präsentiert werden. Der prinzipielle Aufbau ist im Bild 2 dargestellt.

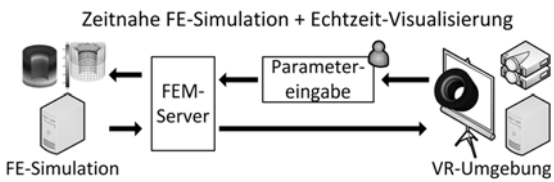


Bild 2: Struktur der AFEM-VR-Schnittstelle

Der erste Schritt dazu besteht in der Visualisierung dieser Ausgangsdaten. Ein Import des Grobnetzes sowie der dazugehörigen Parameter muss demnach in der VR-Software implementiert werden. Von Interesse sind nur Parameter auf der Oberfläche des Körpers, weswegen es sich aus Performancegründen empfiehlt, aus der Tiefenvernetzung des Grobnetzes nur die Oberflächengeometrie zu extrahieren. Bei einer Tetraeder-Tiefenvernetzung kann dabei ausgenutzt werden, dass Flächen, welche sich im inneren des Körpers befinden, immer von genau zwei Quadern referenziert werden. Randflächen dagegen besitzen nur die Zugehörigkeit zu einem Quader.

Um nun Parameter interaktiv ändern zu können, benötigt der Nutzer zunächst einen Auswahl-Mechanismus, um die gewünschten Flächen mit den Parametern selektieren zu können. Im Regelfall wünscht ein Nutzer, mehrere Flächendaten zu verändern. Das Auswählen und Verändern jeder Fläche im Einzelnen erfordert einen hohen Zeitaufwand und stößt auf schlechte Akzeptanz bei Anwendern, weshalb eine Mehrfachauswahl im VR-System implementiert sein sollte. Bei automatisch generierten Netzen (siehe 2.2) ist dies aufgrund der entstehenden hohen Tesselierung essentiell.

Mit diesem Werkzeug ausgestattet kann ein Nutzer Flächen selektieren, um die Parameteränderung zu beginnen. Im Falle von Randflächen bedeutet dies, dass Vektoren, im speziellen Zahlen, geändert werden. Standard-VR-Eingabegeräte, wie z. B. der Flystick, eignen sich wenig für die Eingabe von numerischen Zeichen. Umsetzungen von virtuellen Tastaturen, welche sich im virtuellen Raum befinden und in welche ein Nutzer jede Ziffer einzeln auswählen muss, sind schlecht handhabbar und vor allem zeitaufwendig. Da die AFEM-VR-Kopplung eine hohe Nutzerakzeptanz erfordert, ist eine andere Lösung vorzuziehen. Vorgeschlagen wird der Einsatz eines Smartphones als zusätzliches Eingabegerät, da diese eine reale oder virtuelle Tastatur besitzt sowie klein und kostengünstig ist. Softwareseitig können eigene Programme durch die Verfügbarkeit von Software Development Kits entwickelt und auf dem Smartphone betrieben werden. Eine Anbindung des Geräts an die VR-Umgebung ist über die WLAN-Schnittstelle realisierbar. Für die notwendige Netzwerkprogrammierung existieren verschiedene Herangehensweisen, z. B. Socketprogrammierung oder Remote Method Invocation (RMI). Socketprogrammierung ist sehr direkt, gut dokumentiert und programmiersprachen-unabhängig, bedeutet jedoch auch die Entwicklung einer Schnittstelle von Grund auf. RMI als zweite Möglichkeit ist einfacher zu handhaben und ermöglich eine schnellere Entwicklung. Diese Lösung wurde prototypisch für ein Android-Smartphone untersucht.

Dabei stellte sich heraus, dass die Java-Standard-RMI-Implementierung nicht nutzbar ist, da die dem Android-Betriebssystem zugrunde liegende virtuelle Maschine *„Dalvik“* sich von der *„Sun Java“*-Implementierung unterscheidet. Durch den Einsatz einer freien RMI-Lösung kann dieses Problem gelöst werden (z. B. CoolRMI, (http://sourceforge.net/projects/coolrmi/)). Nachteil dieser Lösung ist die Festlegung auf die Programmiersprache Java, da VR-Software-Lösungen häufig C++-Schnittstellen anbieten. Die Wahl der Herangehensweise muss demnach von den eigenen Anforderungen abhängig gemacht werden.

4 Demonstration der interaktiven Kopplung AFEM-VR

Im Bild 3 ist ein piezogetriebenes kardanisches Festkörpergelenk (FKG) dargestellt, wie es für die redundante Feinpositionierung einer Werkzeugspindel Verwendung findet, um z. B. unrunde Zylinderbohrungen herzustellen [6]. Für diese Baugruppe mit fünf Bewegungsachsen bestand der Wunsch, die hochkomplexe Bewegungskinematik in der VR zu visualisieren, ohne die Funktionalität der Hochtechnologie durch einen Fehler in der äußeren Form der Präsentation zu schmälern. Während die abstrahierte Darstellung des Hubes der Piezoaktoren (einachsig) in den DCC-Programmen akzeptabel möglich ist, kann die FKG-Vorformung bisher nur mangelhaft abgebildet werden. In einem ersten Schritt wurde nur eine Verschiebungsrandbedingung für die obere Fläche analog zum Bild 1 berücksichtigt.

Bild 4 zeigt eine Auswahl von Simulationsergebnissen. Im deformierten FE-Netz sind die lokal feinsten Vernetzungen entlang der Stegübergänge zu erkennen. In diesen Bereichen treten die größten Verformungen und Spannungsspitzen auf. Die Anzahl der finiten Elemente beträgt nach dem 19. Iterationsdurchlauf 59055 mit 262821 Unbekannten und einer Berechnungszeit von 4.8s für diese Iteration.

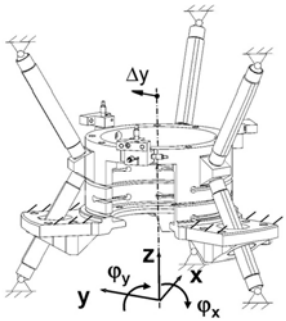


Bild 3: Grundaufbau des piezogetriebenen Festkörpergelenkes nach [6] ohne Umbauteile

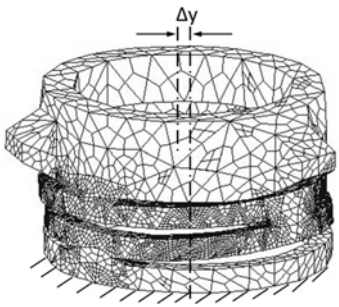


Bild 4: Berechnung der auftretenden linearen Verformung bei Wegvorgabe eines Piezoaktors

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Methode zur Verbesserung und Unterstützung der virtuellen Produktentwicklung vorgestellt. Mit der beschriebenen AFEM-VR-Anbindung sind die Ergebnisse der Simulation als Verschiebungsdarstellung mit optionalen Spannungs-, Temperaturverläufen u. a. in VR visualisierbar und können zusätzlich über die wichtigen Komponenten des DCC-Modells überblendet werden. Anhand dieser Darstellung kann die Modellierungsungenauigkeit im Vergleich zur Berechnung verdeutlicht werden. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, für aufwändige bzw. hochwertige Präsentationen die Simulationsergebnisse zu nutzen, um die zu animierenden Komponenten des DCC-Modells daran auszurichten.

Mit der vorgestellten Methode ist es zusätzlich möglich, durch den Einsatz eines Smartphones eine dazu passende Interaktionsmöglichkeit anzubieten. Als Nachteil der aktuellen Lösung ist die Verwendung eines zweiten Interaktionsgerätes zu sehen, welches der Nutzer neben dem Flystick zum Navigieren benötigt. Die Übertragung dieser Funktionen auf das Smartphone kann dieses Problem lösen und ist Bestandteil zukünftiger Arbeiten.

6 Danksagung

Das Paper präsentiert Forschungsergebnisse des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“

(eniPROD®). Das Gesamtziel des Forschungsprojekts ist die energieeffiziente Verbesserung der Produktionsprozesse. eniPROD wird gefördert von der Europäischen Union aus den Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen.

Literatur

[1] Wittstock, V.; Pätzold, M.: Datenanalyse und Varianten für die VR-Visualisierung von Energiekennwerten. in: eniPROD-Methodenworkshop Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung. Chemnitz, 24.10.2010, Deutschland. (erscheint 2011)

[2] Neugebauer, R.; Meyer, A.; Wittstock, V.; Glänzel, J.; Pätzold, M.; Schumann, M.: VR-tools for the Development of Energy-Efficient Products. in: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.06.019

[3] Meyer. A.: Projected PCGM for Handling Hanging Nodes in Adaptive Finite Element Procedure, Preprint SFB393/99-25, TU Chemnitz, 1999

[4] Neugebauer, R.; Wittstock, V.; Meyer, A.; 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 Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn, Juni 2010, S. 79-95

[5] Wittstock, V., Pätzold, M., Schumann, M, Glänzel, J.: VR-Entwicklungswerkzeuge zur Bewertung energieeffizienter Produkte und Prozesse. in: KT2010, Magdeburg, 2010, S.79-84

[6] Drossel, W.-G.; Wittstock, V.: Adaptive spindle support for improving machining operations. in: Annals of CIRP 56/1, (2008), DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.089

[7] Beuchler, S., Meyer, A., Pester M.: SPC-PM3AdH v1.0 – Programmer's Manual. Preprint SFB 393/01-08, 2003, Fortsetzung: Glänzel, J.: Kurzvorstellung der 3D-FEM Software SPC-PM3AdH-XX, Preprint CSC/09-03, 2009

Effizienzsteigerung des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durch automatisierte Modellierungsansätze im Optimierungsumfeld

Uwe Klemme, Marcin Humpa, Prof. P. Köhler

Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion
Lotharstraße 1, 47057 Duisburg
Email: uwe.klemme@uni-due.de; Internet: http://www.uni-due.de/cae

Inhalt: *Soll ein CAD-Modell zwecks geometrisch-parametrischer Gestaltoptimierung in einen Simulationskreislauf eingebunden werden, so werden daran bestimmte Anforderungen gestellt. Die interne Robustheit eines virtuellen Produktmodells stellt dabei einen bestimmenden Faktor dar, da ein nicht regenerierbares CAD-Modell den Kreislauf zum Abbruch zwingt. Verschiedene Wechselwirkungen mit weiteren Prozessschritten machen weiterhin den Einsatz von Methoden des Knowledge-Based-Engineering (KBE) notwendig. So entstehen höherwertige Mastermodelle, die durch die implementierten prüfenden und regelnden Features eigenständig agieren können. Ein solcher iterativer Kreislauf zwischen der assoziativen Verknüpfung nativer CAD-Daten, einem CFD-Simulationsprozess und einer anschließenden Bewertung und Variation durch Optimierungssoftware wird im folgenden Text beschrieben.*

Abstract: *When a CAD-model has to be implemented into a simulation-process for the purpose of geometric-parametric shape optimization, there are several aspects to be taken into account. The internal robustness of a virtual product-model is a decisive factor, as a not updateable CAD-model forces the cycle to stop. Various interactions with further process-steps make the use of methods for knowledge-based-engineering (KBE) inevitable. This way sophisticated master models are generated which can act autonomously with the implementation of rule-based features. Such an iterative cycle of associative linkage involving native CAD-data, a CFD simulation process and a following validation and variation by optimization software is described in the upcoming text.*

Stichwörter: *KBE, Knowledge-Based-Engineering, geometriebasierte Optimierung, Master-Modell*

Keywords: *KBE, Knowledge-Based-Engineering, geometry based optimization, master model*

1 Der Einfluss der Manipulationsstrategie auf die Modellqualität

Durch den Einsatz immer leistungsfähigerer Hard- und Software nimmt die Bedeutung virtueller Prototypen nicht nur in etablierten Disziplinen wie dem klassischen CAD stetig zu. Dabei werden die Bedürfnisse der Simulationsexperten häufig vernachlässigt, so dass es zu verzögernden Iterationsschleifen kommt, welche immer wieder von den in die

Entwicklung/Optimierung involvierten Abteilungen durchlaufen werden müssen. Dabei entlasten problemspezifische externe Applikationen den Anwender bei monotonen Arbeiten und lenken so den Fokus wieder auf die eigentliche fachliche Aufgabe [1]. Die wiederkehrenden Schritte beziehen sich auf verschiedene Stadien des Produktentwicklungsprozesses, welche abhängig von der gewählten Optimierungsstrategie sind. Eine übliche Unterscheidung wird diesbezüglich häufig zwischen CAD- bzw. FE-basierten Strategien angeführt [2]. Die CAD-Parametrisierung (Bild 1(a)) besitzt hier als zentrales Element ein parametrisches CAD-Modell, welches simuliert und anschließend durch ausgewählte Parameter verändert wird. Die FE-Parametrisierung nutzt dagegen die Möglichkeit, die Koordinaten der Netzpunkte des Simulationsmodells zu manipulieren (Bild 1(b)). Dadurch bedingt ist in der Regel der anschließende Einsatz von Algorithmen des Reverse-Engineering, da die Netzdaten keine fertigungsgerechte Geometrie darstellen. Die lediglich punktstetige Oberfläche wird geglättet, wodurch wiederum Abweichungen von der zuvor ermittelten Idealgestalt entstehen [3]. Die Auswahl der jeweiligen Manipulationsstrategie hängt also von der Optimierungsaufgabe und der weiteren Verwendung der Geometrie ab.

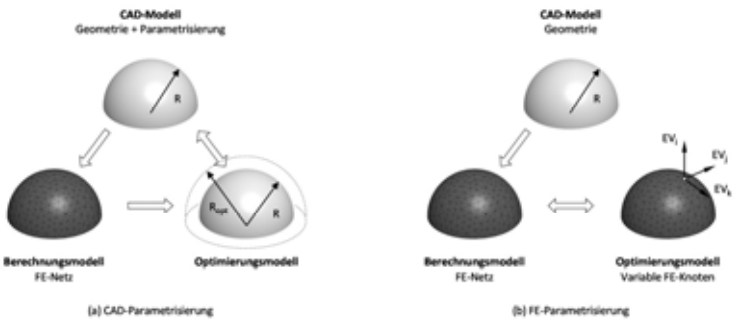


Bild 1: CAD- & FE-basierte Optimierung [2]

Ein alternativer Ansatz zu externen Applikationen ist die unmittelbare Bündelung und assoziative Verknüpfung von Wissen mit dem virtuellen Produktmodell. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist die Verwendung eines integrierten KBE-Systems, da die enge Kopplung „die größten Möglichkeiten in Bereichen Geometriemanipulation und Wissensintegration“ aufweist [4]. Damit können Schnittstellen reduziert sowie der Vorteil der geometriebasierten Manipulation des Modells genutzt werden. Eine Anwendung der

CAD-basierten Methode, bei der die nativen CAD-Daten iterativ manipuliert werden, ist Gegenstand der weiteren Ausführungen.

Inhaltlich ist das von der DFG geförderte Projekt im Bereich der integrativen Kopplung zwischen verschiedenen Entwicklungsdisziplinen angesiedelt und baut auf Erkenntnissen eines Vorgängerprojektes auf. In diesem ging es darum, einen automatisierten Optimierungsablauf für eine Beispielgeometrie (90°-Umlenkung mit variablem Querschnitt) aufzustellen und zu verifizieren. Das Ziel des aktuell bearbeiteten Projekts ist es u. a., durch Veränderung definierter Bereiche das Strömungsverhalten in einem Wendelverteilerwerkzeug zu optimieren und eine gleichzeitig fertigungsgerechte Geometrie aufzubauen. Die Herausforderung bei der Untersuchung dieses Werkzeugtyps liegt in dem im Vorfeld schwierig voraussagbaren Fluidverhalten, welches durch vielfältige Wechselwirkungen beeinflusst wird. Das Erreichen der gewünschten Eigenschaften, wie z. B. einer homogenen Schmelzeverteilung am Werkzeugaustritt und einer günstigen Überlappungssituation der Teilströme, sind nur durch Expertenwissen und langjährige Erfahrung zu erreichen. Analytische Auslegungsalgorithmen liefern hier nur unbefriedigende Ergebnisse bzw. sind aufgrund der hohen Komplexität nicht verfügbar, da zusätzlich noch Aspekte wie z.B. das Verweilzeitverhalten und Leckvolumenströme einen Einfluss auf die Auslegung haben [5]. Durch die Einbeziehung von CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics), die zur Gruppe der numerischen Verfahren gehören, können derartige Phänomene berücksichtigt werden. Das Expertenwissen seitens der Simulation von Kunststoffschmelze sowie Details in Hinblick auf verfahrenstechnische Aspekte werden durch einen Projektpartner an der Universität Duisburg-Essen, dem Institut für Konstruktion und Kunststoffmaschinen, eingebracht [6]. Für die Konstruktion ist vorrangig die Beschreibung der schraubenlinienförmigen Kanalgeometrie von Interesse, da dort sinnvolle Freiheitsgrade für die Optimierung vorliegen. Dieses Detail kann z.B. durch die Verwendung von Stützstellen entlang der Werkzeugachse umgesetzt werden, um u. a. die Spaltweite zu definieren, welche am Werkzeugaustritt die Wandstärke des Produktes bestimmt [5]. Diese Freiheitsgrade beeinflussen bei steigender Anzahl jedoch die Wirtschaftlichkeit der Simulation durch die steigende Berechnungszeit in negativer Form. Neben allen verfahrenstechnischen Aspekten sind jedoch stets auch die Anforderungen der Fertigungsexperten zu berücksichtigen.

Das parametrische CAD-Modell, welches den thematischen Schwerpunkt dieses Beitrags bildet, wird in einen Kreislauf mit einer Strömungssimulation (CFD) und einem Optimierungsalgorithmus eingebunden. Dieser Kreislauf läuft automatisiert ab, so dass die anfängliche Startgeometrie iterativ manipuliert wird und am Ende idealerweise ein dem ermittelten Optimum entsprechendes parametrisches CAD-Modell im nativen Datenformat vorliegt (Bild 2).

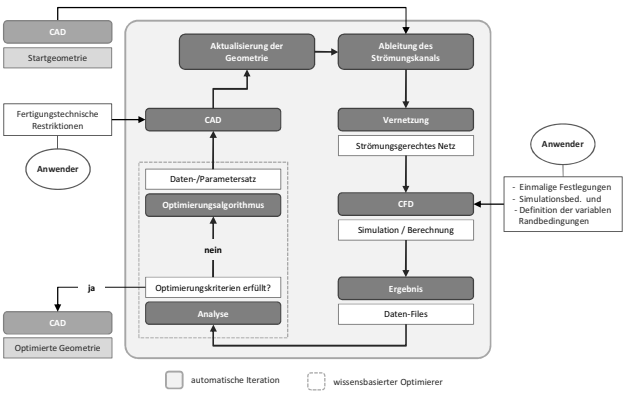


Bild 2: Ablaufdiagramm der Optimierung

2 Der Einflussfaktor Modellierungsstrategie und die interne Robustheit

Die Strategie zum Aufbau eines CAD-Modells ist allgemein stark abhängig vom Verwendungszweck. Häufig werden lediglich einfache Modelle benötigt, die ohne Mehraufwand erzeugt werden. Der Stellenwert von Parametrik und Regeln ist hier untergeordnet, was bei späteren Änderungen zu Problemen und Zeitverzug führen kann. Aus diesem Grund ist es wichtig, bereits zu Beginn der Modellerzeugung Klarheit über die weitere Verwendung des CAD-Modells zu haben, da sich die Strategie darauf ausrichtet. Betrachtet man die wichtigsten Wechselwirkungen, die für das dargestellte Forschungsvorhaben gelten, wird die übergreifende Funktion eines virtuellen Produktmodells deutlich (Bild 3).

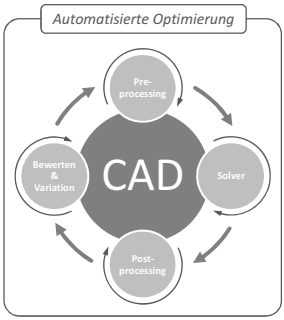


Bild 3: Wechselwirkungen des CAD-Modells im automatisierten Optimierungsprozess

Eine Analyse des Werkzeugs hinsichtlich der strömungsrelevanten Details läßt eine Reduzierung auf drei Hauptkörper zu, die jeder für sich noch weitere Details beinhalten: Der konische Grundkörper (Dorn), die schraubenlinienförmigen Wendelkanäle und eine Stern-Vorverteilung (vgl. Bild 4). Die Umsetzung erfordert neben der Beachtung der geometrischen Genauigkeit ebenso die Notwendigkeit der internen geometrischen Robustheit des Modells. Der erstgenannte Punkt wird durch eine hybride Modelliertechnik erreicht. Dabei werden sowohl Volumen-, als auch Flächenfeatures genutzt, um ein virtuelles Abbild des realen Werkzeugs zu erzeugen und die jeweiligen Vorteile zu nutzen. Der Umgang mit Volumenfeatures ist in der Regel einfacher handhabbar und zeigt im Fall von CATIA V5 Vorteile im Bereich der Stetigkeit von Oberflächen [7]. Unmittelbar damit verknüpft sind jedoch eine geringe Flexibilität und die Tatsache, dass die Steuerung der die Wendel beschreibenden Schraubenlinie nur unzureichende Möglichkeiten bietet. Diese Nachteile werden durch die Optionen im Bereich der Flächenmodellierung kompensiert. Somit werden die flexiblen Bereiche des Dorns und der Strömungskanäle über Flächenfeatures abgebildet, während die eher starre Vorverteilung durch Volumenfeatures realisiert wird. Der fertigungstechnische Aspekt ist durch die Abfolge und Auswahl der Feature-Operationen an den realen Fertigungsablauf angelehnt.

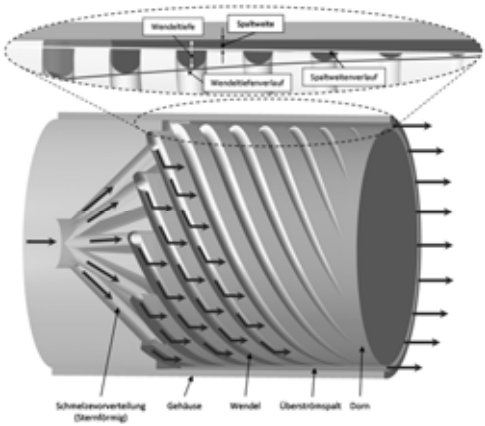


Bild 4: Geometrische Grundelemente des Simulationsmodells

Der zweite bestimmende Aspekt ist, wie bereits erwähnt, die geometrische Robustheit. Diese wird vornehmlich durch die eingebettete Parametrik, unterschiedliche Randbedingungen und passende Modellierungsfeatures sichergestellt. Durch bewusstes Vermeiden geometrischer Abhängigkeiten wird eine weitere Steigerung der Flexibilität erreicht, da so Komponenten gelöscht und durch Varianten ersetzt werden können. Weiterhin dienen Maßparameter als Container der vom Optimierer erzeugten Datensätze und steuern gleichzeitig ausgewählte Features. Die durch den Optimierer dynamisch zu manipulierenden Bereiche sind die Wendel- und Spalttiefen an fünf definierten Stützstellen. Die Festlegung auf fünf Stützstellen ist zunächst willkürlich, trägt jedoch dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit Rechnung, da die so entstehenden zehn Freiheitsgrade bereits eine hohe Rechendauer bedeuten. Weitere Flächenfeatures im Ein- und Austrittsbereich dienen dem automatisierten Post-Processing. An den dort erzeugten Flächen können Simulationsgrößen definiert werden, die dann wiederum bewertet und zur Erzeugung neuer Geometrieparameter herangezogen werden.

3 Knowledge-Based-Engineering führt zu prozessintegrierten Master-Modellen

Das so zunächst geometrisch parametrisierte virtuelle Produktmodell unterliegt im Weiteren einer nicht definierten Zahl von Anpassungen. Dabei können jedoch je nach Parametervariation auch Varianten entstehen, die zu nicht regenerierbaren Modellen

führen, so dass zusätzliche Maßnahmen innerhalb des CAD-Modells zu treffen sind. Durch Knowledge-Based-Engineering erreicht man durch die Integration von Wissen höherwertige Modelle, die als Informationsträger dienen. Dieser Ansatz wurde bereits in [1] aufgegriffen, wo die frühzeitige Implementierung simulationsrelevanter Informationen bezüglich der Diskretisierung von Bauteilen thematisiert wurde. Als Werkzeug dient die in CATIA integrierte Workbench Knowledgeware, welche eine eigenständige objektbasierte Programmierungsumgebung mit direkter Anbindung an das CAD-Modell darstellt. Der Anwender hat so die Möglichkeit, durch Regeln, Formeln, Makros, Reaktionen oder VB-Skripte komplexe Beziehungen umzusetzen, die der Absicherung des robusten Modellverhaltens zuträglich sind. Eine der umgesetzten Regeln kontrolliert den Verlauf der Spaltweite, dessen Verlauf über die Länge des Werkzeugs mit gewissen verfahrenstechnischen Randbedingungen verknüpft ist. Dies geschieht über Abfragen und Regeln unmittelbar während der Geometrieaktualisierung. Analog dazu kontrolliert eine weitere Regel den Wendeltiefenverlauf, welcher zwischen Ein- und Austritt der Schmelze abnehmen soll. Die Verletzung der so gestellten Bedingungen führt zu einer Warnmeldung, die zur entsprechenden Änderung der Parameter auffordert. Das Modell reagiert in diesem Fall an der betreffenden Stelle gemäß dem programmierten Verhalten.
Die sich chronologisch anschließende Interaktion findet zwischen dem CAD-Modell und dem Pre- bzw. Post-Processing statt. Die automatisiert ablaufende Erstellung bzw. Aktualisierung des Simulationsmodells bedient sich vorbereiteter VB-Makros, in denen die Einstellungen für die Simulation hinterlegt sind. Die integrierte Workbench FLUENT for CATIA nutzt diese Einstellungsdaten und führt mit Hilfe weiterer Makros das Pre-Processing durch. Dazu gehört die Ableitung des Fluidvolumens, das Aufstellen der Randbedingungen, das Festlegen von Ergebnisgrößen, die Diskretisierung des Fluidvolumens sowie das Setzen von Solvereinstellungen. Makros nutzen hier zur Identifikation von Flächen und Kurven die B-Rep-Struktur. Die Ergebnisse der Strömungssimulation werden dann an den Optimierer übergeben, der anhand definierter Kriterien eine Bewertung ausführt. Diese führt zur Variation der zuvor in CATIA publizierten Parameter. Nach Überprüfung der oben erwähnten Regeln wird dann ein Update des CAD-Modells durchgeführt und der nächste Iterationschritt beginnt.

In der verbleibenden Projektlaufzeit wird die bidirektionale Kommunikation zwischen CATIA und dem Optimierer im Vordergrund stehen, da im Falle nicht umsetzbarer

Parametersätze derzeit noch keine zielführende Rückmeldung erfolgt. Desweiteren sind praktische Versuche vorgesehen, um die Simulationsergebnisse verifizieren und validieren zu können.

Literatur

[1] Köhler, Peter; Dungs, Sascha; Lupa, Norman: *Das Mastermodell als Basis teilautomatisierter Simulation*. ProduktDaten Journal, Ausgabe 01, 2006

[2] Daoud, Fernaß: Formoptimierung von Freiformschalen – Mathematische Algorithmen und Filtertechniken; Dissertation, 2005

[3] Wortberg, J., Saul, K., Köhler. P., Lupa, N.; Automatisierte Optimierung von Strömungskanälen zur Verbesserung des Spülverhaltens von Kunststoff-Extrusionswerkzeugen. WAK-Zeitung IX, 2008

[4] Lupa, N.; Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten; Dissertation, Cuvillier Verlag, Wesel 2009

[5] Michaeli, W.; Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk - Bauarten, Gestaltung und Berechnungsmöglichkeiten; Hanser Verlag 3. Auflage, Aachen 2009

[6] Saul, K.; Improved performance and product quality by automated geometry optimisation of extrusion dies; PPS-Tagung, 2010

[7] Juretzka, P.; Alternative Methoden zur wissensbasierten Modellierung von Werkzeugen für die Kunststoffverarbeitung; Diplomarbeit, Duisburg 2010

Featurebasierte Modellierung flächiger Blechbauteile mit Verzweigungen

Oliver Weitzmann, Anselm Schüle, Reiner Anderl

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

Inhalt: *Die innovativen Fertigungsverfahren Spaltprofilieren und -biegen bieten, in Kombination mit spanenden Verfahren und Innenhochdruckumformung ein enormes Potential zur Entwicklung integral verzweigter Blechprodukte. Dieser Beitrag beschreibt die Modellierung derartiger Produkte in einem Informationsmodell und unterstützt so den Informationsaustausch in einem komplexen Entwicklungsprozess.*

Abstract: *The innovative manufacturing methods of linear flow splitting and bend splitting render it possible to create bifurcated sheet metal products in an integral style. In combination with high pressure forming a wide range of products can be created. This article describes an information model for bifurcated sheet metal products and thus supports the development process.*

Stichwörter: *Spaltbiegen, Informationsmodell, Freiformfeatures*

Keywords: *Bend Splitting, Information Model, Free Form Features*

1 Einleitung

Im Sonderforschungsbereich 666 werden seit 2005 Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung und Fertigung verzweigter Blechprodukte erforscht. Im Mittelpunkt der Arbeiten stehen dabei die innovativen Fertigungsverfahren des linearen Spaltprofilierens und Spaltbiegens. Durch die Gefügeveränderungen im Umformbereich, die zu einer erhöhten Härte führen, sind vielfältige Anwendungen für derartig hergestellte Profile denkbar. Durch nachgeschaltetes, wirkmedienbasiertes Tiefziehen können aus spaltprofiliertem Halbzeug multiaxial verformte Bauteile gefertigt werden, die zum Beispiel in selbsttragenden Konstruktionen im Bauwesen Einsatz finden. Die Produktentwicklung flächiger verzweigter Blechbauteile wird durch einen algorithmenbasierten Produktentwicklungsprozess unterstützt, in dem aus Produktanforderungen, Optimierungsparameter und Zielfunktionen für mathematische Optimierungsprozesse abgeleitet werden. Die so optimierte Geometrie kann anschließend über eine

featurebasierte Modellierung im CAD-System in Produktmodelle überführt werden. Während des gesamten Modellierungsprozesses werden die Daten über ein Informationsmodell strukturiert abgelegt und stehen den Teildisziplinen zur Verarbeitung zur Verfügung.

2 Die Fertigungsverfahren des Sonderforschungsbereich 666

Die innovativen Fertigungsverfahren des Spaltprofilierens und –biegens werden im Sonderforschungsbereich 666 seit 2005 untersucht und weiterentwickelt. Das Spaltprofilieren ist ein Verfahren der Druckumformung, bei der ein ebenes Blechband durch einen Walzensatz schrittweise umgeformt wird. Ein Walzensatz besteht dabei aus einer stumpfwinkligen Spaltwalze und zwei Hilfswalzen. Durch den hohen isostatischen Druck im Umformbereich fließt das Material zwischen Spaltwalze und Hilfswalzen und bildet ein Y-förmiges Profil aus [1]. Durch Hintereinanderschalten mehrerer solcher Walzensätze mit sich erhöhender Zustellung der Spaltwalze und in Kombination mit herkömmlichen Walzprofilieranlagen sowie spanenden und fügenden Fertigungsverfahren können integrale Mehrkammerprofile hergestellt werden. Nähere Informationen zur Fertigung, Bewertung und Prüfung solcher Profile sind in den Tagungsbänden des Sonderforschungsbereichs zu finden [2, 3, 4].

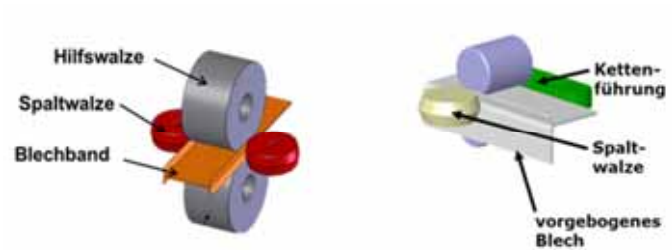


Bild 1: Spaltprofilieren (links) und Spaltbiegen (rechts)

Das Spaltbiegen ist ein Verwandter des Spaltprofilierens: Bei diesem Verfahren wird ein ebenes Blechband durch ein vorgeschaltetes Walzprofilieren zunächst um 90° abgekantet. An der entstandenen Biegekante kann nun wiederum wie beim Spaltprofilieren durch hintereinandergeschaltete Walzensätze ein Flansch ausgebildet werden. Ein sich daran anschließendes Rückbiegen des vorher abgekanteten Blechteils ermöglicht die integrale Fertigung von Stringerelementen aus Blechband. Derart erzeugtes Halbzeug kann nun

durch Innenhochdruckumformung umgeformt werden. Bei geeigneter Prozessführung und Umformgraden verformen sich die Stringerelemente dabei nur wenig und bleiben auch nach dem Umformprozess als Versteifungen auf der Blechoberseite. Die Innenhochdruckumformung verzweigter Bleche ist in [5] beschrieben.

3 Produktentwicklung flächiger verzweigter Blechbauteile

Im Sonderforschungsbereich 666 werden verschiedene Anwendungsszenarien für flächige, verzweigte Blechbauteile entwickelt. Dabei wird die Gestalt des Produktes zunächst in Designanwendungen beschrieben anschließend durch mathematische Verfahren hinsichtlich bestimmter Zielgrößen optimiert. Die Freiformgeometrie wird anschließend im CAD-System weiterverarbeitet und durch Gestaltelemente, sogenannte Feature, detailliert. Die Freiformflächen werden jedoch auch im Werkzeugbau benötigt, um die Tiefziehformen abzuleiten und herzustellen. Im Produktentstehungsprozess der flächigen verzweigten Blechbauteile lassen sich also zwei treibende Größen identifizieren: zum einen die Profilgeometrie des Halbzeugs, also die geometrischen Abmessungen und die Dimension und Lage der spaltgebogenen Versteifungsrippen, zum anderen die Produktgestalt, also die durch Design und Optimierung festgelegte Form. Beide Elemente bestimmen das spätere Produkt. Die Freiformfläche wird im Laufe der Produktentwicklung verändert und detailliert. Ausgehend vom reinen designerischen Entwurf der Architektur findet in der Mathematik eine Anpassung hinsichtlich bestimmter Optimierungsparameter statt. Im nächsten Schritt wird die optimierte Fläche in ein 3D Produktmodell überführt und dabei durch Feature detailliert. Mit Hilfe des so entstandenen 3D-CAD Produktmodells können nun Fertigungssimulationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Simulation können wiederum Einfluss auf die Produktgestalt haben.

4 Verknüpfung von Feature- und Informationsmodell

Als Basis für den Informationsaustausch zwischen den Teilprojekten des SFB und zur Unterstützung des Simultaneous Engineering werden die Informationen und Prozesse in einem Informationsmodell abgebildet. Hierbei soll sichergestellt werden, dass die richtigen und aktuellen Informationen den richtigen Empfänger erreichen. Über die Verknüpfung verschiedener Teildisziplinen mittels eines Informationsmodells kann eine automatisierte

Rechnerunterstützung beispielsweise bei Konstruktions- und Fertigungsplanungsprozessen gewährleistet werden.

Zum Aufbau des Informationsmodells wird der Informationsmodellierungsprozess [6] durchlaufen. Dieser besteht aus der Analyse, Strukturierung und Abbildung der Informationen. Gegenstand der aktuellen Betrachtung ist die Unterstützung der featurebasierten Modellierung für flächige Blechbauweisen mit höherverzweigten Strukturen. Als Inputgrößen für die Modellierung sind insbesondere Geometrieinformationen notwendig. Für die Analyse der Geometrieinformationen wird das flächige Bauteil mit verzweigten Strukturen in zwei Elemente unterteilt. Das erste Element beschreibt die verzweigten Strukturen und das zweite Element die entsprechende Freiformfläche. Relevante Informationen der verzweigten Strukturen sind die geometrischen Daten bezüglich der Fertigungstechnologien des Spaltprofilierens und -biegens wie zum Beispiel Blechdicken, Flanschdicke, Flanschwinkel etc. Zur Repräsentation der verzweigten Strukturen wurde ein sogenannter Lösungsbaum entwickelt. Die Knoten des Lösungsbaumes können in die Klassen “Wurzel”, “Blatt” und “Fertigungsverfahren” (innere Knoten) eingeteilt werden. Die Knoten “Fertigungsverfahren” beinhalten Informationen über die Koordinaten der Knoten, Art des Fertigungsverfahrens etc. Die Kanten, die zwei Knoten miteinander verbinden, repräsentieren die Stege der verzweigten Strukturen und besitzen die Informationen, welche Knoten angegliedert sind und welche Dicke und Länge dieser Steg hat.

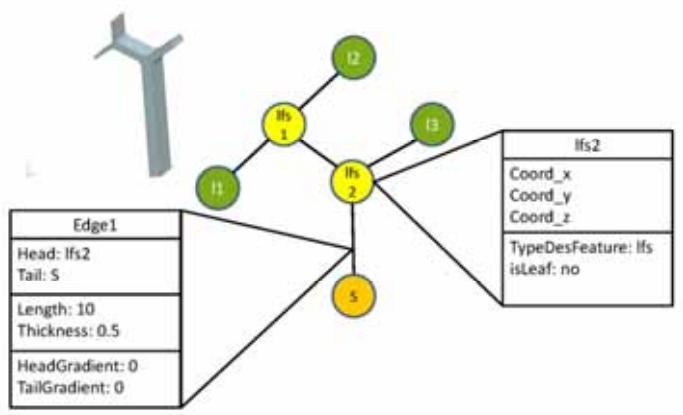


Bild 2: Lösungsbaum mit angehängten Informationen

Freiformflächen werden über Bézierflächen bzw. NURBS beschrieben. Hierzu sind Stützpunkte notwendig. Bei der Betrachtung der Stützpunkte für die Flächendefinition ist eine Matrixstruktur erkennbar. Zur Steigerung der Homogenität der Struktur des Informationsmodells wird eine Graphenstruktur für die Repräsentation der Stützpunkte und derer Anordnung gewählt. Hierbei unterscheiden sich die Inhalte der Knoten und Kanten für die Flächendefinition von der für die verzweigten Strukturen. Die Aggregation der beiden Graphenstrukturen bildet das Kernmodell des Informationsmodells. Weitere Informationen können über Partialmodelle an das Kernmodell angekoppelt werden. Beispielsweise kann das Geometriemodell und das Fertigungsplanungsmodell als Partialmodell angekoppelt werden [7].

Zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses sowie des Fertigungsplanungsprozesses wurden Features für die einzelnen Disziplinen entwickelt. Die Struktur und die Beziehungen der Features werden über das Partialmodell “Featuremodell” abgebildet. Als Inhalte für die Konstruktionsfeatures werden alle Parameter, die für ein bestimmtes Feature relevant sind, abgebildet.

Damit Informationen, die für mehrere Prozesse/Disziplinen notwendig sind, nicht mehrfach im Informationsmodell abgebildet werden müssen, wird auf das Ursprungselement der Information verwiesen. Beispielsweise wird bei der Anwendung des Konstruktionsfeatures “Spaltprofilieren” die Dicke der einzelnen Flansche aus dem Kernmodell referenziert. Dies unterstützt die Durchgängigkeit von Änderungen der Informationen in allen Partialmodellen. Daraus resultiert die Abhängigkeitsfolge (siehe Abbildung) der Features beeinflusst durch den vorgegebenen Entwicklungsprozess.

5 Featuresystematik für Blechbauteile mit Verzweigungen

Unter einem Feature versteht man 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 [8].

Featurebasierte Modellierung ermöglicht die Integration fertigungsrelevanter Informationen in CAD-Produktmodelle. Für die innovativen Fertigungsverfahren des Spaltbiegens und Spaltprofilierens in Kombination mit Tiefziehen ist bislang keine Featurerepräsentation verfügbar. In diesem Beitrag wird eine Featuresystematik für flächige verzweigte Blechbauteile vorgestellt. Dabei werden neben Modellierungsfeatures für das Spaltprofilieren und Spaltbiegen die lokalen und globalen Verformungen der Freiformflächen und die Blechdickenänderungen in Featuremodellen abgebildet. Die Feature im CAD-Modell stellen dabei die Kopplung zwischen Produktentwicklung, Konstruktion und Fertigung dar. Sie ermöglichen einerseits die (teil-)automatisierte Generierung von 3D-CAD Modellen aus optimierten Eingangsgrößen und unterstützen andererseits die Gestaltung der Fertigungsprozesse und Reihenfolgen. Die featurebasierte Modellierung flächiger, verzweigter Blechprodukte stellt somit die Grundlage für das Simultaneous Engineering dieser Bauteile, also die gleichzeitige Entwicklung von Produkt und Produktionseinrichtung, dar.

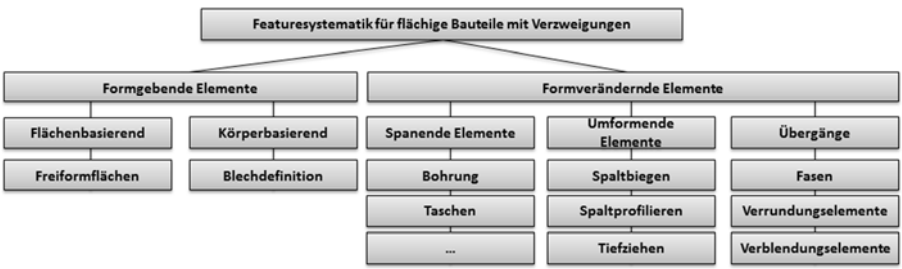


Bild 3: Featuresystematik für flächige Bauteile mit Verzweigungen

Die Featuresystematik ist in Bild 3 dargestellt. Viele der dort aufgeführten Feature sind dabei in der Standardfunktionalität moderner CAD-Systeme enthalten. Dazu gehören zum Beispiel das Erzeugen und Manipulieren von Freiformflächen, Fasen, Verrundungen, Bohrungen und Taschen. Für die verzweigten Blechbauteile sind vor allem die Feature zum Erzeugen von Spaltprofilierten bzw. -gebogenen Stegen auf Freiformflächen relevant. Freiformflächen werden in den CAD-Systemen durch Bézier- oder NURBS-Flächen beschrieben. Sie approximieren Stützpunkte und beschreiben damit keine exakte Geometrie. Einzig die Ränder einer Freiformfläche sind exakt, da diese Punkte als mehrfache Stützpunkte in die Flächenberechnung einfließen. Exaktheit lässt sich also

dadurch erreichen, dass Flächen segmentiert, also an der entsprechenden Stelle geteilt werden. Die entwickelten Features für flächige, verzweigte Blechbauteile beinhalten also neben der parametrischen Geometriebeschreibung der spaltprofilierten Stege Vorschriften zur Unterteilung von Freiformflächen.

Die entwickelte Featuresystematik unterstützt die Automatisierung des Modellierungsprozesses. Hierzu können die verwendeten Elemente der Modellstruktur eindeutig den entsprechenden Elementen des Kernmodells zugeordnet werden. Die hinterlegten Informationen im Kernmodell können somit als Parameter in das Konstruktionsfeature übergeben werden. Der Beitrag zur Unterstützung des Simultaneous Engineering ist eine frühe Überführung der Informationen mittels des Informationssystems in den nachgelagerten Prozess, sowie eine Verbesserung der Änderungsvorgänge aufgrund der Abhängigkeitsfolge des Informationsmodells und der Partialmodelle. Aufbauend auf die Konstruktionsfeaturesystematik soll ein weiteres Partialmodell für die Unterstützung der Fertigungsplanung der flächigen Bauteile mit höher verzweigten Strukturen entwickelt werden. Eine entsprechende Systematik soll ebenfalls die Abhängigkeitsfolge und die damit verbundene Automatisierung und Rückverfolgung unterstützen.

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] Tagungsband 1. Zwischenkolloquium des Sonderforschungsbereich 666, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2007

[3] Tagungsband 2. Zwischenkolloquium des Sonderforschungsbereich 666, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2008

[4] Tagungsband 3. Zwischenkolloquium des Sonderforschungsbereich 666, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2010

[5] Bäcker, F., Ertugrul, M., Groche, P., 2010. “A new process chain for forming individually curved sheet stringers”. International Journal of Material Forming, Volume 3, Supplement 1, pp. 837–840.

[6] Ashenhurst, R 1996. “Ontological aspects of information modeling” Mind and Machines, Volume 6, Part 3, Kluwer Academic Publishers, Netherlands

[7] Anderl, R., Wu, Z., Rollmann, T., 2008. “Information modeling and representation of sheet metal parts with higher order bifurcations”. In Proceedings of 9. International Conference on Technology of Plasticity, Korea, Gyeongju.

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

Bereitstellung von Prozesswissen zur Beherrschung von Unsicherheiten lasttragender Systeme

André Sprenger, Lucia Mosch, Reiner Anderl,

TU-Darmstadt, Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK)
Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt
E-Mail: {sprenger, l.mosch, anderl}@dik.tu-darmstadt.de; Internet: http://www.dik.tu-darmstadt.de

Inhalt: *In diesem Beitrag wird ein ontologiebasierter Ansatz vorgestellt, um Wissen über Unsicherheiten, die in Prozessen auftreten, abzubilden und für die Produktentwicklung in geeigneter Form darzustellen. Ein Informationsmodell ermöglicht es, unterschiedlich präzise Informationen, von Intervallen bis hin zu stochastischen Beschreibungen, einheitlich zu repräsentieren. Für die Darstellung dieser Information, wurde ein Visualisierungskonzept entwickelt, durch das diese Informationen kontextbezogen am 3D-CAD-Modell mit Hilfe eines integrierten Unsicherheits-Browsers dargestellt werden können.*

Abstract: *In this paper a ontology based approach for the representation of process uncertainty is proposed. An information model for different levels of precision form rough estimations to stochastic descriptions is presented, creating a common information base. For the presentation of this information a concept for the visualization is introduced. This renders the possibility of an integrated uncertainty presentation in the 3D-CAD system by an uncertainty browser.*

Stichwörter: *Unsicherheit, Ontologie, Informationsmodell, Visualisierung.*

Keywords: *Uncertainty, Ontology, Informationmodel, Visualization.*

1 Einleitung - Unsicherheit in Prozessen - Problemstellung

In der modernen Produktentstehung sind Informationen über zukünftige Produktanforderungen und Produkteigenschaften essenziell, um einerseits sichere aber auch ökonomische Produkte zu erhalten. Diese Informationen beziehen sich auf Produktions- und Nutzungsprozesse, deren Prozesseigenschaften oft nur in unzureichender Form beschrieben werden. In den unterschiedlichen Prozessen, die ein Produkt während seines Lebens durchläuft, werden domänenspezifische Beschreibungen von Prozesseigenschaften genutzt. Da eine Fertigung auf ein exakt bestimmtes Nennmaß nicht nötig und auch nicht wirtschaftlich ist, nutzt die Konstruktion Toleranzen, um diese Unsicherheit zu beschreiben und dadurch die Funktionalität und die Austauschbarkeit der Teile sicher zu stellen [1]. Toleranzen können sich sowohl auf Maße, Form, Oberfläche als auch auf Materialeigenschaften wie z.B. Festigkeit oder Härte beziehen. Im Bereich der

Produktion werden Toleranzen dann durch statistische Methoden aus dem Bereich der Maschinen- und Prozessfähigkeit ergänzt, um im Vorfeld der tatsächlichen Produktion Aussagen über die Qualität machen zu können. Zur Kontrolle der tatsächlich erreichten Qualität finden während oder im Anschluss an die Produktion die Methoden der Qualitätssicherung Anwendung. Im weiteren Verlauf des Produktlebenslaufes spielen in der Nutzungsphase Lastkollektive, Zuverlässigkeits- und Lebensdauerbetrachtungen eine Rolle. Auch hier werden Unsicherheiten bezüglich dieser Eigenschaften mit Hilfe verschiedener Beschreibungsformen, wie z.B. der Statistik, dargestellt. Die hier genannten Beispiele stehen stellvertretend für eine ganze Reihe von Prozessen des Produktlebenslaufes, deren Resultate nicht genau bestimmt werden können und somit unsicherheitsbehaftet sind. Sind die Werte relevanter Eigenschaften bzw. deren lokale und wertmäßige Streuung unbekannt, so kann es zu Abweichungen im weiteren Produktions- und Nutzungsprozess kommen. Diese Unsicherheit macht es erforderlich, dass Produkte und Prozesse mit erhöhten Sicherheitsbeiwerten versehen werden müssen, was dem Ziel eines möglichst ökonomischen Produktes abträglich ist [4]. Die Beherrschung dieser Unsicherheiten setzt möglichst umfassendes Wissen über diese Unsicherheiten schon in der Produktentwicklung voraus.

2 Zielsetzung

Die Unsicherheit, die im Laufe eines Produktlebens in den verschiedenen Phasen auftritt, wird bisher nur gesondert in den jeweiligen Bereichen betrachtet. In der modernen Produktentwicklung zeigt sich aber immer klarer, dass die Eigenschaften des Produktes durch Wechselwirkungsbeziehungen miteinander verwoben sind. Die unterschiedlichen Beschreibungsarten und Bezeichnungen von Unsicherheit in den jeweiligen Phasen stellen eine Hürde für eine ganzheitliche Betrachtung von Unsicherheit dar, die aber für eine Lösungsentwicklung unerlässlich ist. Der hier vorgestellte Ansatz besteht aus zwei Teilen. Zum einen wird auf Basis einer Ontologie ein Informationsmodell vorgestellt, welches die Informationen aus verschiedenen Lebensphasen aggregiert und in ein Modell für Unsicherheit abbildet. Ontologien erscheinen in diesem Fall besonders geeignet, da die Basis einer Ontologie durch einen Begriffsraum dargestellt wird. Diese Ontologie gliedert unterschiedliche Konzepte und fasst sie in abstrakten Oberkonzepten zusammen. Die

unterschiedlichen Begriffswelten, auf die man im Bereich der Unsicherheit trifft, lassen sich so effizient verarbeiten.
Aufbauend darauf wird ein Visualisierungskonzept für CAD-Systeme vorgestellt, welches u.a. unter Nutzung der Parametrik in Verbindung mit einem Unsicherheits-Browser Unsicherheit für den Konstrukteur greifbar vermittelt.

3 Abbildung von Unsicherheit

Da sich die hier betrachtete Unsicherheit auf Eigenschaften bezieht, werden diese zunächst genauer betrachtet. Eine Eigenschaft besteht aus einer Merkmalsbezeichnung, welche die Art des Merkmals beschreibt, und einer Beschreibung des Wertes. In der Statistik unterscheidet man in Nominal-, Ordinal-, Intervall-, und Verhältnisskala [2]. In Rahmen dieser Betrachtung von Unsicherheit sollen vorrangig Eigenschaften mit Werten aus dem Bereich der Intervall- und Verhältnisskala betrachtet werden. Eine Klassifikation dieser Unsicherheiten wird in [3] vorgestellt. Die Autoren unterscheiden drei verschiedene Unsicherheitskategorien. Bei Unwissen kann nichts über den Wert einer bestimmten Eigenschaft ausgesagt werden. Ungewissheit beschreibt einen Nennwert und/oder ein Intervall, in dem der tatsächliche Wert liegen muss bzw. vermutet wird. Stochastische Unsicherheit beschreibt Werte, die durch wiederholte Versuche statistisch untermauert wurden. Um eine einheitliche rechnerverarbeitbare Darstellung zu ermöglichen, wurde hierzu ein Konzept erarbeitet. Dieses wurde in einem XML-Schema, dem erweiterten Unsicherheitsdatentyp, realisiert.

3.1 Erweiterter Unsicherheitsdatentyp

Aufbauend auf einer grundlegenden Darstellung unsicherer Werte, die bereits in [6] vorgestellt wurde, stellt der erweiterte Unsicherheitsdatentyp sechs Beschreibungsformen für Unsicherheit zur Verfügung. Verteilung, Histogramm, und Realisierung beziehen sich auf Stochastische Unsicherheit. Fuzzy, 1-D Intervall, 2D-/3D-Intervall bzw. Elliptische Menge beschreiben Ungewissheit. Für Unwissen existiert definitionsgemäß keine Wertbeschreibung. Bild 1 zeigt die schematische Darstellung der verschiedenen Beschreibungsformen. Die Darstellung dieser Beschreibungsformen erfolgt durch Wertepaare (x, y) und beschreibungsformabhängige Attribute. Verteilungen werden über Wertepaare angenähert. Das ermöglicht es, jede beliebige Verteilungsfunktion darstellen

zu können. Das Histogramm als Beschreibungsform ist insbesondere für klassifizierte oder nicht kontinuierliche Daten geeignet.

		x	y	Attribut
Verteilung		Wert	Häufigkeit	Stat. Kenngrößen
Histogramm		Klasse	Häufigkeit	Stat. Kenngrößen
Realisation		ID	Wert	Typ {sort, unsort, time}
Fuzzy (linear)		X-Wert des Wendepunktes	Y-Wert des Wendepunktes	Fuzzyname
1-D Intervall		Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Nennwert, Sollwert
2D-/3-D Intervall Elliptische Menge		X-Kantenlänge/ Parameter_1	Y-Kantenlänge/ Parameter_2	Typ{cuboid, ellipsoid, ...} Z-Kantenlänge, Parameter_3

Bild 1: Schematische Darstellung des Unsicherheits-Daten-Typs

Eine Realisierung stellt den Verlauf eines Wertes im Beobachtungsverlauf dar und bildet somit die Grundlage für die beiden vorgenannten Darstellungsformen. Bei einer Realisierung können zeitliche Verläufe und Tendenzen besser identifiziert werden. Die Darstellung von aus den zugrundeliegenden Daten abgeleiteten statistischen Größen erfolgt analog zu den ersten vier statistischen Momenten als Erwartungswert, Varianz (bzw. Standardabweichung), Schiefe und Wölbung. Zusätzlich können verschiedene Quartile abgebildet werden. Weitere Größen sind denkbar, wurden jedoch nicht untersucht. Mit diesen Werten lässt sich der Charakter der zugrunde liegenden Daten qualitativ beschreiben. Für die Darstellung von Intervallen bzw. Bereichen stehen drei weitere Darstellungsformen zur Verfügung. Mit Hilfe linearer Fuzzy-Funktionen lassen sich unscharfe Werte wie z.B. Schätzungen darstellen. Offene, geschlossene und unbeschränkte Intervalle sowie Einzelwerte können über das 1-D Intervall angegeben werden. Liegen komplexe Abhängigkeiten vor, so können diese Grenzen über einfache 2-D/3-D Intervalle in Form eines Rechtecks bzw. Quaders oder als Elliptische Menge angegeben werden. Diese Elemente stellten sich insbesondere bei der Anwendung mathematischer Optimierungsverfahren als geeignet heraus. Die Umsetzung als XML-

Schema erlaubt die einfache Integration in die Ontologie sowie in verarbeitende Software wie z.B. MatLab oder MS Excel.

3.2 Strukturierung von unsicheren Produkteigenschaften in einer Ontologie

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, tritt Unsicherheit während des Produktlebens während verschiedener Phasen und in verschiedenen Formen auf. Um eine einheitliche Betrachtung und damit Bewertung und Beherrschung erreichen zu können, werden einheitliche Konzepte benötigt. Dazu wurden Kennzahlen aus den Bereichen Maßtoleranzen/Passungen, Materialeigenschaften, Prozessfähigkeit, Qualitätsmanagement, Last- bzw. Usage-Monitoring analysiert und auf die Konzepte der Unsicherheit, die im vorherigen Kapitel vorgestellt wurden, abgebildet. Diese Ontologie für Eigenschaften bildet einen Teil einer Ontologie, die Prozesse, wie sie im Produktlebenslauf auftreten, beschreibt sowie die Struktur eines Produktes referenzieren kann.

Zunächst wird in der Ontologie unterschieden, ob die konkrete Produkteigenschaft ($PEigen$) den Soll-Zustand ($PSollEigen$) oder den Ist-Zustand ($PIstEigen$) eines Produktes beschreibt:

$$PEigen \sqsupseteq \{PSollEigen, PIstEigen\} \quad (1)$$

$$PSollEigen \equiv PEigen \sqcap (\exists DefiniertIn.Anfordeung \sqcup \exists DefiniertIn.ProduktModell) \quad (2)$$

$$PIstEigen \equiv PEigen \sqcap (\exists istRealisiertIn.Prozess) \equiv ProzessEigenschaft \quad (3)$$

Die Ist-Eigenschaften eines realen Produktes werden dabei immer durch Prozesse bestimmt. Die Unterscheidung in Soll- und Ist-Zustand kann für eine Zuordnung zu den Phasen des Produktlebens weitergeführt werden:

$$PSollEigen \equiv PEigenVonEntwicklung \quad (4)$$

$$PIstEigen \equiv PEigenVonProduktion \sqcup PEigenVonNutzung \quad (5)$$

$$PEigenVonProduktion \equiv PEigen \sqcap (\exists istRealisiertIn.ProduktionsProzess) \quad (6)$$

Eigenschaften lasttragender Produkte lassen sich auch produktbezogen gliedern. Dies erfolgt hier in Bezug auf Material-, Gestalt- und Lasteigenschaften. Diese lassen sich weiter unterteilen. Hier am Beispiel der Gestalteigenschaft dargestellt (8).

$$PEigen \sqsupseteq \{MaterialEigenschaft, GestaltEigenschaft, LastEigenschaft\} \quad (7)$$

$$GestaltEigenschaft \sqsupseteq \{Maßtoleranz, Formtoleranz, Lagetoleranz, Oberflächengüte\} \quad (8)$$

Weitere und feinere Gliederungen wurden durchgeführt, auf deren Darstellung im Folgenden aber verzichtet wird. Die so gegliederten Eigenschaften können in die Formen der Unsicherheitsbeschreibung (*Unsicherheitsbeschr)* überführt werden. Dazu werden die im vorherigen Kapitel vorgestellten Beschreibungsformen für Stochastische Unsicherheit und Ungewissheit (*StochastischeUns, Ungewissheit*) genutzt. *UnsicherheitsIndex* bezeichnet Kennzahlen, die aus mehreren Unsicherheitsbeschreibungen errechnet werden können. Hierbei können z.B. Intervalle und aus der Stochastischen Unsicherheit abgeleitete Intervalle (Quantile, Six-Sigma) zueinander ins Verhältnis gesetzt (vgl. [5]).

$$Unsicherheitsbeschr \sqsupseteq \{StochastischeUns, Ungewissheit, UnsicherheitsIndex\} \quad (9)$$

$$StochastischeUns \sqsupseteq \{Verteilung, Histogramm, Realisierung \quad (10)$$

$$Ungewissheit \sqsupseteq \{Fuzzy, Intervall1\mathrm{D}, Intervall2_3D \quad (11)$$

$$StochastischeUns \equiv Unsicherheitsbeschr \sqcap (\exists hatStatKenngröße.StatKenngröße) \quad (12)$$

$$UnsicherheitsIndex \equiv \exists hatMathematischenOperator.Unsicherheitsbeschr \quad (13)$$

Die Eigenschaften (*PEigen*) können nun den Unsicherheitsbeschreibungsformen aus dem vorherigen Kapitel zugewiesen werden. Zum Beispiel kann eine Formtoleranz wertmäßig als ein 1-D Intervall (14) oder eine Prozessstreuung als Verteilung (15) abgebildet werden. Darüber hinaus lässt sich aus diesen Größen die Prozessfähigkeit ableiten (16):

$$Formtoleranz \sqsubseteq Intervall \quad (14)$$

$$Prozesstreuung \sqsubseteq Verteilung \quad (15)$$

$$Prozessfähikeit \equiv \exists hatDvidend.Formtoleranz \sqcap \exists hatDivisor.Prozesstreuung \quad (16)$$

Die so erreichte einheitliche Wertdarstellung über unterschiedlichste Bereiche des Produktlebenslaufes ermöglicht es, Prozess- und Produkteigenschaften bzw. Soll- und Ist-Eigenschaften aus verschiedenen Bereichen zu aggregieren und zu vergleichen. Das Wissen über die technischen Grenzen des Produktes und zukünftige Prozessgrößen, denen das Produkt tatsächlich ausgesetzt sein wird, sind essenziell für die Produktentwicklung. Die dazu notwendigen Informationen liegen in Unternehmen sehr oft bereits in den jeweiligen Bereichen vor, sind aber aufgrund ihrer Vielfältigkeit und

unterschiedlichster Beschreibungsformen nur schlecht für übergreifende Betrachtungen verfügbar.
Mit Hilfe einer einheitlichen Repräsentation können eventuelle Informationsdefizite erkannt und vorhandene Informationen besser ausgewertet werden, um nicht optimale Sicherheitsfaktoren identifizieren und korrigieren zu können. Der hier vorgestellte Ansatz liefert Grundlagen für eine derartige Abbildung.

4 Visualisierung von Unsicherheit

Aufbauend auf den im Abschnitt 3 vorgestellten Modellen wird für die Visualisierung ein Sichtenkonzept erstellt, das in Form eines Unsicherheits-Browsers realisiert wurde. Daneben wird ein weiterführender Ansatz auf Basis der 3D-CAD Parametrik vorgestellt.

Grundlage für eine kontextbezogene und geometriebasierte Visualisierung von Unsicherheiten sind die Gestalteigenschaften eines jeden Produktes. Um 3D-CAD-Modelle und somit das Produktmodell um Unsicherheits- und Prozessinformationen erweitern zu können, wird die rechnerinterne Struktur (BRep) dieser Modelle benötigt. Der Austausch dieser Struktur wird mit Hilfe eines XML-Schemas als Schnittstelle zwischen CAD-Modell und Ontologie realisiert. Die Ontologie ist in der Lage, diese Struktur zu referenzieren und dazugehörige Informationen an den Unsicherheits-Browser weiterzugeben. Der Unsicherheits-Browser dient zur Darstellung der zu visualisierenden Informationen und deren Verknüpfung im Kontext des CAD-Modells.
Das Sichtenkonzept des Unsicherheits-Browsers erlaubt eine Filterung bzw. Sortierung der Informationen, um aus der umfangreichen Informationsbasis nur gewünschte Informationen darzustellen. Dazu wird z.B. der Bezug der Eigenschaften zur jeweiligen Produktlebenszyklusphase oder zu speziellen Prozessen genutzt. Die Darstellung der unsicheren Produkteigenschaften erfolgt in Tabellenform. Um die so ausgewählten Eigenschaften dem Konstrukteur am 3D-CAD Modell zu präsentieren, werden aus den in Kap. 3.1 vorgestellten Beschreibungsformen entsprechende Darstellungen abgeleitet und über die in der Ontologie vorhandene Strukturreferenz direkt am betreffenden Teil angezeigt. Durch entsprechendes Hervorheben der betroffenen Geometrie wird eine intuitiv wahrnehmbare Präsentation gewährleistet.
Für eine weiterführende Visualisierungstechnik wird die Parametrik moderner

CAD-Systeme genutzt. Auf die im Browser zuvor ausgewählten unsicheren Gestalteigenschaften werden die Modellierungsparameter abgebildet. Diese können dann vom Konstrukteur in dem Rahmen, den die Unsicherheitsbeschreibung vorgibt, verändert werden. Hierdurch kann im späteren Verlauf Einfluss auf die rein geometrische Beschreibung genommen werden. Diese Zuordnung geschieht zunächst manuell im Unsicherheits-Browser. So kann zum Beispiel die Maßtoleranz (als 1-D Intervall) dem Parameter „Durchmesser“ zugeordnet werden, und entsprechend der Intervallgrenzen verändert werden. Einer Formtoleranz, oder einer Lagetoleranz, dagegen wird z. B. der Parameter „Winkel zwischen zwei Ebenen“ zugewiesen. Diese Zuordnung ermöglicht eine Variation der Gestalteigenschaften des Modells im Bereich der Unsicherheit. Die daraus abgeleiteten Modelle können dann z.B. für Simulationen zur virtuellen Absicherung herangezogen werden.

5 Fazit

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz vorgestellt, der es erlaubt Wissen über Unsicherheiten, die in Prozessen auftreten, abzubilden und dem Konstrukteur in geeigneter Form darzustellen. Dazu wurden eine Ontologie vorgestellt, die es erlaubt bereits vorhandene Information aus verschiedenen Bereichen des Produktlebens bezüglich Unsicherheit auf spezielle Beschreibungsformen für Unsicherheit abzubilden. Darauf aufbauend wurde ein auf Parametrik basierendes Visualisierungskonzept vorgestellt.

Danksagung

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

Literatur

[1] [1]Albers, A.: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus,* 7. Auflage: Springer. Berlin, Heidelberg, New York, 2005.

[2] Cramer, E.; Kamps, U.: *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik.* Ein Skript für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften, 2. überarb.: Springer. Berlin, Heidelberg, 2008.

[3] Engelhardt, R. A.; Koenen, J. F.; Enss, G. C.; Sichau, A.; Platz, R.; Kloberdanz, H.; Birkhofer, H.; Hanselka, H.: *A Model to Categorise Uncertainty in Load-Carrying Systems:* MMEP Modelling and Management of Engineering Processes, 19. - 20.07.2010 in Cambridge/UK.

[4] Hanselka, H.; Platz, R.: Ansätze und Maßnahmen zur Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus. In: VDI-Konstruktion (2010) 11/12.

[5] Pilch, M.; Trucano, T.; Helton, J.: *Ideas underlying quantification of margins and uncertainties (QMU): A white paper. In:* Unlimited Release SAND2006-5001, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico 87185.

[6] Sprenger, A.; Mosch, L.; Anderl, R.: *Representation of Uncertainty in Distributed Product Development:* Proceedings of the 18th Annual European Concurrent Engineering Conference 2011, 18-20.04.2011 in London/UK.

ParaFEM – innovative Zukunftsstrategie zur effektiven Nutzung von numerischen Methoden mit integrierter Parametrisierung für Konstruktionsaufgaben

Andreas Nickel, Konstantin Benke

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau
Institute Product and Service Engineering
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Universitätsstraße 150, 44780 Bochum
Internet: www.itm.rub.de
Email: andreas.nickel@itm.rub.de
Email: konstantin.benke@itm.rub.de

Inhalt: *ParaFEM ist der Kern einer integrierten Berechnungsumgebung mit der FEM als internem Lösungskonzept. Durch eine standardisierte Vorgehensweise und die Verwendung frei verfügbarer und validierter Softwarekomponenten eignet sich dieses Konzept insbesondere für KMUs. Das systematische Vorgehen und die innovative Nutzung numerischer Methoden, welche für Konstruktionsaufgaben eingesetzt wird, ermöglicht eine schnellere Ermittlung von Lebensdauer und Betriebssicherheit. Die parametrische Beschreibung ermöglicht schnelle und einfache Bauteilvarianten.*

In diesem Beitrag wird die parametrische FEM-Analyse an einem ausgewählten Pilotbeispiel demonstriert. Dabei handelt es sich um Flanschverbindungen in beliebigen Größen bis hin zu den Verbindungen in den Türmen von Windkraftanlagen, die überwiegend dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Das Besondere dabei ist, dass hierbei die Einbindung eines CAD-Modells entfällt, da eine parametrische Bauteilbeschreibung vorliegt. Die bauteilspezifische Umsetzung der Vernetzung und der FEM-Analyse erfolgt nach algorithmischen Regelwerken, die für den Anwender unsichtbar bleiben. Dadurch wird der Nutzer nicht mehr mit der eigentlichen FEM-Analyse konfrontiert, sondern nur noch mit signifikanten Kennwerten, die der traditionellen Vorgehensweise entsprechen und somit keinen Interpretationsaufwand erfordert.

Abstract: *ParaFEM is the basic element of an integrated calculation environment with the FEM as an internal solution concept. Through a standardised procedure and the use of Open Source and validated software components, this concept is particularly suitable for SMEs. The systematic approach which is used for design tasks and the innovative use of numerical methods will allow a faster identification of durability and operating reliability. The parametric description permits a quick and easy realisation of several component variations.*

In this paper, the parametric FEM analysis will be demonstrated by a typical example. These are joint flanges in all sizes up to flanges in the towers of wind energy plants, which are exposed to dynamic loads most of the time. The special feature is that the integration of a CAD model is not necessary because a parametric component description is available. The component-specific realisation of the meshing and the solving is based on algorithmic rules, which remain invisible for the user. So the user is no longer confronted with the proper FEM analysis. He is only confronted with significant characteristics that conform to the traditional approach. Therefore the usual interpretation effort is no more necessary.

Stichwörter: *FEM, Parametrisierung, Konstruktion, automatische Netzgenerierung, kleine und mittlere Unternehmen*

Keywords: *FEM, parametrics, mechanical design, automatic meshing, small and medium-sized enterprises*

1 Einleitung

Heutzutage werden immer mehr Festigkeitsberechnungen, die nicht mit analytischen Methoden gelöst werden können, mit der Finite-Elemente-Methode berechnet. Dies trifft nicht nur auf große Firmen mit eigener Berechnungsabteilung zu, sondern auch auf kleine und mittlere Unternehmen. Diese können und wollen sich meist keine eigene Berechnungsabteilung oder Berechnungsexperten leisten, da die Menge der Berechnungen, die in diesen Unternehmen durchgeführt werden müssen, nicht groß genug ist, dass sich diese Investition lohnen würde. In den meisten Fällen werden diese Berechnungen an Ingenieurbüros oder Berechnungsabteilungen anderer Firmen ausgelagert, was ebenfalls Geld und Zeit in Anspruch nimmt.

Um dieses Problem von kleinen und mittleren Unternehmen zu lösen, wurde ein System entwickelt, welches mithilfe des ParaFEM-Konzeptes [1,2] arbeitet und in diesem Beitrag vorgestellt und erläutert wird. Mit diesem ist es möglich, Standardbauteile, bei denen eine analytische Berechnung nicht möglich ist, ohne FEM-Systeme berechnen zu können. Diese Standardbauteile werden vorher nicht in einem CAD-System modelliert, sondern es müssen lediglich die Parameter der Bauteildimensionen sowie Randbedingungen und Materialkennwerte im System eingegeben werden. Hierdurch ist eine einfache Variation von verschiedenen Dimensionen einer Bauteilfamilie gegeben. Nach der Berechnung wird automatisch eine Ergebnisausgabe generiert, welche allgemeinverständlich wiedergibt, ob das zu berechnende Bauteil den Belastungen standhält.

Im Folgenden wird zunächst das ParaFEM-Konzept allgemein erläutert und anschließend anhand eines Pilotbeispiels näher auf die Umsetzungen eingegangen. Abschließend wird ein Ausblick über die Weiterentwicklung des Konzeptes gegeben.

2 Das ParaFEM-Konzept

Das ParaFEM-Konzept läuft im Gegensatz zur traditionellen Vorgehensweise bei FEM-Berechnungen fast vollständig automatisiert ab (Bild 1). Sowohl bei der traditionellen als auch bei der neuartigen ParaFEM-Methode liegt zunächst ein Bauteilkonzept vor. Das Bauteil muss bei der traditionellen Vorgehensweise zunächst mit einem CAD-System modelliert werden. Dieses ist bei dem neuen Konzept durch eine vollständig parametrisierte Bauteilbeschreibung nicht mehr notwendig. Der Benutzer gibt lediglich die Parameter im System ein, was gleichzeitig den einzigen benutzergesteuerten Arbeitsschritt im ParaFEM-Konzept darstellt.

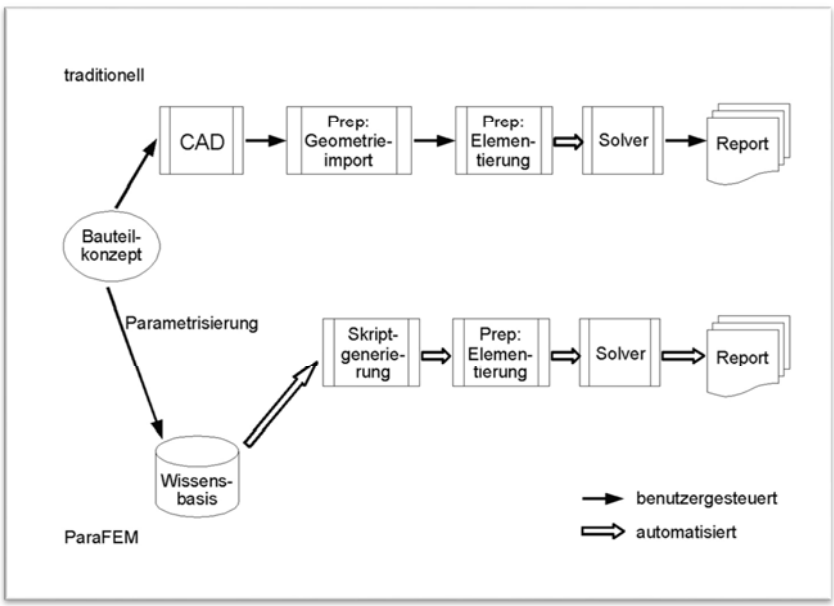


Bild 1: Traditioneller FEM-Workflow und ParaFEM-Workflow [1,2]

Bei der herkömmlichen Vorgehensweise muss das CAD-Modell zunächst in ein FEM-System importiert werden, was sehr häufig zu Problemen führt, da die geometrischen Bauteilmodelle nicht unbedingt berechnungsgerecht sind. Die Elementierung muss ebenfalls manuell durchführt und bei Bedarf verändert werden, damit brauchbare Ergebnisse erreicht werden können.

Im Gegensatz dazu ist beim ParaFEM-Konzept der betreffende Lastfall schon bekannt und in einer Wissensbasis hinterlegt. Da bekannt ist, wie sich ein betreffendes Standardteil in bestimmten Lastsituationen verhält, wird die Vernetzung automatisch nach bestimmten Regeln angepasst. Sowohl die geometrische Modellierung als auch die Vernetzung und die Randbedingungen werden automatisch mittels eines vorprogrammierten Skripts erstellt.

Die Berechnung wird bei beiden Vorgehensweisen automatisiert von einem Solver durchgeführt. Bei der traditionellen Methode muss die Ergebnisauswertung von einem FEM-Experten durchgeführt werden, da alle Spannungen und Verschiebungen richtig gedeutet und interpretiert werden müssen. Bei der ParaFEM-Methode hingegen wird bei der Auswertung ein auf Abfragen basierender Algorithmus durchlaufen. Hierbei werden sämtliche wichtigen Sicherheiten, die in den gängigen Normen festgelegt sind [3,4], berücksichtigt. Aufgrund dieser Abfragen kann schließlich automatisiert darüber Auskunft gegeben werden, ob der zu berechnende Lastfall den Belastungen standhält. Die Ergebnisausgabe für den Benutzer erfolgt über ein Ampelsystem. Somit kann der Benutzer, ohne Ergebnisse interpretieren zu müssen, schnell entscheiden, ob das Teil auf die zu berechnende Weise belastet werden kann.

3 Die Umsetzung

Im Folgenden wird auf das vorgestellte Konzept anhand eines Pilotbeispiels näher eingegangen. Bei dem hier gezeigten Beispiel handelt es sich um einen Flansch einer Windkraftanlage, welcher vor allem dynamischen Belastungen ausgesetzt ist. Mit dem Konzept können allerdings auch andere Typen von Flanschen parametrisch berechnet werden.

3.1 Modellierung und Vernetzung

Im Hintergrund, für den Nutzer nicht sichtbar, laufen einige Programme zur Modellierung und Berechnung ab. Für die Geometriemodellierung (Bild 2) und die Vernetzung des

Modells (Bild 3) hat sich das Preprozessor-System Salome [6] als nützlich erwiesen. Der große Vorteil dieses Programmes ist, dass es von dem französischen Stromkonzern Électricité de France (EdF) entwickelt wurde und für deren Berechnungen von Kraftwerksleitungen benutzt wird und somit validiert ist. Außerdem steht das Programm zur freien Verfügung und verursacht somit keine Lizenzkosten wie andere großen Systeme.

Die vom Nutzer im System eingegebenen Daten werden mithilfe einer XML-Datei übergeben und über ein Python-Skript ausgelesen. Die XML-Datei enthält dementsprechend alle wichtigen Parameter der Geometrie, des Materials und der Randbedingungen. Über das Skript werden zunächst die geometrischen Dimensionen gesteuert. Als Geometrieparameter werden unter anderem die Grunddimensionen, wie Innen- und Außendurchmesser, aber auch die Anzahl sowie die Größe der Bohrungen definiert. Die Vernetzung wird ebenfalls über das Skript gesteuert. Dies ist um einiges komplizierter, da die Vernetzung je nach Bauteilvariante und Belastungszustand über eine Wissens- und Regelbasis angepasst werden muss.

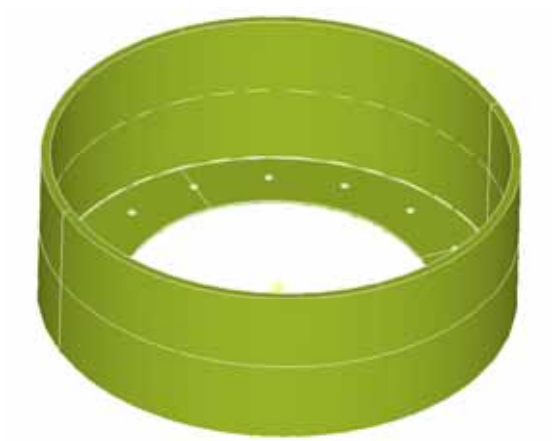


Bild 2: Geometriemodell des Flansches

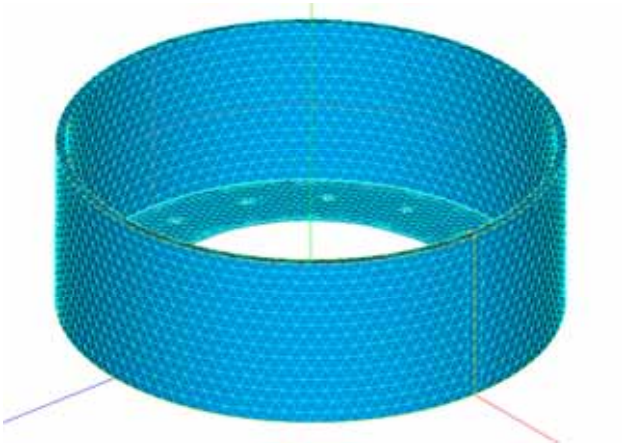


Bild 3: Vernetztes Modell des Flansches

3.2 Wissens- und Regelbasis

Die Vernetzung wird über ein Regelwerk mithilfe einer Wissensbasis gesteuert. Um dies zu realisieren mussten Regeln definiert und implementiert werden, mit welchen das System die Bauteile schließlich automatisch vernetzen kann.

Einige Beispiele für diese Regeln sind z.B. die Grundnetzdichte, welche sich nach der Größe des Bauteils richtet. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass eine definierte Anzahl von Knoten um die Bohrungen herum festgelegt wird (Bild 4). Dies richtet sich nach dem Verhältnis der Bohrungsgröße zum Gesamtbauteil. Ebenfalls haben die Anzahl der Bohrungen sowie der Lochkreisdurchmesser Einfluss auf die Vernetzung im Bereich rund um die Bohrungen herum.

Durch die bekannten Bauteilbelastungen und Verformungen bei bestimmten Lastzuständen, welche in der Wissensbasis gespeichert sind, werden Netzverfeinerungen bereits vor der Berechnung an gefährdeten Stellen durchgeführt. Ein Beispiel ist die Verformung an den Schrauben bzw. den Außenrändern des Flanschens durch Klaffen. Traditionell müssten diese Verfeinerungen durch Iterationen nach den ersten Berechnungen manuell durchgeführt werden. Bei anderen Belastungen ändern sich diese lokalen Netzverfeinerungen automatisch an anderen gefährdeten Stellen.

Durch die automatisierte Vorgehensweise und die Regelung durch die Wissensbasis sind die Ergebnisse der Berechnungen reproduzierbar und validiert. Bei der traditionellen

Vorgehensweise hingegen können Interpretationen verschiedener Berechnungs-ingenieuren variieren.

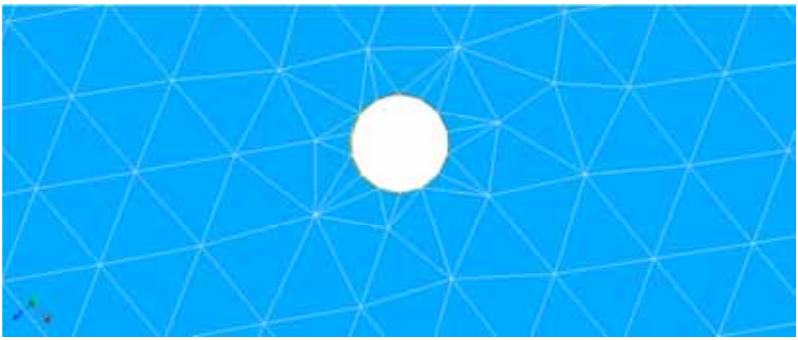


Bild 4: Detailansicht Bohrung

3.3 Berechnung und Auswertung

Die Berechnung wird mit dem frei verfügbaren Solver Calculix CCX [5] durchgeführt. Um das von Salome vernetzte Modell in Calculix CCX zu importieren, wird das Modell mittels des IDEAS-Universal-Formats exportiert. Diese wird wiederum mit einem eigens implementierten Programm in ein Calculix-konformes Format umgewandelt.

In der Input-Datei von Calculix werden die Lasten und Randbedingungen definiert, welche wie bei der Geometrie zuvor, über die XML-Datei ausgelesen werden. Gleiches gilt für die Materialkennwerte.

Die Schrauben des Flansches werden nicht detailliert modelliert, sondern durch Kräfte in einem Ersatzmodell abgebildet, um Rechenzeit zu sparen. Die Ergebnisse werden durch diese Maßnahme nicht signifikant beeinflusst. Der Turm oberhalb der Flanschverbindung, welche mit dem Fundament verbunden ist, wird vernachlässigt und ebenfalls durch eine Kraft ersetzt. Der Turm wird hierbei sowohl auf Biegung als auch auf Torsion beansprucht.

Die bei der Berechnung erzielten Ergebnisse werden schließlich durch die zuvor erwähnten normgerechten Algorithmen ausgewertet. Der Benutzer kann sich das Ergebnis der Berechnung durch eine Ampel anzeigen lassen. Auf Wunsch kann der Benutzer sich zu Kontrolle auch das Postprozessor-Bild mit detaillierten Spannungen und Verschiebungen anzeigen lassen.

4 Ausblick

Nachdem bereits parametrische Modelle von Flanschverbindungen, verschiedenen Federtypen und Rohrhalterungen nach dem ParaFEM-Konzept umgesetzt wurden, sollen in Zukunft weitere Standardbauteile in das System integriert werden. Außerdem sollen Kerben, Risse sowie deren Ausbreitungen in das Konzept aufgenommen werden, woran bereits gearbeitet wird. Mittelfristig soll ein Autorensystem entstehen, bei dem die Nutzer selbst an der Weiterentwicklung neue Bauteilmodelle mitwirken können.

Gerade in kleinen und mittleren Unternehmen birgt das neue Konzept eine großes Einsparungspotential und mehr Variabilität im täglichen Umgang mit der Berechnung. Das System soll in Zukunft weiter ausgebaut und in die kommerzielle Software MDESIGN unseres Projektpartners TEDATA [7], welche zur Berechnung und Auslegung bereits von vielen Firmen verwendet wird, integriert werden.

Literatur und Quellen

[1] Prüfer, Hans-Peter, Finite Elemente für den konstruktiven Alltag: Mit einer vereinfachten Anwendung zu besseren Ergebnissen, 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2009, Bayreuth, ISBN: 978-3-00-028222-5

[2] Prüfer, Hans-Peter, ParaFEM – Neue Wege zur besseren Bauteilanalysen, Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, Dresden 2009, ISBN: 978-3-941298-43-9

[3] Muhs, D.; e.a.:Roloff / Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. Vieweg, ISBN: 978-3528010281

[4] Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer, ISBN: 978-3-540-49714-1
Dubbel interaktiv: ISBN 978-3-540-14943-6, ISBN 978-3-540-14942-2

[5] Dhondt, Guido; Wittig, Klaus: Calculix
http://www.calculix.de

[6] EDF, Salome
http://salome-plattform.org

[7] MDESIGN: TEDATA GmbH, Königsallee 45, 44789 Bochum

Gewichtsreduzierung von Windkraftgetrieben durch asymmetrische Verzahnungen

Christian Brecher, Christof Gorgels, Jan Ingeli

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen
Email: J.Ingeli@wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *Die zunehmende Entwicklung hin zu Multimegawatt Turbinen in der Windkraftbranche stellt hinsichtlich Leistungsübertragung hohe Anforderungen an die einzelnen Komponenten des Antriebsstranges. Einhergehend mit den zunehmenden Belastungen ist die Leistungsdichte und somit das Gewicht der verbauten Komponenten entscheidend. Diese Tendenz zeigt sich in den Anstrengungen, die unternommen werden müssen, um die mehrere Tonnen wiegenden Gondeln zu montieren und einen sicheren Stand dieser zu gewährleisten. Daher ist es unabdingbar das Gewicht der im Antriebsstrang verbauten Komponenten zu reduzieren und trotzdem die Tragfähigkeit sicherzustellen.*

Die Verzahnung ist als zentrales Übertragungsglied im Antriebsstrang ein Bauteil, welches im Bereich der eingesetzten Modulgrößen und verbauten Anzahl Potential zur Gewichtsreduzierung bietet. Durch Sonderverzahnungen kann eine Steigerung der Leistungsdichte erzielt werden. In Windkraftanlagen liegt eine Vorzugsdrehrichtung vor, daher ist es möglich die Verzahnungen asymmetrisch auszuführen. Hierbei liegen unterschiedliche Eingriffswinkel von Zug- und Druckflanke vor. Durch die Änderung der Eingriffswinkel kann die Verzahnung belastungsgerecht gestaltet werden.

Im Vergleich zum PKW-Getriebe ist bei Windkraftgetrieben durch die hohen Kosten der einzelnen Verzahnungen eine umfassende prüfstandstechnische Absicherung der Beanspruchbarkeit der Verzahnungen nicht möglich. Daher ist für den Konstrukteur die Absicherung seiner Auslegung durch zertifizierte und von Versicherern akzeptierte Auslegungsrichtlinien und Normen unabdingbar. Gängige Auslegungsrichtlinien für Stirnradverzahnungen sind in den Normen der DIN 3990/ISO 6336 [1, 2] hinterlegt. Sonderverzahnungen wie die asymmetrischen Verzahnungen werden darin allerdings bisher nicht berücksichtigt.

Die im Vortrag dargestellte Auslegungsmethodik zeigt eine Möglichkeit auf, durch eine gezielte geometrische Gestaltung der asymmetrischen Verzahnung diese mittels der empirischen Faktoren der Normberechnung zu bewerten. Hieraus kann eine Sicherheit für die Flankentragfähigkeit berechnet werden. Da eine direkte Proportionalität zwischen der Beanspruchbarkeit der Verzahnung und der vorliegenden Verzahnungsbreite besteht, ist es nun möglich, die Verzahnungsbreite der asymmetrischen Verzahnung zu verringern, um gegenüber einer vergleichbaren symmetrischen Verzahnung eine erhebliche Gewichtsreduzierung zu erzielen.

Abstract: *Nowadays the increase of power density and noise reduction are in focus of new gear designs. For applications with asymmetric load spectra such as wind turbines the use of asymmetric gearings can be an option to increase the power density of gearings. The limitation for the use of asymmetric tooth profiles is the lack of calculation methods for asymmetric cylindrical gears.*

Asymmetric teeth have different pressure angles on the drive and coast flanks. If gears are used in gearbox applications with uniform load and rotation conditions, the drive flank can be designed for high load carrying capacity. Besides the increasing load carrying capacity of the drive flank the asymmetric geometrical design of the tooth root can be used to decrease the tooth root stresses.

Within this report a design process for asymmetrical gears was presented. This design process is based on the design process of symmetrical high gears. Furthermore an analysis of the empiric factors of the standardised design processes based on DIN 3990/ISO 6336 [1, 2] was made. As a result of this analysis boundary conditions were defined which had to be fixed to compare an asymmetrical gear with an symmetrical gear. The design process of the asymmetrical gears was customized to fit the defined boundary conditions. Thus a reduction of the gear mass was realized.

Stichwörter: *Gewichtsreduzierung, Asymmetrische Verzahnungen, Verzahnungsauslegung, Flankentragfähigkeit*

Keywords: *Weight Reduction, Asymmetric Gears, Gear Design, Surface Durability*

1 Einleitung

Bisherige Untersuchungen [3, 4, 5, 6, 7] zur Tragfähigkeit asymmetrischer Verzahnungen fokussieren die geometrische Auslegung asymmetrischer Verzahnungen mit der Zielsetzung, die höchste Leistungsdichte der Verzahnung zu erzielen. Als Bewertungsgrößen werden hierbei die aus den FEM-Berechnungen ermittelten Beanspruchungsgrößen wie Zahnfußspannungen und Flankenpressungen herangezogen. Diese Beanspruchungsgrößen können allerdings nicht direkt in der genormten Tragfähigkeitsberechnung für Verzahnungen eingesetzt werden, da eine Zertifizierung der Berechnungsergebnisse weder bei FE-basierten noch bei analytischen Zahnkontaktanalyseprogrammen durchgeführt wurde.

Stellt man die normbasierten Berechnungen den gängigen Zahnkontaktanalysen gegenüber, sind folgende Aussagen zu treffen. Die meisten Zahnkontaktanalysemethoden liefern sehr exakte Berechnungsergebnisse, die zudem in der Lage sind die lokale Beanspruchung zu beschreiben. Jedoch sind bei diesen Methoden aufgrund der Komplexität der Berechnungsalgorithmen bisher nicht alle Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen auf das Berechnungsergebnis bekannt.

Dahingegen sind die Berechnungsmethoden der Normen nicht in der Lage eine lokale Beanspruchung zu berechnen. Diese Unschärfe wird dadurch bereinigt, dass anhand von empirischen Versuchen Korrekturfaktoren entwickelt werden, die auf einfache Art und Weise die Einflussgrößen beschreiben sollen. Die Korrekturfaktoren beschreiben ausgehend von einer symmetrischen Referenzverzahnung die mit den geometrischen und umfeldbasierten Unterschieden zu erwartenden Änderungen der Beanspruchung.
Die Beurteilung der Beanspruchung von asymmetrischen Verzahnungen mit genormten Verfahren ist derzeit unsicher. Zum einen ist die Berechnung der Zahnpaareingriffssteifigkeit nicht möglich und zum anderen ist nicht bekannt, inwiefern die Korrekturfaktoren angepasst werden müssen, um auch auf asymmetrische Verzahnungen angewendet werden zu können.

2 Normberechnung der erforderlichen Ritzelbreite zur Erzielung einer geforderten Flankentragfähigkeit

Eine mögliche Vorgehensweise, um die ersten Verzahnungsgrößen abzuschätzen ist die Berechnung der erforderlichen Ritzelbreite. Diese lässt sich aus dem geforderten Ritzelvolumen bestimmen, dass zum Erzielen einer geforderten Sicherheit der Flankenbeanspruchung herangezogen werden kann, [8]. Das erforderliche Ritzelvolumen lässt sich nach Gleichung (1) bestimmen.

Tabelle 1: Berechnung der erforderlichen Ritzelbreite

$$b_{erf} = \frac{4 * V_{erf}}{\pi * d^2} \quad \text{mit} \quad V_{erf} = \frac{T_{an} * \pi}{2} * \frac{S_H^{\,2}}{\sigma_{H\lim}^{\,2}} * \frac{u+1}{u} * \left(\frac{Z_{\sigma H} * K_{\sigma H}}{Z_{SH}} \right)^2 \tag{1}$$

$$K_{\sigma H} = \sqrt{K_A * K_V * K_{H\beta} * K_{H\alpha}} \tag{2}$$

$$Z_{\sigma H} = Z_H * Z_E * Z_\varepsilon * Z_\beta * Z_B \tag{3}$$

$$Z_{SH} = Z_L * Z_N * Z_V * Z_R * Z_W * Z_X \tag{4}$$

b_{erf}	[mm]	Erforderliche Ritzelbreite	u	[-]	Zähnezahlverhältnis
V_{erf}	[mm³]	Erforderliches Ritzelvolumen	$Z_{\sigma H}$	[-]	Zusammenfassung Z-Faktoren
d	[mm]	Teilkreisdurchmesser	$K_{\sigma H}$	[-]	Zusammenfassung K-Faktoren
T_{an}	[Nm]	Antriebsmoment	Z_{sH}	[-]	Zusammenfassung Z-Faktoren
S_H	[-]	Sicherheit bzgl. Grübchen			
σ_{Hlim}	[N/mm²]	Dauerfestigkeit für Flankenpressung			

In diese überschlägige Abschätzung gehen neben den Belastungsdaten zudem Faktoren aus der Normberechnung mit ein [1, 2], die in den Gleichungen (2, 3, 4) zusammengefasst

sind. Die zur Abschätzung der erforderlichen Ritzelbreite notwendigen Größen sind durch das Pflichtenheft bekannt oder bei der Wahl des Getriebeschemas ermittelt worden.
Es zeigt sich, dass beim Vergleich der geometrischen und Umfeld beschreibenden Faktoren bis auf die Faktoren $K_{H\alpha}$ und Z_H alle weiteren Faktoren gleich denen der symmetrischen Ausgangsverzahnung gesetzt werden können, Bild 1.

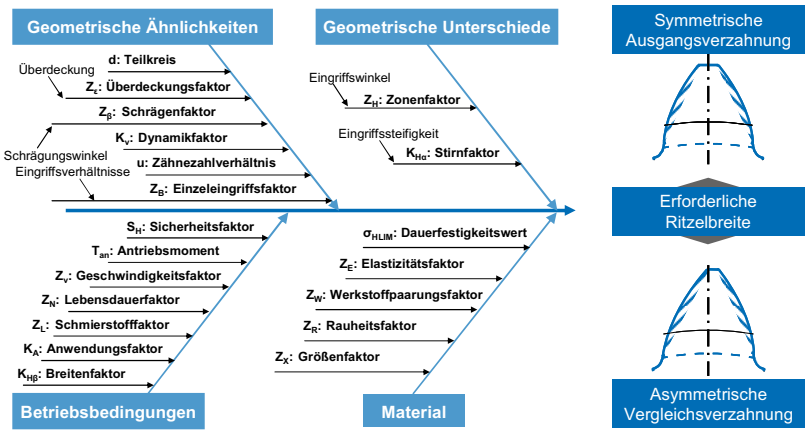


Bild 1: Vergleich der empirischen Faktoren für symmetrische und asymmetrische Verzahnungen

Wenn es zudem möglich wäre eine Auslegungsstrategie zu entwickeln, die die gezeigten geometrischen Randbedingungen bzw. Ähnlichkeiten berücksichtigt, wäre eine erste Eingliederung der asymmetrischen Verzahnungen in die genormte Verzahnungsauslegung möglich. Eine solche Auslegungsstrategie bezogen auf die Flankentragfähigkeit soll im Folgenden entwickelt werden.

3 Auslegungsstrategie für eine normfähige asymmetrische Vergleichsverzahnung

Die hier beschriebene Auslegungsstrategie lehnt sich an die in [9] beschriebene Auslegung von Hochverzahnungen an, Bild 2. Da es sich bei den Anwendungsbereichen von asymmetrischen Verzahnungen um Getriebe mit Vorzugs-Last-Drehrichtung handelt, wird im Folgenden in den Auslegungsschritten eins bis drei ausschließlich die beanspruchte Zugseite betrachtet. In den Auslegungsschritten vier und fünf wird anschließend das Verzahnungsprofil vervollständigt, indem mittels Vorgabe der

Profilverschiebung und eines minimalen Zahnkopfspiels die resultierende Zahnkopfdicke berechnet und das erzeugende Werkzeugbezugsprofil erstellt wird.

Zielgröße:	Stellparameter:
Auslegungsschritt 1: Gleiche Basisgrößen	
z_1, z_2, a, α_{nZug}, α_{nDruck}, m_n	α_{wt}, $\sum x'$
Auslegungsschritt 2: Gleiche Profilüberdeckung	
ε_α	$g_\alpha' \Rightarrow h_{a1}' = f(h_{a2}')$
Auslegungsschritt 3: Gleiches spez. Gleiten	
$\zeta_{f1} = \zeta_{f2}$	g_a', $g_f' \Rightarrow h_{a1}'$, h_{a2}'
Auslegungsschritt 4: Gleiche Profilverschiebungen	
x_{e1}', x_{e2}'	h_{ap1}', h_{ap2}', s_{an1}', s_{an2}'
Auslegungsschritt 5: Minimales Kopfspiel	
$c_1'_{min}$, $c_2'_{min}$	h_{ap01}', h_{ap02}', h_{fp01}', h_{fp02}', h_{Ffp01}', h_{Ffp02}', ρ_{ap01}', ρ_{ap02}'

Geometrische Gestaltung:

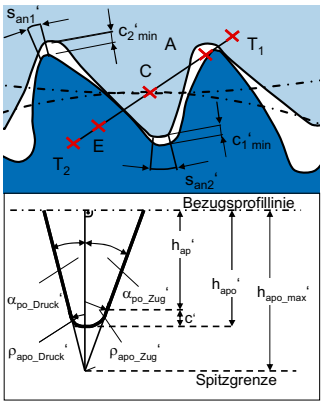


Bild 2: Einzelschritte der Auslegungsstrategie

Die vorgestellte Auslegungsstrategie folgt der Vorgabe, dass aus gegebenen geometrischen Startwerten, die von einer symmetrischen Ausgangsverzahnung vorliegen, alle weiteren Daten der Vergleichsverzahnung abgeleitet werden. Darüber hinaus ist es möglich die Auslegungsstrategie anzuwenden, um asymmetrische Verzahnungen geometrisch korrekt auszulegen, selbst wenn keine Vorgaben einer Ausgangsverzahnung vorliegen.

4 Beanspruchungsberechnung der asymmetrischen Vergleichsverzahnung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Beanspruchungsberechnung dargestellt. Dazu werden zunächst die Varianten der asymmetrischen Vergleichsverzahnung vorgestellt, die anhand der zuvor beschriebenen Auslegungsstrategie entwickelt wurden. Es folgen die Ergebnisse der Beanspruchungsberechnung, die mit Hilfe der Gleichung (1) durchgeführt wurden. Aus dieser Gleichung ergibt sich eine erforderliche Ritzelbreite zur Erzielung der vorgegebenen Sicherheiten gegenüber Grübchenbildung. Demgegenüber werden die Ergebnisse dargestellt, die mit Hilfe der FE-basierten Zahnkontaktanalyse

STIRAK berechnet wurden. Hierbei wurde die Verzahnungsbreite bei den asymmetrischen Varianten verringert, bis sich dieselben Beanspruchungswerte auf der Flanke wie bei der symmetrischen Ausgangsverzahnung ergaben. Als Bewertungsgröße wurde die Hertz'sche Pressung am Wälzkreis herangezogen. Bild 3 zeigt die zehn Verzahnungsvarianten, die bezüglich Flankentragfähigkeit ausgewertet wurden. Dargestellt sind die Stirnschnitte des Ritzelprofils. Es zeigt sich, dass ausgehend von der symmetrischen Ausgangsverzahnung bei konstantem Eingriffswinkel auf der Druckseite und steigendem Eingriffswinkel auf der Zugseite die Zahnkopfdicke sowie das Kopfspiel sinken. Es bildet sich ein spitzer Zahnkopf aus; die Zahnhöhe steigt. Wird nun ausgehend von der asymmetrischen Variante mit α_{Zug} = 32° und α_{Druck} = 20° der Eingriffswinkel auf der Druckseite schrittweise gesteigert, so steigt die Zahnkopfdicke wieder an. Das Zahnkopfspiel kann leicht gesteigert werden, da sich durch den steigenden Winkelunterschied der Bezugsprofilwinkel des asymmetrischen Werkzeugs ein breiterer Kopfbereich des Werkzeugs ergibt und somit ein größerer Werkzeugkopfrundungsradius realisiert werden kann

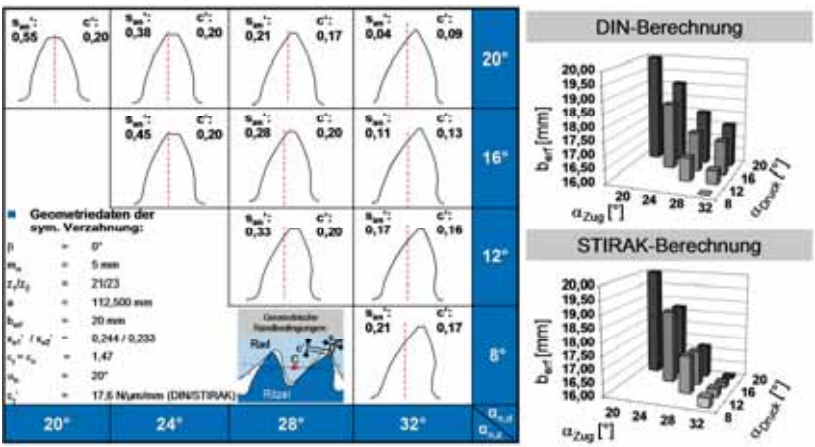


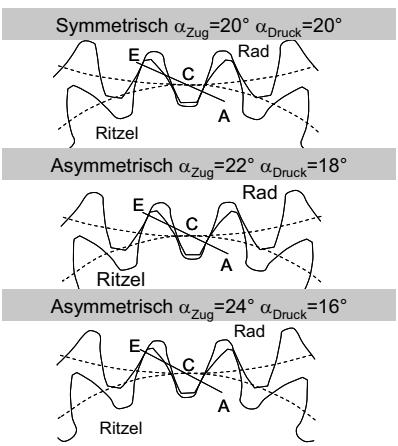
Bild 3: Vergleich der erforderlichen Ritzelbreiten aus FE- und Norm-Berechnung

Auf der rechten Seite von Bild 3 sind die Ergebnisse der Berechnungen nach der normbasierten Formel und der Berechnung mit STIRAK dargestellt. Es zeigt sich die Tendenz, dass durch eine Steigerung der Eingriffswinkel auf der Zugseite eine Senkung der Belastungen erzielt werden kann. In der Darstellung wird dies dadurch deutlich, dass

geringere erforderliche Verzahnungsbreiten benötigt werden, um dieselben Belastungen zu ertragen. Eine andere Tendenz zeigt sich bei der Änderung der Eingriffswinkel auf der Druckseite. Hier wird bei der FE-basierten Methode keine starke Änderung der Belastungen berechnet, wohingegen in der normbasierten Formel eine Steigerung der Belastungen berechnet wird und somit die erforderliche Breite steigt. Auffällig ist allerdings, dass soweit die Summe der Eingriffswinkel, ausgehend von der symmetrischen Verzahnung mit $\sum\alpha = 40°$, konstant bleibt, auch die Ergebnisse der beiden Methoden sehr gut korrelieren. Hierbei sind die Unterschiede im Bereich von ca. 0,5 mm. Der Grund ist darin zu sehen, dass die Eingriffssteifigkeiten bei gleichen Eingriffswinkelsummen ein ähnliches Niveau aufweisen. Hieraus lässt sich die Aussage machen, dass die Normberechnung nur bei gleichen Summen der Eingriffswinkel sinnvoll anwendbar ist, wohingegen bei der FE-basierten Zahnkontaktanalyse diesbezüglich keine Restriktionen vorherrschen.

5 Steigerung der Leistungsdichte einer Windkraftverzahnung

Zur Abschätzung der erzielbaren Steigerung der Leistungsdichte wurde eine großmodulige Verzahnung aus dem Windkraftbereich gewählt, Bild 4.



Berechnungsergebnisse

Variante $\alpha_{Zug}/\alpha_{Druck}$	b [mm]	ε_β [–]	m_1/m_2 [kg]	$\sum\Delta m$ [%]
20°/20°	170	0,605	68/321	0
22°/18°	160	0,569	64/302	5,9
24°/16°	150	0,534	60/283	11,8

- Verzahnungsmakrogeometrie:

m_n = 14 mm
z_1/z_2 = 18/39
a = 416 mm
b_{erf} = 170 mm/160 mm/150 mm
α_{nZug} = 20°/22°/24°
β = 9°
M_{an} = 3000 Nm
n_{an} = 1000 min^{-1}
S_H = 2,8

Bild 4: Steigerung der Leistungsdichte durch asymmetrische Verzahnungen

Die in Kapitel 3 dargestellte Auslegungsstrategie wurde angewandt, um durch die Ausführung einer symmetrischen Ausgangsverzahnung als asymmetrische Vergleichsverzahnung die Leistungsdichte zu steigern.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei gleichen Antriebslasten durch asymmetrische Änderung der Eingriffswinkel eine Steigerung der Leistungsdichte erreicht werden kann, die durch eine Reduzierung des Verzahnungsgewichts um 11,8 % ausgedrückt werden kann.

Aktuell bedingt die dargestellte Auslegungsmethode eine Vorgabe der Eingriffswinkel von Zug- und Druckflanke. Zukünftig wird eine rechnerische Ermittlung der erzielbaren Eingriffswinkel unter Berücksichtigung der dargestellten geometrischen Randbedingungen in die Methode integriert werden.

Literatur

[1] N.N.: DIN 3990 - Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Teil 1-4. Beuth Verlag, 1987

[2] N.N.: ISO 6336 - Calculation of load capacity of spur and helical gears, part 1 – 5, 2007

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

[4] Kapelevich, A. L.: Direct Gear Design: Bending Stress Minimization; In: Gear Technology, September/October 2003, 44 - 49.

[5] Kumar, V. S.: Optimization of asymmetric spur gear drives to improve the bending load capacity, In: Mechanism and Machine Theory 43 (2008) 829–858

[6] Brecher, C.; Gorgels, C.; Ingeli, J.: FE-basierte Zahnkontaktanalyse zur anwendungs- und fertigungsgerechten Auslegung von Topografiekorrekturen asymmetrischer Verzahnungen In: Schweizer Maschinenelemente Kolloquium, Rapperswill, 9./10. November 2010

[7] Brecher, C.; Gorgels, C.; Ingeli, J.: Verwendung der FE-basierten Zahnkontaktanalyse zur Analyse asymmetrischer Verzahnungen In: 8. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik, Magdeburg, 7./8. Oktober 2010

[8] Linke, H.: In: Stirnradverzahnungen, 2. Auflage, München, Wien, Hanser-Verlag, 2010

[9] Lachenmaier, S.: Auslegung von evolventischen Sonderverzahnungen für schwingungs- und geräuscharmen Lauf von Getrieben, Dissertation, RWTH Aachen, 1983

Alternatives Lagerkonzept für die Rotorlagerung von Windenergieanlagen

Ingo Jonuschies, Klaus Brökel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
Email: ingo.jonuschies@uni-rostock.de; klaus.broekel@uni-rostock.de
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Die Lagerung des Antriebsstranges einer Windenergieanlage stellt die Hersteller immer wieder vor neue Herausforderungen. In der Vergangenheit kam es des Öfteren zu enttäuschenden Lebenserwartungen an den Lagerstellen der Rotorwelle. Ob dieses an Dimensionierungsfehlern durch mangelnde Kenntnisse der Lasten oder an kurzen Entwicklungszeiten gepaart mit rasanten Leistungssteigerungen lag, ist nicht immer genau nachzuvollziehen. Jedoch ist zu erkennen, dass der Fokus bei der Lagerauswahl auf den Wälzlagern liegt. Im Zusammenhang mit immer größer werdenden Windenergieanlagen können Gleitlager eine Alternative darstellen, da sie theoretisch verschleißfrei arbeiten. Andererseits bringen sie auch große Herausforderungen mit sich, zum Beispiel an die Betriebssicherheit. Die Fragestellung der Einsatzchancen von Gleitlagern in Windenergieanlagen ist Gegenstand dieser Arbeit und soll einen innovativen Beitrag zur Problematik der Rotorlagerung liefern.*

Abstract: *The bearing of the drive train from a wind turbine is an ever new challenge for the manufacturer. On the bearing of the rotor shaft it often comes to disappointing life expectancy. The mistakes in the dimensioning by lack of knowledge of the loads or short development times, paired with rapid increase in performance, are repeatedly unknown. But it is to evident that the focus is on the roller bearings. In connection with growing wind turbines plain bearings can be an alternative, because they theoretically work wear free. However, they also involve great challenges, for example the reliability. This question of the potential for use of plain bearings in wind turbines is the subject of this work and will provide an innovative contribution to the problem of rotor bearings.*

Stichwörter: *Rotorlagerung, Gleitlager, Hydrodynamik, Hydrostatik, Windenergieanlagen*

Keywords: *rotor bearing, plain bearing, wind turbine, hydrodynamic, hydrostatic*

1 Motivation

Aktuell werden der Stromerzeugung aus Biomasse, Photovoltaik und Windkraft die größten Wachstumspotentiale vorausgesagt. Anfang der Neunziger Jahre lag ihr Anteil am Bruttostromverbrauch zusammen bei unter einem Prozent, 2010 lieferten sie zusammen schon fast 13% [1]. Der Windenergie kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Ihr Anteil an der Stromerzeugung in Deutschland ist besonders in den letzten 10 Jahren kräftig gestiegen. Während ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch in Deutschland vor 20 Jahren noch verschwindend gering war, lieferte sie im Jahr 2008 bereits 7% der Strommenge [2]. Zu diesem rasanten Wachstum führte nicht nur das vermehrte Aufstellen von Windkraftanlagen sondern auch die technische Weiterentwicklung. Wenn man die in Serie gebauten Windkraftanlagen vergleicht, stellt man fest, dass es in den letzten Jahrzehnten zu einer erheblichen Leistungssteigerung gekommen ist. 1982 betrug die Nennleistung einer typischen Anlage 55 kW bei einem Rotordurchmesser von 15 Metern. Kraftwerke aus dem Jahr 2005 kamen bereits auf eine Leistung von 5000 kW bei 125 Metern Rotordurchmesser [3].

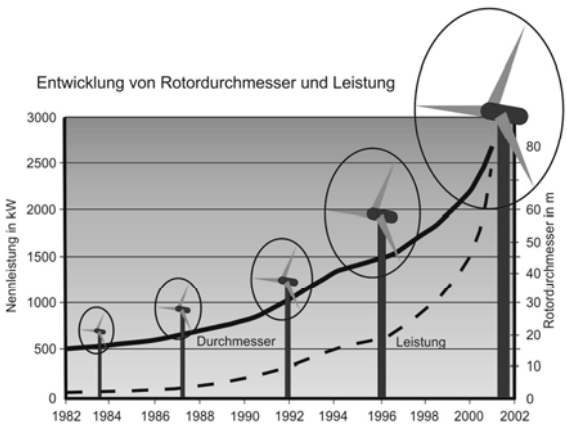


Bild 1: Leistungsentwicklung Windenergieanlagen

Die wachsende Größe der Anlagen stellt aber auch besondere Anforderungen an die einzelnen Komponenten. Höhere Türme haben größere Rotorlängen zur Folge, wodurch wiederum die Rotornabe und Rotorwelle vergrößert werden müssen. Die Lagerung dieser

Welle wird bei aktuellen Windkraftanlagen mit Wälzlagern realisiert. Bei diesen Lagerkonzepten treten bei größer werdenden Wellendurchmessern immer wieder Probleme an den Wälzlagern auf und stellen einen der Schadensschwerpunkte dar [4]. Um diese Probleme zu lösen, wird die Fragestellung bearbeitet, ob es alternative Möglichkeiten zur Lagerung der Rotorwelle gibt, beispielsweise unter Verwendung von hydrodynamischen oder hydrostatischen Gleitlagern.

2 Probleme von Wälzlagern als Rotorwellenlager

Wenn Lager ihre rechnerisch ermittelte Lebensdauer nicht erreichen, ist nicht zwangsläufig ein Hersteller- oder Materialfehler die Ursache. Häufig entstehen Ausfälle von Wälzlagern durch Fehler beim Transport, der Montage und durch andere äußere Einflüsse. Die Ursachen für einen Wälzlagerschaden beziehungsweise einen Ausfall liegen meist nicht an einem einzigen Schadensmechanismus sondern an einer Überlagerung mehrerer. Die einzelnen Schadensformen lassen sich in vier Hauptgruppen mit verschiedenen Untergruppen einteilen. Es wird nach den Gesichtspunkten Verschleiß, Ermüdung, Korrosion und Gewalt unterteilt [5].

Bild 2: Innenring mit Bruch am Mittelbord

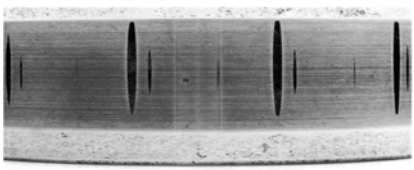


Bild 3: Schwingungskorrosion, Riffelbildung

Bei den Lagern unterscheidet man in das Hauptlager und in das Stützlager. Das Hauptlager hat die Aufgabe, die axialen und radialen Kräfte des Rotors aufzunehmen. Weiterhin muss es in der Lage sein, Wellenbiegung und hohe Belastungen bei gleichzeitigen niedrigen Drehzahlen aufzunehmen. Eine am Allianz Zentrum für Technik durchgeführte Studie kam zu dem Ergebnis, dass Rotorwellenlager Ausfallzeiten von 10.000 bis 45.000 Bh haben und damit nicht die Forderung von L_{h10} = 130.000 Bh erfüllen [4]. Eine primäre Ursache konnte im Rahmen der Studie nicht festgestellt werden, vielmehr erkannte man eine Vielzahl von Ursachen.

3 Anforderungen an Rotorlager für Windenergieanlagen

Mit immer größer werdenden Leistungsklassen bei den Windenergieanlagen steigen die Anforderungen an die Lagerung des Antriebsstranges aufgrund zweier primärer Gründe. Auf der einen Seite steht die unausweichliche Massenzunahme der Anlage. Man spricht in diesem Fall von dem Quadratisch-Kubischen-Gesetz, d.h. eine Verdoppelung des Rotordurchmessers hat eine Vervierfachung der Rotorfläche und somit eine Verachtfachung der Rotormasse zur Folge, was eine stark steigende statische Belastung mit sich bringt. Dies impliziert ein starkes Wachstum der Rotorwelle und somit des gesamten Antriebsstranges. Auf der anderen Seite steigt aufgrund der höheren Anlagen oder der besseren Standortbedingungen im Offshore-Bereich die Windbelastung. Das bedeutet, dass ein viel stärkeres Windprofil vorherrscht mit im Mittel höheren Windgeschwindigkeiten und einem stärkeren Turbulenzanteil, was höheren dynamischen Belastungen gleichkommt.

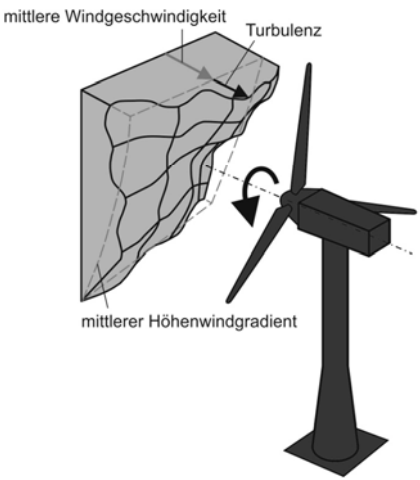


Bild 4: Windprofil einer Windenergieanlage

Weiterhin kommt es bei einer im Normalbetrieb entstehenden Schiefanströmung des Rotors zu einer wesentlicheren Überhöhung des Biegemomentes der Rotorwelle, als durch die Belastung, die durch das Rotoreigengewicht selbst hervorgerufen wird [6]. Die größte Forderung ist wohl aber die Frage nach der Zuverlässigkeit. Dabei sollte man die

Zuverlässigkeit in zwei Gesichtspunkte unterteilen. Der erste Punkt ist die Funktionssicherheit im Betrieb, d.h. die garantierte Vermeidung von Kontakt zwischen Welle und Lagerschale und somit von Verschleiß. Der zweite Punkt ist die Betriebssicherheit, welche die Sicherstellung der Einsatzbereitschaft der gesamten Anlage beinhaltet. Gerade durch den robusten Betrieb der Windenergieanlagen kommt der Zuverlässigkeit eine hohe Bedeutung zu. Besonders die Windenergieanlagen haben ein Umgebungsbedingungsspektrum, das seinesgleichen sucht - von klimatischen Extremen über stark staubige Gebiete bis hin zu den im höchsten Maße salzhaltigen Luftbedingungen im Offshore-Bereich. Für die theoretische Voruntersuchung wurden die Belastungskennwerte einer 2,5 MW Anlage zu Grunde gelegt.

Anlagenleistung:	2,5 MW
Wellendrehzahl:	0 – 25 min^{-1}
Wellendurchmesser:	850 mm
mittlere Belastung:	550 kN
maximale Belastung:	980 kN

4 Konzept eines Hybrid-Gleitlagers

Der aus den Anforderungen abgeleitete hohe dynamische Lastanteil ist es, der den Einsatz von hydrodynamischen bzw. hydrostatischen Gleitlagern präferieren würde. Anders als die weitläufige Meinung, Gleitlager reagieren empfindlich auf dynamische Lastspitzen und Verformung [7], sind sie für solche Bedingungen aufgrund ihres Dämpfungsvermögens gut geeignet. Dieses Phänomen beruht darauf, dass ein viskoser Schmierstoff nicht augenblicklich aus dem Raum zwischen zwei sich aufeinander zubewegenden Oberflächen herausgequetscht werden kann. Während des Ausquetschens werden durch die inneren Kohäsionskräfte des Schmiermittels, die der Verdrängerkraft entgegenwirken, Druckkräfte im Schmierfilm aufgebaut, die der Belastung entgegenwirken [8]. Weiterhin bedingt eine hohe Zuverlässigkeit des Lagers gute Notlaufeigenschaften. Wenn im Falle eines Black-Outs, d.h. Stromausfall der Versorgungseinheit der Windenergieanlage, die Ölversorgung der Lager ausfallen würde, müsste für einige Zeit das Lager funktionsfähig bleiben, um entweder die Anlage

kontrolliert runterzufahren oder die Zeit des Black-Outs zu überbrücken. Auf jeden Fall muss nach dem Vorfall der normale Betrieb gewährleistet sein. Große Lagertaschen, wie sie bei hydrostatischen Lagern üblich sind, führen zu kleinen Restflächen der Lagerschale, auf denen sich kein ausreichender hydrodynamischer Schmierfilm aufbauen kann, welcher zu mindestens eine Mischreibung mit nur geringem Verschleiß realisiert [9]. Der Einsatz reiner hydrodynamischer Lager wurde bei genauer Betrachtung verworfen, da im An- bzw. Abfahrbetrieb, im Trudelbetrieb und im Montagezeitraum die Drehzahlen so gering sind, dass sich kein tragfähiger Schmiermittelkeil ausbildet. Bei der Analogiebetrachtung mit den Lagerungskonzepten von Schiffspropellern stieß man auf das Verbundprojekt HYDROS, mit den daran beteiligten Partnern Blohm+Voss Industries Hamburg (BVI), ABB Marine Helsinki, Institut für Fluidtechnik (IFD) und dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) an der TU-Dresden, sowie dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD (KTC_{AD}) an der Universität Rostock. In diesem Projekt wird ein kombiniertes hydrostatisches-hydrodynamisches Lager entwickelt für den Einsatz in Schiffspropellern von Pod-Antrieben [9].

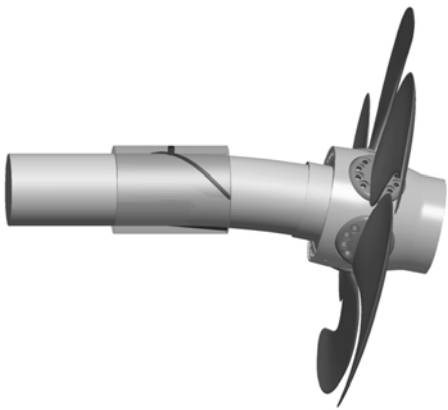


Bild 5: gekrümmte Propellerwelle

Bei genauerer Betrachtung sind viele Gemeinsamkeiten erkennbar, so liegen beiden Antrieben Strömungsmaschinen zu Grunde und fordern eine hohe Zuverlässigkeit und Langlebigkeit. Im Speziellen haben sie große Wellendurchmesser, einen hohen dynamischen Lastanteil, Wellenbiegung, einseitige Krafteinleitung und langsame bis

mittlere Drehzahlen. Diese Analogien und die vorhergehenden Betrachtungen lassen den Schluss zu, den Ansatz eines Hybrid-Gleitlagers weiterzuverfolgen.

5 Simulation zur Auslegung

5.1 Stationäre Auslegung

Die stationäre Auslegung erfolgt mittels des numerischen Programms Mathcad und hält sich streng an DIN 31652 [10]. Dabei wurde in den ersten Berechnungen lediglich die Möglichkeit der hydrodynamischen Schmierung berücksichtigt. Obwohl die Lagerbelastungen an der Rotorwelle keinesfalls stationär sind, kann diese Berechnung eine gute Entscheidungsgrundlage bilden, ob eine Lagerung mittels Gleitlagern sinnvoll ist. Zu untersuchen ist, wie hoch bei verschiedenen Parametern die minimale Schmierfilmdicke ist. Diese ist am geringsten, wenn die Lagerbelastung am höchsten ist. Daher wurde hier mit Extremlasten gerechnet, die statistisch gesehen in 50 Jahren aufgrund sehr hoher Windgeschwindigkeiten nur ein einziges Mal vorkommen. Weiterhin wird untersucht, ob bei einer Nenndrehzahl von 15 min^{-1} die nötige Schmierfilmdicke realisiert werden kann. Da der Wind nicht immer ausreichend ist, um diese Drehzahl zu erreichen, ist es wichtig, die Grenzdrehzahl zu ermitteln, ab der sich der Schmierkeil aufbaut. Eine der weiteren Untersuchungen ist der Einfluss des Lagerspiels und der relativen Lagerbreite auf die minimale Schmierspalthöhe.

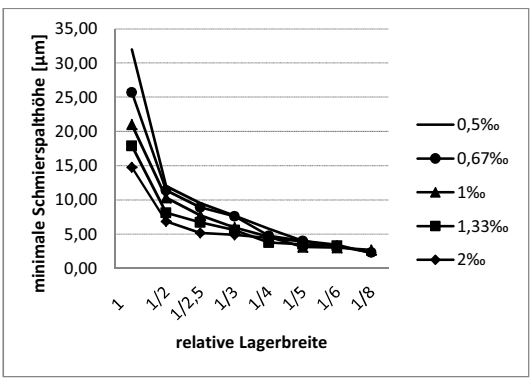


Bild 6: Variation Lagerspiel

5.2 Instationäre Auslegung

Mit dem am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD an der Universität Rostock zur Verfügung stehenden Lagerberechnungsprogramm SIRIUS-B soll die instationäre Auslegung erfolgen. Da hydrodynamische und hydrostatische Lager ihre eigenen Berechnungsgrundlagen haben, muss das Programm für eine kombinierte Berechnung mit der Grundlage eines fließenden Überganges erweitert werden [9]. Um eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu bekommen, wurden die Ergebnisse einer Mathcad - Berechnung mit einer äquivalenten Berechnung aus SIRIUS-B gegenübergestellt.

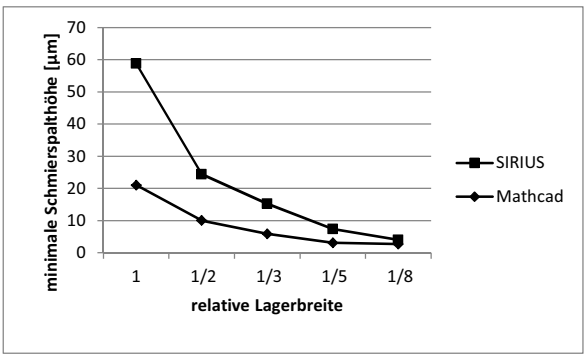


Bild 7: Vergleich Mathcad – SIRIUS

Dabei wurde bei Extrembelastung und Maximaldrehzahl die minimale Schmierspalthöhe in Abhängigkeit der relativen Lagerbreite ermittelt und verglichen. Die SIRIUS-B Ergebnisse weisen stets höhere Werte auf als die vergleichbaren Mathcad Resultate. Diese große Diskrepanz zwischen beiden Versionen lässt sich durch die unterschiedlichen Berechnungsalgorithmen erklären. In SIRIUS-B erfolgt die Lösung durch die numerische Integration der Reynold'schen-Differenzialgleichungen an den Stützstellen eines zuvor festgelegten Rasters in Umfangs- und Breitenrichtung des Lagers. In Mathcad folgt der Rechenablauf streng der DIN 31652. Dieser geht jedoch von einigen Vereinfachungen aus. Beispielsweise wird angenommen, dass der Schmierspalt zu jeder Zeit vollständig mit Schmiermittel gefüllt ist, wohingegen bei SIRIUS auch der Anteil der Gasphase berücksichtigt wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Frage nach dem aussichtsreichsten Konzept hat sich die Wahl eines Hybridlagers als weiterzuverfolgend herausgestellt, wobei noch viele offene Fragen zu berücksichtigen sind. Hier ist zum Beispiel die Realisierung der Notlaufeigenschaften einer der wichtigsten zu verwirklichenden Forderung. Ein Ansatz könnte eine kontrollierte zulässige Misch- bzw. Festkörperreibung liefern, hier für wären umfangreiche Simulationen und experimentelle Untersuchungen nötig.

Die Simulation zur Auslegung im stationären Fall ist auch noch nicht abschließend betrachtet. Hier ist der Einfluss des gesamten Parameterspektrums noch genauer zu untersuchen und auf die Variation der Parameter unter den speziellen Bedingungen in Windenergieanlagen anzupassen. Ähnlich verhält es sich bei der instationären Betrachtung. Aufgrund der kombinierten Berechnung ergibt sich eine große Vielfalt an Einflussparametern, für die eine geeignete Systematik unter den Bedingungen von Windenergieanlagen gefunden werden muss. Zu diesem Zeitpunkt kann gesagt werden, dass es prinzipiell möglich wäre, eine hydrodynamische Radialgleitlagerung mit hydrostatischer Unterstützung einzusetzen. Hierfür müssen noch umfangreichere Berechnungen mit dynamischen Belastungskennwerten durchgeführt werden. An dieser Stelle sind die Hersteller gefragt, solche dynamischen Belastungswerte zur Verfügung zu stellen, um realitätsgetreue Berechnungsmodelle entwickeln zu können.

Literatur

[1] Bundesministerium für Umweltschutz: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, 2011

[2] Statistisches Bundesamt: *Energie auf einen Blick,* 2009

[3] Gasch, Robert; Twele, Jochen: Windkraftanlagen Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 6.Aufl. Vieweg+Teubner, 2010

[4] Bauer, Erwin: Schwachstellen am Antriebsstrang von Windenergieanlagen, Tribologie+Schmierungstechnik, 50. Jahrgang. 06/2003

[5] Bartz, W.J.: Schäden an geschmierten Maschinenelementen, 3.Aufl. Expert-Verlag, 1999

[6] Sensen, Edgar: *Schäden an Windenergieanlagen aus Sicht des Versicherers*, Dresdner Maschinenelemente Kolloquium 2009, TUDpress, Dresden, 2009

[7] Hau, Erich: Windkraftanlagen Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 4.Aufl. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2008

[8] Lang, O.R.; Steinhilper, W.: *Gleitlager*, Konstruktionsbücher Band 31, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-NewYork, 1978

[9] Brökel, K.; Weber,J.; Hufenbach, W; von Bergen, E.-P.: *Hydrostatisch-hydrodynamisches Gleitlagerkonzept für die Propellerlagerung in Pod-Antrieben großer Schiffe*, VDI-Fachtagung 2011„Leistungsstarke Gleit- und Wälzlagerungen“, VDI-Verlag, Schweinfurt, 2011

[10] Norm DIN 31652 Teil 1 02.83. *Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb*

Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe Materialien – Automatisierter preform-Aufbau für Rotorblätter von Windenergieanlagen

J.-H. Ohlendorf, M. Rolbiecki, T. Schmohl, D. H. Müller, K.-D. Thoben

Universität Bremen, Institut für integrierte Produktentwicklung (BIK)
Badgasteiner Str. 1, 28359 Bremen
Email: johlendorf@uni-bremen.de; Internet: http://www.bik.uni-bremen.de

Inhalt: *In dieser Veröffentlichung wird auf der Basis der Konstruktionsmethodik die systematische Entwicklung von Handhabungsvorrichtungen für biegeschlaffe Materialien, wie technische Glas- und Kohlefasertextilien, entlang der Prozesskette zur Rotorblattherstellung vorgestellt. Dabei wird von einem Ansatz ausgegangen, die Automatisierung durch die Reduzierung der Komplexität des Ablageprozesses, bestmöglich zu nutzen. Die preforms werden dazu auf einer speziellen Vorrichtung aufgebaut und nachfolgend in die endkonturnahe Geometrie gebracht. Mit diesem Ansatz des Prozesses soll es zukünftig möglich sein, die Fertigungszeit eines Rotorblattes durch das Einbringen fertig aufgebauter preforms deutlich zu verringern und zugleich die steigenden Qualitätsanforderungen zu erfüllen.*

Abstract: *In this paper the methodical development of handling devices for limp materials (such as glass or carbon textiles) in the rotor blade production is presented. By reducing the complexity of the lay-up process the automation should be most effective. Preforms are put on a special device and formed to a near net shape geometry. Using this idea the aim is to reduce production times of rotor blades by using preforms while fulfilling increasing demands on quality.*

Stichwörter: *Produktentwicklung, biegeschlaff, Material, Automatisierung, Handhabung, Prozessgestaltung, Rotorblätter*

Keywords: *product design, limp material, automation, handling, process development, rotor blades*

1 Einleitung

Rotorblätter für Windenergieanlagen (WEA) werden aufgrund des guten Verhältnisses von Masse und Festigkeit bzw. Steifigkeit hauptsächlich aus endlosfaserverstärkten Kunststoff-Verbunden hergestellt [1]. Vor dem Hintergrund des Offshore-Einsatzes von Windenergieanlagen werden die Rotorblattlängen (vgl. dazu [2]) und Stückzahlen (vgl. dazu [3]) weiter ansteigen. Zudem bekommt die Zykluszeit sowie die Qualität bei der Fertigung eine immer stärker werdende Relevanz.

Die stark manuell geprägte Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden beinhaltet, insbesondere bei steigender Bauteilgröße, ein erhebliches Prozessrisiko.

Es liegt somit nahe, die bestehenden Automatisierungspotentiale bei der Fertigung von Rotorblättern von Windenergieanlagen zu erschließen. Die automatisierte Handhabung von forminstabilen oder biegeschlaffen Materialien, wie technischen Textilien für die Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden, stellt immer noch eine große Herausforderung für die industrielle Fertigung von Leichtbauprodukten dar [4].

Dabei müssen die biegeschlaffen Materialien automatisiert zugeführt, zugeschnitten, transportiert sowie im Formwerkzeug positioniert und fixiert werden, um eine reproduzierbar hohe Qualität zu gewährleisten. Im Rahmen des Verbundprojektes *mapretec* [5] wird am BIK ein solches System entwickelt und aufgebaut. Der aktuelle Entwicklungsstand soll in dieser Veröffentlichung vorgestellt werden.

2 Prozessgestaltung

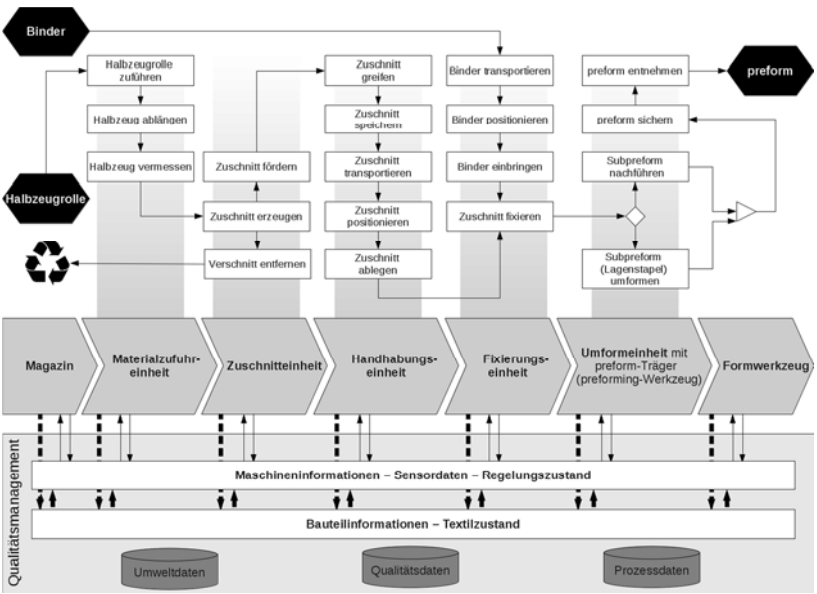


Bild 1: Prozessablauf zum Aufbau und zur Umformung (CMT) eines preforms (preforming)

Basis für die Gestaltung der Automatisierungsprozesse und damit der zu entwickelnden Handhabungsvorrichtung ist eine Geometrieanalyse des untersuchten Rotorblatttyps und der zugehörigen Zuschnitt- und Legepläne sowie eine Technologieanalyse der Handhabungstechnik für biegeschlaffe Materialien. Aufgrund der komplexen Oberflächengeometrie bilden die Krümmungen des Rotorblattes die Referenz bei der Untersuchung. Zusätzlich wurden die Eigenschaften der biegeschlaffen Materialien (Biege-, Zug-, Schub- und Reibverhalten) zum Aufbau des zugehörigen *preforms* vermessen (vgl. dazu [6]), um eine ganzheitliche Prozessgestaltung frühzeitig definieren zu können.

3 Konstruktionsmethodik

3.1 Materialzufuhr- und Zuschnitteinheit

Die wesentliche Aufgabe der Materialzufuhr- und der Zuschnitteinheit ist die Sicherstellung einer kontinuierlichen Transformation der textilen Bahnware von der Halbzeugrolle auf die Handhabungseinheit, bei gleichzeitiger definierter Konturierung einzelner Textillagen. Die Anforderungen an das zu entwickelnde System resultieren aus den Projektanforderungen, der Prozessgestaltung sowie den Anforderungen aus der vorhandenen Anlagentechnik. Hervorzuheben sind dabei die Anforderungen, die sich aus der Schnittwerkzeug-Führung durch einen Knickarmroboter ergeben.

Diese Anforderungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung der Materialzufuhreinheit und der Zuschnitteinheit. Darüber hinaus definieren sich weitere Anforderungen durch die kontinuierliche Zuführung des Schnittguts (Textilbahn) von der Halbzeugrolle. Hierbei muss sowohl eine regelungstechnische Synchronisation zwischen der Materialachse, auf der das Schnittgut in Form einer Halbzeugrolle aufgezogen ist, und der Achse der Handhabungseinheit gewährleistet sein, als auch eine Synchronisation mit der kontinuierlichen Schnittgutführung. Gleichzeitig wird die Minimierung des Teleskopierfehlers, dies ist eine translatorische Verschiebung des textilen Materials auf der Rolle, durch eine Bahnkantenregelung der Materialachse und der Achse der Handhabungseinheit gefordert. Die Anforderungen an die Zuschnittqualität haben maßgeblichen Einfluss auf die Wahl des Zuschnittwerkzeugs sowie der Schnittunterlage.

Dabei beeinflusst die Zuschnittqualität, die Prozessgestaltung sowie die vorhandene Anlagentechnik die Bewertung der Lösungskonzepte am stärksten.

Dieser besteht aus einer axial verstellbaren Materialrolle, einem Förderbandsystem, einem Roboter mit Gestell sowie dem Schnittwerkzeug.

3.2 Handhabungseinheit

Die Aufgabe der Handhabungseinheit bestehen darin, biegeschlaffe Materialien unterschiedlicher Geometrie greifen zu können, um sie zu speichern, zu transportieren und dort an vordefinierter Stelle reproduzierbar abzulegen. Dabei ist die Handhabungseinheit in den Gesamtprozess zu integrieren.

Auf dieser Grundlage kann eine morphologische Analyse durchgeführt werden. Durch unterschiedliche Kombination der Teillösungen werden so verschiedene Lösungskonzepte entwickelt, die mit Hilfe einer Bewertungsmatrix und dem Bewertungssystem der VDI 2225 [8] verglichen werden.

Als Kriterien werden sowohl technische (keine Beschädigung des Textils, Greifbarkeit unterschiedlicher Geometrien, Kompatibilität zu Materialien mit unterschiedlichen Biegesteifigkeiten, Einsetzbarkeit unterschiedlicher Greifmodule) als auch wirtschaftliche Aspekte (geringere Betriebskosten durch Einsatz von Verbundwerkstoffen, geringe Herstellungskosten etc.) herangezogen. Ein daraus entwickelter konstruktiver Entwurf ist in Bild 2 dargestellt.

3.3 Fixierungseinheit

Die Handhabung und die Ablage von trockenen Textilien in dreidimensionale Formgeometrien, die insbesondere bei Rotorblättern im Übergangsbereich zwischen dem Wurzelanschluss und dem aerodynamischen Strukturbereich vorliegen, erfordert eine definierte Fixierung der Lagen mittels Bindertechnologie. Hierfür wurde ein Haftkleber gewählt, der mittels Träger- und Deckfolie auf einer Rolle gespeichert wird. Dieser Haftkleber soll automatisiert mit einer Vorrichtung auf bereits abgelegte Textillagen gezielt aufgetragen werden.

Die Eigenschaften und Dimensionen des Haftklebers definieren die wesentlichen Anforderungen der zu entwickelnden Vorrichtung. Es muss eine Speicherung der Träger- und der Trennfolie gewährleistet sein und gleichzeitig eine definierte Andruck- sowie Zugkraft auf das Bindermaterial aufgebracht werden. Das ausgewählte Konzept sieht eine getrennte tänzergesteuerte Regelung der Trägerfolie und der Schutzfolie vor. Gleichzeitig wird die Winkelgeschwindigkeit der Andruckrolle gemessen und in den Regelungsprozess integriert.

3.4 Gemeinsame Umformung zum endkonturnahen preform

Die Funktion der Umformeinheit, das eigentliche preforming-Werkzeug der Gesamtanlage, ist es, aus den abgelegten Halbzeugstapeln (sub-preforms) einen endkonturnahen preform zu erzeugen. Dieser muss anschließend prozesssicher an das Formwerkzeug für den nachfolgenden Aufbau der Harztechnik übergeben werden. Unter der Berücksichtigung der Anforderungen wird eine allgemeine Funktion in eine spezielle Funktionsstruktur überführt, werden Teilaufgaben definiert und mit Hilfe einer morphologischen Analyse mögliche Teillösungen erarbeitet [7].

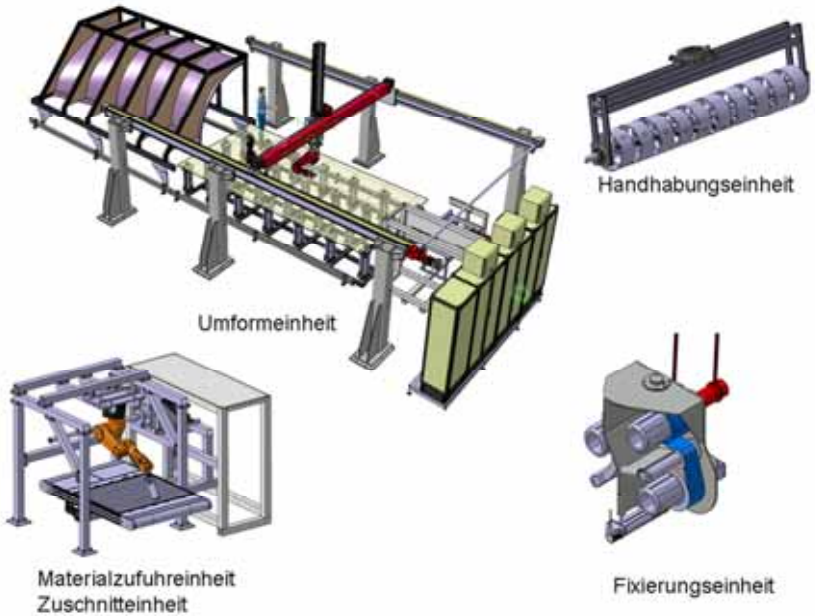


Bild 2: Überblick über den konstruktiven Entwurf des Gesamtsystems

Die relevantesten Kriterien für die Auswahl einer Kombination an Teillösungen sind das materialgerechte Handhaben der biegschlaffen Materialien, diese Falten- und Knickfrei zu drapieren sowie eine hohe Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit. Dafür wurden Versuchsreihen zur preform-Umformung mit unterschiedlichen Modellgeometrien (verschiedene Krümmungen) sowie mehrere numerische Simulationen des Umformprozesses durchgeführt [6]. Der konstruktive Entwurf der Einheit ist schematisch in

Bild 2 dargestellt. Insbesondere das prozess- und regelungstechnische Detailkonzept stellt dabei eine große Herausforderung dar.

4 Fazit

Auf der Basis der Konstruktionsmethodik nach [7] wurde ein Gesamtkonzept für die Anlage sowie für Prozessgestaltung entwickelt und in einen konstruktiven Entwurf überführt. Aktuell wird dieser als Demonstrator am Institut aufgebaut.

Literatur

[1] HAU, E.: *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. 4., vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2008

[2] SEIFERT, H.: Studie der Forschungs- und Koordinierungsstelle Windenergie (fk:wind). Bremerhaven, 2007

[3] DEUTSCHES WINDENERGIE INSTITUT (HRSG.): Windenergie in Deutschland – Aufstellungszahlen für das Jahr 2010. http://www.dewi.de (Zugriff 12.07.2011)

[4] BIERMANN, D.; HUFENBACH, W. & SELIGER, G.: Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe – Untersuchungsbericht zum Forschungs- und Handlungsbedarf, Dresden, 2008

[5] mapretec - Ein Verfahren zur preform-Herstellung durch ebene Ablage für ein räumliches Bauteil als Basis einer automatisierten Prozesskette zur Rotorblattfertigung. http://mapretec.de (Zugriff 12.07.2011)

[6] OHLENDORF, J.-H.; MÜLLER, D. H. & THOBEN, K.-D.: Entwicklung von Handhabungseinrichtungen für biegeschlaffe Materialien – Produkt- und Prozessinnovation durch den Einsatz der Finiten Elemente Methode. In Brökel, K.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Rieg, F.; Stelzer, R.: *8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2010)*. Magdeburg, 2010, S. 237-242

[7] VDI 2225, Richtlinie: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, Beuth Verlag, Berlin, 1998

Entwickeln des Lasten- und Pflichtenheftes einer Windkraftanlage

Dr.-Ing. Jan Brökel

Suzlon Energy GmbH
Kurt Dunkelmann Str. 5
18057 Rostock
Email: jan.broekel@suzlon.com, www.suzlon.com

Inhalt: *Der Entwicklungsprozess beginnt mit dem Stellen der Aufgabe und mit dem Ausformulieren und Detaillieren der Anforderungen an ein neues Produkt. Am Beispiel von Windkraftanlagen werden eine Wettbewerberanalyse und das Aufstellen einer VoC Liste durchgeführt. Im nächsten Schritt werden Produktvarianten abgeleitet und in Bezug auf die Zielanforderungen mit Hilfe der Pugh Methode bewertet.*

Abstract: *At the start of every product development the business requirements have to be known. If they are not complete it is difficult to develop product requirements that all stakeholder agree on. Taking wind turbine generators as an example a competitor study has been carried out and a VoC list was derived. Based on this product variants have been defined and were validated using a Pugh matrix in regards to the target requirements.*

Stichwörter: *Windkraftanlage, Lastenheft, Pflichtenheft, Variantenbewertung*

Keywords: *Wind turbine generator, requirements management, business requirements, product requirements*

1 Management trifft Produktentwicklung

Eine der größten Herausforderungen für den Produktentwickler ist die Vorhersage zukünftiger Marktentwicklungen, sowohl aus technischer als auch aus marktdynamischer Sicht. In den meisten international tätigen Unternehmen gibt es spezielle Abteilungen, welche als Programmmanagement die Produktstrategie bzw. die Unternehmensziele definiert. Dem technischen Produktentwickler wird somit der Auftrag einer Produktneuentwicklung in Form eines BRD (business requirement document – im Deutschen vergleichbar mit dem Lastenheft) erteilt. Das BRD stellt die Ziele (business requirements bzw. Lasten) des Kunden (Programmmanagement) eindeutig dar.

Oft wird der Produktmanager oder das Entwicklerteam aber mit dehnbaren und weich formulierten Anforderungen konfrontiert. Das heißt für den technischen Produktentwickler, dass er selber die requirements (Lasten) der verschiedenen stakeholder

(Interessenparteien) einsammelt und sich daraus die detaillierte Aufgabenstellung definiert.
Nun könnten eben diese Ungenauigkeiten des Lastenheftes als Chance auf große Entwicklungsfreiheiten gesehen werden, realistischer ist aber, dass dem Produktentwickler neben der technischen Verantwortung nun auch die Verantwortung des Markterfolges des zukünftigen Produktes auferlegt wird. Besonders kritisch ist dieses Schieben von Verantwortung, wenn sich Anforderungen verschiedener Parteien widersprechen oder ausschließen. Beispiele aus der Windkraft wären „Wir wollen einen großen Rotordurchmesser, aber kleine Logistikkosten“ oder „Wir wollen große Wartungsintervalle, aber ein Condition Monitoring System ist zu teuer“.
Weitere Schwierigkeiten ergeben sich, wenn die Anforderungen eher Wünsche sind, wie zum Beispiel „das Getriebe soll nicht versagen“. Auch der Spielraum der Forderungen macht ein Abwägen der Umsetzbarkeit schwierig. So können Anforderungen von „der Windfahnenhalter sollte eine Ausrichtmarkierung haben“ bis „es soll einen dreiteiligen Turm geben“ reichen.
Letztendlich kann nur ein funktional übergreifend aufgestelltes Entwicklerteam oder eine entsprechende Produktmanagement Abteilung ein Lastenheft erstellen, welches auch von allen internen und externen stakeholdern abgenommen wird.

2 Wege zum Lastenheft

Ist das Lastenheft unvollständig, wird für den technischen Produktentwickler der allgemeine Problemlösungsprozess um die Definition der Aufgabe erweitert. Somit muss sich der Gefragte nicht nur mit der Antwort, sondern auch mit der Ausformulierung der Frage „Was soll entwickelt werden?“ beschäftigen. Dazu hilft es, sowohl das externe als auch das interne Produktumfeld zu analysieren.

2.1 Wettbewerberanalyse

Das externe Produktumfeld wird durch die möglichen Kunden und eventuelle Mitwettbewerber bestimmt. Im Bereich der Windenergieanlagen gibt es eine Vielzahl von internationalen Herstellern mit Modellen für fast jeden Kunden und Markt. Eine Windkraftanlage lässt sich durch den Rotordurchmesser, stellvertretend für die aufnehmbare Energie des Windes, und durch die abgegebene elektrische Nennleistung beschreiben. Das Verhältnis dieser beiden Haupteigenschaften ergibt die Leistungsdichte

und eignet sich um verschiedene Windkraftanlagenmodelle miteinander zu vergleichen. Gleichzeitig muss die Leistungsdichte der WKA zu der Windleistung des geplanten WKA Standortes passen. Je höher die mittlere Windgeschwindigkeit, desto höher die Windleistung des Standortes (kategorisiert durch die Windklasse) und desto höher die Leistungsdichte der WKA. In Bild 1 sind die Leistungsdichten repräsentativer WKA Modelle verschiedener Hersteller dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen den Starkwind (Windklasse 1) Anlagen 6M und E126 nahe der 500 W/m² Linie und den Leichtwindanlagen (Windklasse 3) V100 und S97 mit einer Leistungsdichte kleiner als 300 W/m².

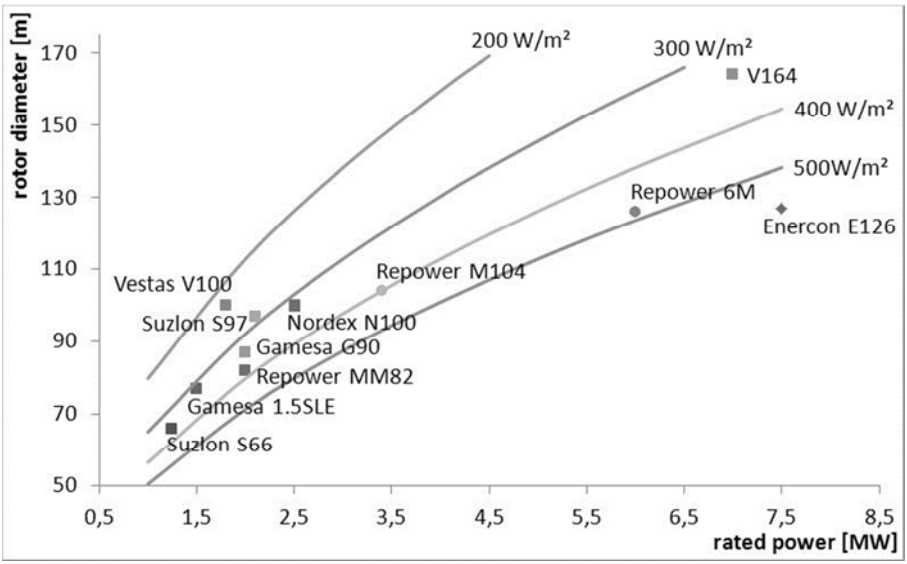


Bild 1: Wettbewerberanalyse von WKA bezogen auf die „Leistungsdichte“ [Quelle: Herstellerangaben]

Bei der Auslegung der Neuentwicklung können also nach Festlegen des Marktes (Standortes) von der Leistungsdichte mögliche Leistung-Rotordurchmesser-Verhältnisse abgeleitet werden. Weitere Orientierung bieten die Mitwettbewerber in diesem Marktsegment.

Externe Kunden geben üblicherweise ihre Anforderungen an ein neues Produkt klar in Ausschreibungen an. Hier muss der Hersteller dann mit der entsprechenden Ausrichtung des Produktportfolios reagieren.

2.2 Kundenanalyse

Das interne Produktumfeld wird durch die firmeninternen „Kunden“ bestimmt. Dazu zählen die Unternehmenskernbereiche Entwicklung, Fertigung und Einkauf, aber auch Service und Wartung, Vertrieb und Finanzen. Im Rahmen der Entwicklung werden Probleme, Erfahrungen oder Kommentare zu bestehenden und zukünftigen Produkten in der „voice of customer“ (VoC) Liste eingesammelt. Tabelle 1 zeigt einen Auszug aus einer VoC Liste mit der Mindestzahl der nötigen Spalten. Für das Projekt Management ist die Zuordnung eines eindeutigen Owners (Verantwortlichen) zu jeder Anforderung entscheidend, um deren Umsetzung zu gewährleisten.

Tabelle 1: Beispiel einer Voice of Customer (VoC) Tabelle

#	What's	Problem Statement	Benefit	User Priority	Product Priority	Source	Owner for Action
1	Service lift option	slow and unsafe maintenance	Productivity and safety	high	High	OMS	Tower dept.
2	Modular design of electrical components	expensive replacement of complete components	Reliability	high	Low	OMS	Electrical dept.
3	Better water/rain protection of hub & nacelle	Water leakage in nacelle and nose cone	Reliability	medium	High	Customer	Design dept.

Basierend auf der VoC Liste werden die Probleme mit dem größten Nutzen und den höchsten Anwender- und Produktprioritäten als Produktanforderungen definiert und im PRD (Pflichtenheft) festgehalten. Im V&V Modell (Verifizierung und Validierung) werden diese Anforderungen verfolgt und die Umsetzung der Anforderungen im Produkt überprüft (requirement management).

3 Wege zum Pflichtenheft

Sind die Ziele der Produktentwicklung definiert, werden im nächsten Schritt die Managementanforderungen mit technischen Lösungen beantwortet. Die Lösungsfindung darf sich nicht nur an schon gefassten Ideen orientieren. Besonders schwer ist dies, wenn statt Anforderungen schon Lösungen vom Management oder den Kunden genannt werden.

3.1 Generierung von Produktvarianten

Oft gibt es für die verschiedenen Anforderungen mehrere Lösungsansätze. Diese systematisch zu erfassen und verschiedene Produktvarianten zu generieren, kann mit Hilfe eines morphologischen Kastens erfolgen. In Tabelle 2 sind für die Schlüsselkomponenten einer WKA je zwei bis vier technische Lösungen zusammen gestellt. Da in diesem Fall die WKA als prinzipielles System an eine bestehende Suzlon Anlage angelehnt ist, sind hier keine Anforderungen sondern schon Teilsysteme gelistet, für die es aber bis zu vier Umsetzungsmöglichkeiten gibt.

Tabelle 2: Variantengenerator – Morphologischer Kasten

Komponente	1	2	3	4	5	6
Option	Blatt	Nabe	Pitch System (PS)	Getriebe	Generator	Turm
1	AE40 V3A	Nabe V3	Standard PS	Standard	Flexi Slip	90 m
2	AE40 V4A	Nabe V4	Verbessertes PS	Standard mit neuer Übersetzung	DFIG	80 m
3	SB42		New PS	neues Getriebe	Vollumrichter	
4	SB43					
Variante 1	1;1	2;1	3;1	4;1	5;2	6;2
Variante 2	1;4	2;2	3;3	4;3	5;3	6;1
Variante 3	1;3	2;1	3;2	4;2	5;2	6;1

Aus der Komponenten-Optionen Matrix wurden drei Varianten abgeleitet. Dabei stellt Variante 1 die low-tech Variante dar. Hier werden so wenig Änderungen wie möglich in das Ausgangsprodukt eingearbeitet. Variante 2 dagegen setzt die alle technischen Möglichkeiten um. Variante 3 stellt einen Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen dar.
Das Ableiten der Varianten muss auch im interdisziplinärem Rahmen erfolgen, da ein ganzheitlicher Blick auf das Gesamtsystem WKA notwendig ist.

3.2 Bewerten der Varianten

Zur Bewertung der generierten Varianten bietet sich die Pugh Methode an. Hierbei werden die Lösungsvarianten relativ objektiv mit den Zielanforderungen verglichen und mit einem Punktesystem (3, 6 oder 9 Punkte, wobei 9 für volle Übereinstimmung steht) bewertet. Dabei werden die Varianten nicht nur aus technischer, sondern auch aus betriebswirtschaftlicher (Kosten) und Projektsicht (Zeit) bewertet. In Tabelle 3 sind neben

den drei Varianten in der zweiten Spalte das Ausgangsprodukt und in der dritten Spalte das Management Ziel gelistet. Je nach Übereinstimmung mit den Anforderungen, werdend die einzelnen Lösungen bewertet.

Tabelle 3: Pugh Matrix – technische Details

Criteria/Concept	S82 V3 STV	Target	Variant 1	Variant 2	Variant 3
Technical Feasibility					
Generator Concept	SFS	DFIG	SFS	Full converter	DFIG
Wind Class	III A	III	III A	III A	III B
Max. Altitude	1000m	>1000m	1500m	1500m	1500m
Tower Height	80 m	>80m	80m	90m	90m
Rated Power	1.5 MW	1.3 - 1.5 MW	1.5 MW	1.5 MW	1.5 MW
Rotor Diameter	82 m	> 82m	82 m	88m	86m
Gear box ratio	1:95	n.a.	1:95	>1:95	>1:95
Blade	AE40 V3A	n.a.	AE40 V3A	SB43	SB42
Grid Compatibility	india standard	IGEC	IGEC	IGEC	IGEC
Energy / Swept Area	284	250-270	284	247	258
Certification	GL2003/04	GL2010	GL2010	GL2010	GL2010
Commercial Feasibility					
Price / kwh					
Price / MW					
Energy Yield [MWh]					
Time Requirement development time	n.a.	15 month	12 month	18 month	15 month

Zusätzlich kann, wie in Tabelle 4 geschehen, ein Rating verwendet werden, um eine Gewichtung der Anforderungen untereinander zu gewährleisten.

Tabelle 4: Pugh Matrix – Bewertung der Varianten

Criteria/Concept	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Rating
Technical Feasibility				
Generator Concept	3	6	9	
Wind Class	9	9	9	
Max. Altitude	6	6	6	
Tower Height	6	9	9	
Rated Power	9	9	9	
Rotor Diameter	3	9	6	
Gear box ratio	9	6	6	
Blade	3	9	6	
Grid Compatibility	9	9	9	

Energy / Swept Area	3	6	9	2
Certification	9	9	9	
Commercial Feasibility				
Price / kwh				
Price / MW				
Energy Yield [MWh]				
Time Requirement				
development time	9	6	9	2
Total	78	105	114	

So wurden die technische Hauptanforderung (eine Leistungsdichte zwischen 250 – 270 W/m²) und die Projektanforderung einer Entwicklungszeit bis 15 Monate mit dem Faktor 2 multipliziert. Die betriebswirtschaftlichen Anforderungen können hier nicht genannt werden, aber auch diese hätten einen Korrekturfaktor von mindestens 2.

Die Bewertung der Varianten ergibt sich aus der Summe der Anforderungsbewertungen, wobei in diesem Fall Variante 3 mit der höchsten Gesamtpunktzahl von 114 die beste Übereinstimmung mit den Zielanforderungen aufweist.

Natürlich muss dieses Ergebnis durch die wichtigsten Kunden (key stakeholder) bestätigt werden, um als Entwicklungsauftrag zu gelten.

Überlegungen zur Formgebung und Stabilität schwimmender Plattformen für Windenergiewandler

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen *,,**
Dipl.-Ing. Christian Semlow*, Dipl.-Ing. Thomas Miethe**

*Universität Rostock, Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik,
Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock
Internet: *http://www.lmt.uni-rostock.de*
**MariKom gGmbH, Friedrich-Barnewitz-Straße 3, 18119 Rostock
Internet: htttp://www.marikom-germany.de
Email: mathias.paschen@uni-rostock.de

Inhalt: *Die Autoren stellen erste Überlegungen über die Formgebung einer schwimmender Plattformen für Windenergiewandler an, die anders als bei bekannten Prototypen eine Kombination aus Gewichts- und Formstabilität privilegieren. Ansätze zur Berechnung der hydrodynamischen und aerodynamischen werden aufgezeigt. Ein Ergebnis erster Betrachtungen wird vorgestellt.*

Abstract: *The authors present first ideas regarding the design of floating platforms for wind energy converters at sea. In contrast to already known prototypes a combination of hydrostatical stability and stability by weights has been favoured. Advices for the calculation of both hydrodynamic and aerodynamic loads are given. A result of first investigations is presented.*

Stichwörter: *Schwimmende Windenergiewandler; Schwimmfähigkeit; Formstabilität und Gewichtsstabilität; hydrodynamische Kräfte und Momente; Wellen; Fluid-Struktur-Wechselwirkungen*

Keywords: *Floating wind energy converter; floatability; hydrostatical stability and stability by weights; hydrodynamic loads and moments; waves; fluid-structure interaction*

1 Einleitung, Stand der Technik

Segelschiffe kreuzen seit Jahrtausenden die Weltmeere. Somit liegen reiche Erfahrungen bei der Nutzung der Windenergie als Antriebskonzept auf See vor. Anders sieht es bei der Wandlung der so genannten Offshore-Windenergie in elektrische Energie aus. Das Potential wird weltweit als hoch eingeschätzt; es setzt jedoch die Verfügbarkeit leistungsfähiger schwimmender Anlagen voraus, die unabhängig von der Wassertiefe sicher und zuverlässig arbeiten. Die Herausforderung liegt in der technischen Beherrschung der marinen Umweltbelastungen; sie sind wesentlich höher als an Land. Die gesellschaftliche Akzeptanz und das kommerzielle Interesse der Offshore

Windenergienutzung sind unstrittig. Die stärkeren und gleichmäßigeren Winde auf dem Meer liefern ein höheres Energiepotential als an Land. Zudem werden in verschiedenen Regionen der Erde geeignete terrestrische Flächen für die Aufstellung und den Betrieb von Windparks knapp.

Bei den bereits im Betrieb, im Bau bzw. in der Planung befindlichen Offshore-Windfarmen handelt es sich ausnahmslos um gegründete Küstenbauwerke im Flachwasserbereich. Die 50-Meter-Tiefenwasserlinie wird kaum überschritten. Ob in der Zukunft gegründete Windenergiewandler in noch größere Wassertiefen verbracht werden, wird durch die Beherrschung der damit verbundenen technischen Herausforderungen und der daraus resultierenden Kostenentwicklungen entschieden.

Eine Alternative können schwimmende Windenergiewandler bieten. Sie können beispielsweise in größerer Entfernung und im Tiefwasser vor den Küsten verankert werden, ohne die Schifffahrt, die Fischerei oder Umweltschutzbelange zu beeinträchtigen. Ihre Installation und Verankerung sowie ihr Betrieb führen erfahrungsgemäß zu deutlich geringeren Belastungen der Umwelt als gegründete Anlagen mit vergleichbarer Leistung. Auch kann der Transit schwimmender Anlagen gegenüber dem von gegründeten Strukturen Vorteile aufweisen.

Bisher bekannt gewordene Konzepte für schwimmende Offshore-Windenergiewandler favorisieren die Nutzung von Horizontalachsrotoren. Als Plattformen werden Stahlbaukonstruktionen vorgesehen. Unterscheidungen gibt es bei der Anzahl der installierten Turbinen je schwimmender Struktur sowie bei der Verankerung. Gegenwärtig sind zwei Prototypen bekannt, die „Hywind“-Anlage [3] der Firmen StatoilHydro und Siemens und die „Blue H“ [4], ein niederländisch-britisches Gemeinschaftsprodukt. Während die „Hywind“-Anlage als gewichtsstabilisierte „Single-Spire“-Konstruktion ausgeführt wurde handelt es sich bei der „Blue H“ um eine mittels Zuganker gefesselte und stabilisierte technische Lösung. Neben diesen Prototypen sind auch so genannte „Halbtaucher“-Konzepte in der öffentlichen Diskussion. Mehrfachanlagen existieren noch nicht. Insgesamt ist nach den bisherigen Recherchen festzustellen, dass derzeitig auffallend wenige Publikationen zu schwimmenden Windenergiewandlern vorliegen, obwohl selbst international agierende Unternehmen wie die „Mercedes-Benz technology“ über die mögliche Entwicklung von Offshore-Produktionsanlagen für den Automobilbau im Rahmen eines so genannten „Bluefield Plug & Produce“ - Konzept nachdenken [5].

Die Ursache hierfür kann in der Kompliziertheit und Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den Fluideigenschaften (Wind, Welle und Strömung) und den Anlagenkomponenten bzw. der Gesamtanlage liegen, die technisch zum Teil noch nicht ausreichend sicher beherrscht werden. Sie sind für ein sicheres Betreiben schwimmender Windenergiewandler aber von grundlegender Bedeutung. Von Relevanz ist insbesondere, dass Windenergiewandler auf dem Meer deutlich höheren Belastungen unterworfen sind als an Land. Das betrifft sowohl die Durchschnitts- als auch die Spitzenbelastungen. Hinzu kommt, dass die zahlreichen Erfahrungen aus der Offshore-Öl- und -Gastechnik allein wegen des notwendigerweise deutlich geringeren Investitionsvolumens je Windenergieanlage nur eingeschränkt nutzbar sind. Die vergleichsweise hohen Amortisationszeiträume bei Offshore-Windenergiewandlern erfordern zum Teil bedeutend kostengünstigere technische Lösungen als in der Offshore-Öl- und Gasindustrie bei gleichen oder in Teilen ähnlich hohen Sicherheitsstandards.

2 Lösungsansatz

Im Rahmen einer Studie werden am Lehrstuhl Meerestechnik der Universität Rostock in Zusammenarbeit mit der *CLEMENT YACHT HARBOUR SYSTEMS* GmbH, dem Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik sowie der Marikom GmbH Möglichkeiten des Einsatzes schwimmender Betonstrukturen als Trägersysteme für Offshore-Windenergiewandler untersucht. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf eine Analyse deren Schwimmfähigkeit und Stabilität.

In Unterscheidung zu den oben aufgeführten, bisher bekannten Anlagenvarianten wird in diesem Zusammenhang eine schwimmende Plattform zum Ansatz gebracht, die sich durch eine kombinierte Gewichts- und Formstabilität auszeichnet. (Bild 1). Der Nachweis einer ausreichenden Schwimmfähigkeit und Stabilität einer schwimmenden Windenergieanlage erfordert bei bekannter Masseverteilung der Anlage zum Teil aufwändige numerische und experimentelle Analysen zur Hydrostatik sowie zur Aero- und Hydrodynamik des Gesamtsystems insbesondere unter Beachtung der jeweiligen Fluid-Struktur-Wechselwirkungen infolge stationärer, harmonischer und / oder transienter Wellen- und Strömungslasten sowie Windlasten auf die benetzten Unterwasser- bzw. Überwasserstrukturen der Plattform.

Bild 1: Ausführungskonzept für die schwimmende Windenergieanlage

Im Fokus steht die zuverlässige Voraussage der relevanten Strömungsbelastungen und der Rückstellkräfte des Verankerungssystems. Sie ermöglichen die Beschreibung der Übertragungsfunktionen für die Translations- und Rotationsbewegungen des Gesamtsystems als Starrkörper im Frequenzbereich unter Beachtung der Resonanz- und Auslöschfrequenzen des Systems. Daran schließt sich der Konstruktionsprozess an.

2.1 Bemessung der Umweltparameter Wind, Wellen und Strömung

Der Zusammenhang zwischen der Beaufortskala für die Windstärke und dem dabei auftretenden Seegang durch die Skala nach Petersen ist aus der Literatur bekannt. Dennoch kann es erhebliche Abweichungen in der Praxis geben. So mahnt die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) beispielsweise an, nie einen Rückschluss vom Seegang auf die Windverhältnisse zu ziehen [1]. Währenddessen können auf Binnengewässern oder in Küstennähe die Wellenhöhen zudem durch einen Wind vom Meer her kleiner ausfallen, die Wellen selbst sind dafür jedoch steiler. Aus diesen Gründen sind in-situ-Messungen von relevanten Umweltfaktoren stets einzufordern. Für quasistationäre Betrachtungen im Rahmen eines ersten Arbeitsentwurfs erfüllen die beiden Skalen jedoch ihren Zweck ausreichend. Sie sind beispielsweise in [1] und [2] publiziert.

Weitergehende Berechnungen müssen auf jeden Fall die Transienz der Wellen und des Windes mit berücksichtigen. So weisen statistische Langzeitmessungen (50-Jahres-

Werte) an der deutschen Nordseeküste Spitzenwerte von 38 [ms^{-1}] bzw. 52 [ms^{-1}] als 10 Minuten-Mittelwind bzw. als 2-Sekunden-Maximalböen aus [6]. Extremwerte der Oberflächengeschwindigkeit an der deutschen Nordseeküste liegen bei 1,60 [ms^{-1}] [7]. Das entspricht einer Schiffsgeschwindigkeit von 3,2 nautischen Meilen pro Stunde.
Von größter Bedeutung für die Dimensionierung schwimmender Strukturen sind allerdings möglichst genaue Kenntnisse über den Seegang. Basis seiner Beschreibung ist das so genannte Superpositionsmodell, das seit langem in seinem grundlegenden Konzept bekannt ist, siehe [8]. Hierbei werden N stochastisch unabhängige Elementarwellen gleicher Ausbreitungsrichtung betrachtet. Dabei setzt man voraus, dass jede dieser Elementarwellen nur die Bedingungen der linearen Wellentheorie erfüllen muss. Weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Elementarwelle ihrer Wellenfrequenz indirekt proportional ist, breiten sich Elementarwellen größerer Wellenlänge wesentlich rascher als solche mit kleiner Wellenlänge. Die Gesamtenergie einer Elementarwelle je Meter Breite ist dem Produkt aus Wellenlänge und dem Quadrat der Wellenhöhe proportional.

2.2 Designentwurf

In der hier vorgestellten Konstruktionsvariante wird der Schwimmkörper als rotationssymmetrischer Körper ausgelegt. Er setzt sich dabei aus einem die Wasseroberfläche durchstoßenden Ponton und einem „Unterwasser-Turm“ mit abschließendem Ballasttrog zusammen (Bild 2). Bei dem Ponton handelt es sich um einen massebehafteten Hohlzylinder. Der Durchmesser und der Tiefgang des Pontons stellen die signifikanten skalierbaren Variablen zur Anpassung an die unterschiedlichen Typen und Abmessungen der am Markt angebotenen Windenergieanlagen dar. Darüber hinaus gibt es jedoch mehrere Parameter, die auf die Gestaltung des Schwimmkörpers von Bedeutung sind. Hierbei ist insbesondere der Freibord als der Abstand von der Ruhewasserlinie zur Oberkante des Schwimmkörpers zu nennen. Durch ihn wird eine so genannte Auftriebsreserve für das Gesamtsystem gebildet. Für die Auslegungsberechnungen wird angenommen, dass sich der Massenschwerpunkt auf der Symmetrieachse des Schwimmkörpers befindet. Der konische Unterwasser-Turm ist auftriebsneutral, das heißt, dessen mittleren Dichte entspricht jene des umgebenden Wassers. Der untere Teil, im folgenden Trog genannt, wird mit Ballast aufgefüllt. Dieser besitzt eine Tropfenform. Der Ballasttrog besteht aus einem Kegelstumpf, einer Halbkugel sowie einem Übergangsbereich. Der Radius der Halbkugel, das Ballastmaterial im Trog

sowie der Abstand des Trog-Massenmittelpunktes zur Wasserlinie leisten den wesentlichen Anteil zur so genannten Gewichtsstabilität des Gesamtsystems. Der Pontondurchmesser sowie die Freibordhöhe beeinflussen dessen so genannte Formstabilität.

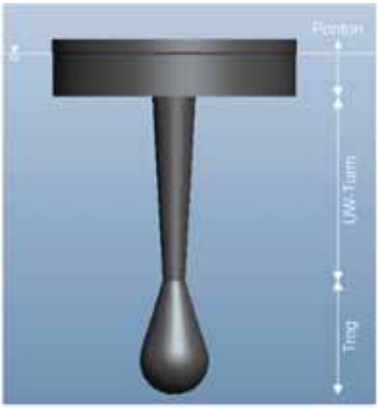


Bild 2: Unterwasserstruktur der schwimmenden Plattform

2.3 Hydrodynamische Kräfte und Momente

Die möglichst genaue Kenntnis der zumeist transienten Belastungen stellt die Grundlage sowohl für das Design als auch für die spätere die Dimensionierung der Plattform.

Im Abschnitt 2.1 wurde bereits darauf verwiesen, dass eine genaue Voraussage der Wellenlasten sowohl aufwändige numerische als auch modellexperimentelle Untersuchungen notwendig machen kann. Um den numerischen Aufwand in überschaubaren Grenzen zu halten ist es zweckmäßig, zu Beginn das Verhältnis zwischen der möglichen horizontalen Ausdehnung des Pontons und den hauptsächlichen Wellenlängen des zu erwartenden Seegangs etwas genauer zu analysieren. Ist das Verhältnis von Pontondurchmesser zur signifikanten Wellenlänge kleiner als 0,2, so darf man diesen Schwimmkörper als „hydrodynamisch transparente“ Struktur betrachten. Das heißt, in diesem Fall darf man die Störungen des natürlichen Wellenbilds infolge der Eigenbewegungen der Plattform vernachlässigen. Für die wirkenden beschleunigungsproportionalen Druckkräfte (➔Froude-Krylov-Kraft und hydrodynamische Massenkraft) und geschwindigkeitsabhängigen Zähigkeitskräfte (➔hydrodynamische

Widerstandskraft) dürfen weitere, die Berechnung vereinfachende Annahmen getroffen werden.
Erreicht das Verhältnis von Pontondurchmesser zur signifikanten Wellenlänge den Wert 0,2 oder ist er sogar größer, so gilt der Schwimmkörper als „hydrodynamisch kompakt“. Zwar dürfen die Kräfte infolge Zähigkeit und Wirbelbildung der Flüssigkeit vernachlässigt werden. Doch müssen jetzt sowohl das von der Plattform induzierte Eigenwellenbild als auch die von der Struktur herrührenden Effekte infolge Reflexion und Diffraktion mit berücksichtigt werden. Die Vernachlässigbarkeit der Zähigkeitskräfte erlaubt in diesem Fall einen potentialtheoretischen Ansatz zur Ermittlung der hydrodynamischen Belastungen, siehe z.B. [9].

2.4 Schwingungen

Schwimmende Windenergiewandler sind gegenüber Landanlagen noch stärker schwingungsbelastet. Beide Systeme werden durch Schwingungen im mittleren Frequenzbereich auf Grund der Flügelrotation, durch stochastisch angeregte Schwingungen der Flügelblätter durch Windböen sowie durch höherfrequente Schwingungen maschinenbaulicher Systeme dynamisch belastet. Schwimmende Anlagen können darüber hinaus noch durch den Seegang, durch Seeschlag sowie durch die Verankerungssysteme zum Schwingen angeregt werden. Grundsätzlich ist es möglich, die Hauptparameter der speziellen Plattform so an den vorherrschenden örtlichen Seegang anzupassen, dass beispielsweise Translations- oder Rotationsbewegungen minimiert werden können. Das hat im Regelfall zur Konsequenz, dass die Plattformstruktur über die gesamte Nutzungsdauer deutlich höheren Strukturbeanspruchungen ausgesetzt ist.

2.5 Erstes Ergebnis

Im Folgenden sei nur ein Beispiel für eine 2 MW-Anlage exemplarisch für einen ausgewählten Standort mit 60 Meter Wassertiefe dargestellt. Dabei werden eine Windgeschwindigkeit von 33 [m/s], eine signifikante Wellenhöhe von 4,9 [m] sowie eine signifikante Wellenlänge von 45 [m] zugrunde gelegt. Die nebenstehenden Abbildungen stellen das Ergebnis einer Analyse für eine 2 MW-Anlage dar.
Der Schwimmkörper hat einen Durchmesser von ca. 40 [m] bei einer Trogtiefe von ca. 45 [m]. Auf die Plattform entfallen ca. 90 % der Masseanteile.

Bild 3 verdeutlicht, dass im vorliegenden Fall das resultierende hydrodynamische Moment aus der Froude-Krylov-Kraft und der hydrodynamischen Massenkraft M_{FK} bzw. M_{Fh} etwa 15-mal größer ist als das Moment infolge aerodynamischer Belastung.

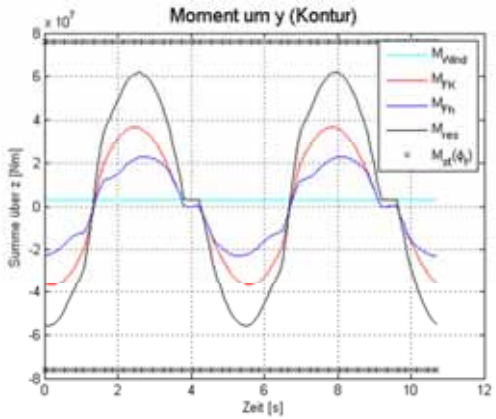


Bild 3: Momente für eine 2 MW-Anlage

Das von der schwimmenden Struktur aufgebrachte stabilisierende Moment M_{st} in Höhe von mehr als 75.000 [kNm] wird durch die Kombination aus Gewichts- und Formstabilität erreicht. Damit ist grundsätzlich der Beweis erbracht, dass neben den beiden eingangs skizzierten Pilotprojekten das hier vorgestellte Konzept weiter verfolgt werden kann.

Quellen

[1] World Meteorological Organization: „Technical Regulations – Manual on Codes (Publication No.306), Volume I.1 Part A, Section E“, 2010

[2] http://www.ostsee.de/wassersport/wind-und-wellen.html

[3] http://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2009/renewable_energy/ere200906064.htm

[4] http://www.bluehgroup.com/

[5] Sredic, V. (2011): Ganzheitliche Wertschöpfung und unbegrenzte Wandlungsfähigkeit durch „Bluefield Plug & Produce“. Werkstattstechnik online Jahrgang 101 (2011) H. 4

[6] Wagner P. (1990): Meerestechnik. Verlag Ernst & Sohn, Berlin

[7] The North Sea Environmental Guide. Oilfield Publications Ltd., Ledbury, 1984

[8] Pierson, W.J.; Neumann, G.; James, R.W. (1955): Practical methods for observing and forecasting ocean waves. U.S. Navy Hydrographic Office Publ. No. 603, S. 212 - 232

[9] Faltinsen, O.A.(1990): Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press.

Durchgängige IT-Unterstützung der Lebenszyklusphasen von Offshore-Windkraftanlagen

Ute Dietrich, Marc Glauche

Siemens Industry Software GmbH & Co. KG
Siemens Industry Sektor
Nonnendammallee – D-13629 Berlin
Email: ute.dietrich@siemens.com; Internet: http://www.siemens.com/plm
Email: marc.glauche@siemens.com; Internet: http://www.siemens.com/plm

Inhalt: *Die steigenden Umweltbelastungen und die zunehmend zu beobachtenden Klimaveränderungen, die in hohem Maße durch Prozesse zur Energieumwandlung hervorgerufen werden, erfordern eine Reduzierung umweltschädigender Emissionen. Vor allem der Energieerzeugung mit Offshore-Windkraftanlagen kommt hier große Bedeutung zu. Offshore sind gegenüber Onshore-Standorten enorme Windressourcen vorhanden, die sowohl ein großes Raumangebot als auch hohe Windgeschwindigkeiten miteinander verbinden. Durch die Bedingungen auf See werden allerdings Anforderungen gestellt, die in dieser Art nicht für Anlagen an Land existieren. Eine erfolgreiche Durchführung dieser Projekte stellt, neben den umfangreichen Anforderungen an alle Beteiligten in Bezug auf Planungen für Beschaffungen, Installation, Inbetriebnahme und Betrieb, auch hohe Erwartungen an eine durchgängige IT-Unterstützung. Innerhalb des vorliegenden Beitrags soll ein entsprechendes Konzept vorgestellt werden, welches diese Erwartungen über alle Lebensphasen eines Offshore-Windparks ermöglicht. Durch eine phasenübergreifende Betrachtung soll eine integrierte Bereitstellung aller relevanten Informationen für die Folgephasen, aber auch ein entsprechendes Frontloading von Wissen aus den Betriebs- und Rückbau-Phasen zurück in die Planungsphasen erleichtert werden.*

Abstract: *The increased ecological damage and climate changes, produced by processes of energy conversions, require a reduction of harming emissions. The generation of renewable energy by using offshore wind powers one of the future key concepts. Offshore huge wind resources and wind speeds are available. Conditions on the Sea necessitate the consideration of new requirements, not know in the onshore wind power technologies before. The successful realization requires a high potential, general IT support during complete life cycle of offshore wind parks. All relevant information has to be available for all phases. Within this article a concept for an integrated life cycle management will be introduced. The concept focused on frontloading of information from subsequent phases into earlier phases of lifecycle to participate on the experiences for better future project planning.*

Stichwörter: *Informationstechnische Aspekte der Produktentwicklung, Windkraftanlagen.*

Keywords: *aspects of information technologies in product development, wind energy.*

1 Ausgangssituation

Ausgelöst durch die tsunamibedingten Havarien im japanischen Kernkraftwerk Fukushima und die damit verbundenen enormen ökonomischen und ökologischen Schäden, zeichnet sich eine Wende in der deutschen Energiepolitik weg vom Atomstrom hin zum Ökostrom ab. Einen wesentlichen Kompensationsbeitrag kann und soll der Offshore Windenergiestrom leisten, dessen schnellerer Ausbau in den planerischen Fokus gerückt ist. Dabei ist davon auszugehen, dass Windparks offshore in größerem Umfang Standorte in der Ausschließlichen Wirtschaftszone mit Wassertiefen von 30 bis 40 Metern haben werden. Eine erfolgreiche Durchführung von OWP-Vorhaben stellt hier sehr hohe Anforderungen an alle Beteiligten, die ohne eine durchgängige IT-Unterstützung kaum mehr umsetzbar sein werden. Im Laufe dieser Phasen fallen erhebliche Datenmengen an, die einander bedingen bzw. entsprechende Abhängigkeiten beinhalten. Viele der zur Entscheidungsfindung notwendigen Informationen werden heutzutage dezentral an unterschiedlichen Orten und in unterschiedlichen Systemen verwaltet, die keinen oder nur einen eingeschränkten integrativen Zugriff erlauben. Zudem Erfolg die Dokumentation dieser komplexen Prozesse und Abhängigkeiten oft individuell in proprietären Systemen, was eine Wiederverwendbarkeit erschwert. Ein einheitliches Informationsmanagement, das sowohl als informationstechnische Basis für den gesamten weiteren Lebenszyklus des Offshore-Windparks dient, als auch eine schrittweise Vorgehensweise von der Planungs- bis hin zur Konkretisierungsphase unterstützt, ist in der Regel noch nicht vorgesehen.

2 Herausforderungen bei der Windenergienutzung auf See

Die bereits in Betrieb genommenen Anlagen haben zwar die Umsetzbarkeit von Offshore-Windparks bewiesen, zeigen jedoch auch die damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Probleme auf. Offshore-Bauwerke, insbesondere Plattformen für die Öl- und Erdgasgewinnung, gibt es seit ca. 50 Jahren in großer Zahl und u.U. auch in Wassertiefen von mehreren hundert Metern. Die gesammelten Erfahrungen in der Offshore-Öl und Gasindustrie zeigen hier vor allem auf, dass die zu erwartenden Kosten für das Arbeiten auf See ca. fünf- bis zehnmal höher ausfallen werden als an Land. Diese hohen Investitionen befördern die Suche nach kostengünstigeren Lösungen, da im Gegensatz zur Errichtung von z.B. Bohrplattformen mit millionenschweren Finanzierungen und großen Belegmannschaften, Offshore-Projekte engeren wirtschaftlichen Grenzen

unterliegen und ohne Bedienpersonal vor Ort betrieben werden müssen. Durch die Bedingungen auf See werden Anforderungen gestellt, die in dieser Art nicht für Anlagen an Land existieren. Allgemein lassen sich diese, wie in Bild 1 dargestellt, in technische, wirtschaftliche, genehmigungsrechtliche und ökologische Aspekte untergliedern.

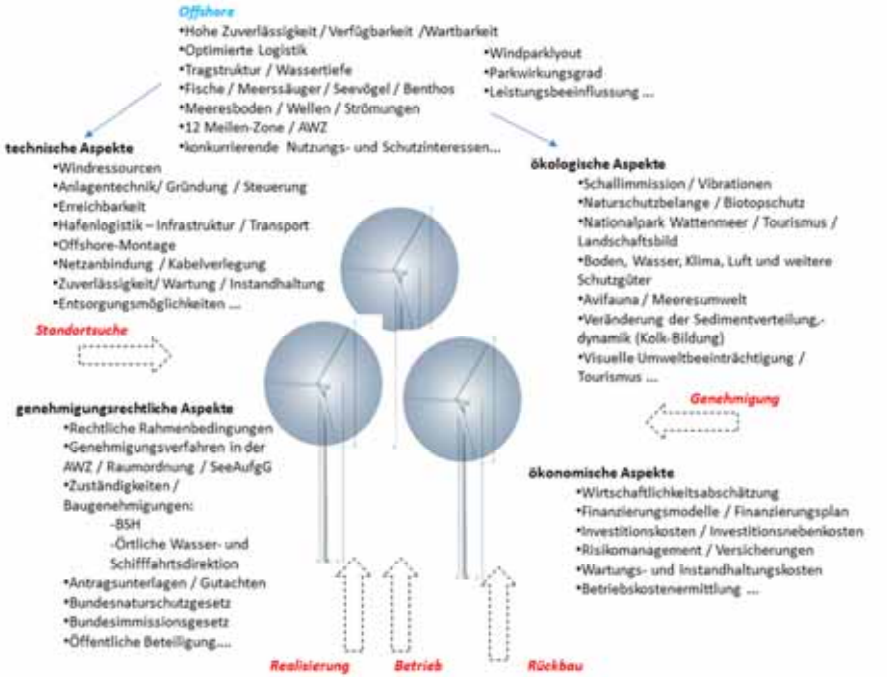


Bild 1: Rahmenbedingungen und zu berücksichtigende Einzelaspekte bei der Planung und Errichtung von Offshore Windenergieanlagen

Die wichtige Forderung, dass alle wesentlichen Komponenten einer Windkraftanlage eine wirtschaftlich kalkulierbare Lebensdauer von mindestens zwanzig Jahren erreichen müssen, ist Offshore noch unverzichtbarer als Onshore. Die Lage der Standorte in der offenen See und die dort anzutreffenden Wind- und Wellenbedingungen verlangen daher eine entsprechende technische Anpassung der Anlagen. Die resultierenden hohen, technischen Anforderungen an Offshore-Windenergieanlagen, auch bedingt durch das zunehmende Größenwachstum der Anlagen, lassen sich nach [1] wie folgt formulieren:

- deutlich höhere Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Reparaturfähigkeit und Wartungsfreundlichkeit der Anlagen, um einen akzeptable Verfügbarkeit und angemessene Betriebskosten auch bei entfernten, schwer zugänglichen Standorten und längeren Instandhaltungszyklen zu gewährleisten
- ein integrierter ganzheitlicher Entwurf von Offshore-Windparks als ein Gesamtsystem zur Einsparung von Kosten für Betrieb und Wartung sowie zur Realisierung zuverlässiger Entwürfe. Gesamtdynamik und Tragstruktur müssen den besonderen Standortbedingungen angepasst werden
- erhöhte Netzintegration und Regelung –große Offshore-Windparks sollen zukünftig wie Kraftwerke als Teil nationaler und internationaler Energiesysteme betrieben werden. Sie müssen gut ins Netz integriert und jede Einzelanlage schnell regelbar sein.
- optimierte Logistik und Offshore-Installation angesichts der hohen Kosten der Installation von Windparks auf See.
- zusätzliche Rückbau- ,Recycling- und Entsorgungsfragestellungen bedingt durch die entfernte Lage und die hohen Tiefen

Gleichrangig sind hier die vielschichtigen Fragen nach der Einwirkung von Offshore-Projekten auf den Naturhaushalt zu beantworten. Die für Offshore-Vorhaben erforderlichen Umweltverträglichkeitsprüfungen sind deshalb durch große, komplexe Durchführungsaufwendungen gekennzeichnet, die zusätzliche Anforderungen an eine informationstechnische Unterstützung formulieren.

3 Lebenszyklusmanagement von Offshore-Windparks

Offshore-Windparks besitzen, wie alle anderen Produkte, einen entsprechenden Lebenszyklus. Auch hier werden bereits in der Planungsphase die entsprechenden Kosten für alle folgenden Lebenszyklusphasen festgelegt, allerdings mit der Besonderheit, dass hier der Grundstein für ein auf 25 Jahre Laufzeit ausgerichtetes Projekt gelegt wird. So führt beispielsweise schon eine Abweichung von den beurteilten Windverhältnissen um 10% zu einer Minderleistung von über 30 %. [Gasch,Twele10]. Ebenso müssen die Anforderungen an das Transport- und Montagekonzept sowie den späteren Betrieb der Anlage bereits bei der Offshore-Planung genauestens berücksichtigt werden. Die hier

gefundenen Lösungsstrategien bestimmen einen enormen Teil der zu erwartenden Probleme und Kosten und sind mit ausschlaggebend für den Erfolg des Gesamtkonzeptes. Um diese vielfaltigen und komplexen Zusammenhänge berücksichtigen zu können, ist eine integrierende Sichtweise über alle Phasen den Lebenszyklus‘ von Offshore Windparks erforderlich. Eine solche ganzheitliche Sichtweise ermöglicht eine stärkere Abstimmung zwischen den einzelnen Phasen im Produktlebensweg von Offshore- Windparks, ein Frontloading von Informationen aus den nachgelagerten Lebensphasen, führt die an der Planung, Aufstellung, Nutzung und Entsorgung beteiligten Akteure zusammen und erlaubt eine durchgängige Gestaltung von Prozess- und Informationsströmen.

3.1 Lebenszyklusphasen von Offshore-Windparks

Das Konzept der Lebenszyklen basiert ganz allgemein auf der Annahme, dass künstliche Systeme analog natürlicher Organismen einen Lebenszyklus mit unterschiedlichen Stadien durchlaufen [2]. Lebenszyklen entsprechen einer zeitlichen Abfolge der in Bild 2 dargestellten Phasen innerhalb eines Windenergieprojektes. Lebenszyklus-konzepte zielen darauf ab, den Zeitbezug von Vorgängen dazustellen und anhand des Verlaufs relevanter Zustandsgrößen charakteristische Bereiche zu identifizieren. Den so identifizierten Bereichen können in einem weiteren Schritt unterstützende Hilfsmittel wie Methoden, Betriebsmittel, Ressourcen oder auch organisatorische Maßnahmen zugeordnet werden.

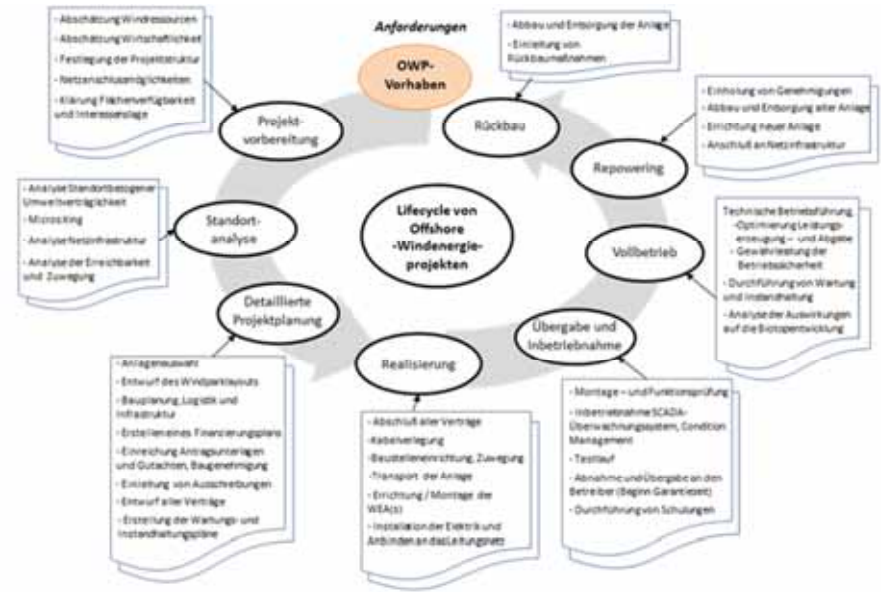


Bild 2: Lebenszyklus eines Offshore-Windparks

Hinsichtlich einer IT-technischen Erörterung umfasst der Begriff ‚Produktlebenszyklus' die Verbindung von Daten und Informationen, die während der einzelnen Phasen entstehen bzw. sich im zeitlichen Verlauf ändern und stellt dadurch die ganzheitliche Sichtweise auf das Produkt in den Betrachtungsmittelpunkt. Hier von einem Zyklus zu sprechen erhält seine Berechtigung auch daher, da heute das Recycling die Entwicklung beeinflusst und bereits bei der Projektplanung Rückbau und Recycling-Konzepte erstellt werden müssen. Offshore Windparks haben Unikatcharakter. Somit lassen sich einige Unterschiede in der Fokussierung der Lebenszyklusphasen finden. Lebenszyklusphasen erhalten hier, bedingt durch die Komplexität und lange Lebensdauer, in erster Linie eine andere zeitliche Ausdehnung. Hinzu kommen neue, phasenüber-greifende, inhaltliche Schwerpunkte wie das ‚Behörden Engineering, das für jede einzelne OWP-Anlage neu durchlaufen werden muss. Ein Produkt Offshore-Windpark enthält eine zusätzliche Standortanalyse-Phase. Die hier zu erbringenden Arbeits-ergebnisse bedingen die Weiterführung oder das Ende des Gesamtsystems. Zeitlichen Ausdehnung und Kostenintensität erfordern zudem eine eigene Inbetriebnahme- und Übergabephase. Aufgrund des langen Service-Zyklus erfolgt

innerhalb der Betriebsphase eine Schwerpunktsetzung auf Wartung und Instandhaltung. Konzept für eine lebenzyklusübergreifende IT-Unterstützung

3.2 Konzept für eine lebenszyklusübergreifende IT-Unterstützung

Die vielfaltigen und komplexen Zusammenhänge, die während der Durchführung von Offshore-Windpark-Projekten zu berücksichtigen sind, erfordern eine integrierte Abbildung der in Bild 3 aufgeführten Sichtweisen in einem einheitlichen IT-Modell. Das Ziel ist die bessere informationstechnische Verzahnung der einzelnen Phasen, nicht die weitere Durchdringung der einzelnen Phasen. Im Mittelpunkt steht hier die geeignete informationstechnische Unterstützung einer ganzheitlichen Betrachtung: *warum* (Anforderungen) *wer* (Rollen) *was* (Produkt) *wann* (Prozess) *womit* (Ressourcen) und *wie* bzw. *wo* (Umgebung) bearbeitet. Ein solches Modell erlaubt neben der Darstellung von Funktion, Struktur und Hierarchie, eine verstärkte Berücksichtigung der unter Punkt 2 aufgeführten technischen, ökologischen, ökonomischen und genehmigungsrechtlichen Einflussgrößen auf das System Offshore-Windpark in Form von nachverfolgbaren Anforderungen. Die gewählte Modellkonzeption folgt den Paradigmen objektorientierter Modellierung unter Berücksichtigung der konzeptionellen Forderungen nach einer Unterstützung der Wiederverwendbarkeit von(Teil-)Modellen, der Einbettung von Hierachisierungsansätzen durch Ableitung und Vererbung sowie der Schaffung konzeptioneller Voraussetzungen zur sukzessiven, sichtenbezogenen Erweiterbarkeit und Flexibilisierung des Objektmodells. Die *anforderungsorientierte Sichtweise* beinhaltet dabei im Wesentlichen die Ableitung und Strukturierung der wichtigsten Anforderungen an ein Offshore-Windpark-System und erlaubt deren Verknüpfung und Nachverfolgbarkeit innerhalb des Gesamtmodells. Die Unterstützung einer *produktbezogenen Sichtweise* ermöglicht die Abbildung der system- bzw. funktionsorientierte Struktur, die letztlich den funktionalen Zusammenhang der Teile des Systems OWP wiedergibt. Diese Sicht lässt sich auch als ‚besteht-aus' Sicht auf die zugrunde liegende Produktbeschreibung formulieren.

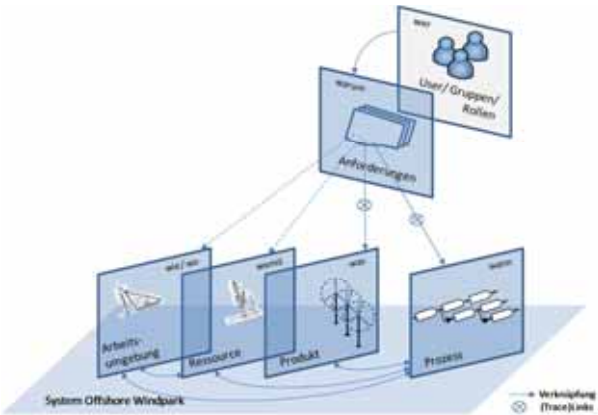


Bild 3: Modellansatz Offshore Windpark

Im Fokus der *prozessorientierten Sichtweise* liegt die Schaffung eines allgemeinen OWP-Prozessmodells zur Abbildung typischer Prozessabläufe während des Lebenszyklus von Offshore-Windparks. Eine wesentliche Zielstellung zur Ermöglichung einer transparenten Statusvergabe besteht in der Unterstützung der Wiederverwendung bzw. Wiederholbarkeit sowie Bewertung verschiedener Prozessabläufe durch Ableitung von formalisierbaren Referenzprozessen und der Ergänzung mit notwendigen Workflows. Innerhalb der *ressourcenorientierte Sicht* werden Objekttypen definiert, die eine strukturierte Modellierung von typisierten Betriebsmitteln ermöglichen. Ein wichtiges Ziel liegt hier in der informationstechnischen Unterstützung von Verknüpfungen zu den ressourcenverbrauchenden Prozessen. Die Berücksichtigung der *arbeitsumgebungsorientierten Sicht* erlaubt eine effizientere Planung spezifischer, umgebungs- bzw. arbeitsplatzsabhängiger Abläufe sowohl an Land als auch auf See. Sie dient der Simulation verschiedenster Gesichtspunkte, angefangen von ergonomischen Fragestellungen bis hin zu kompletten Durchlaufsimulationen. Neben der flussorientierten Abstimmung zwischen den verschiedenen Lebensphasen müssen auch die Veränderungen wichtiger Zustandsgrößen im ‚System' OWP berücksichtigt werden. Der integrative Ansatz spiegelt daher sowohl die dem OWP eigene Dynamik als auch die Lebenszyklusorientierung wider und erleichtert die optimale Einbindung verschiedener, für das Lebenszyklusmanagement notwendiger Anwendungen wie Anforderungs- und Projektmanagement, Prozessabbildung und Ressourcenverwaltung.

4 Umsetzung und Ausblick

Dass sich Unternehmen zunehmend der Herausforderung gegenübersehen, die informationstechnische Beherrschung und Optimierung des Produktlebenszyklus als Kernkompetenz zu begreifen, und IT-Unterstützung im Product Lifecycle immer mehr zum strategischen Wettbewerbsfaktor werden wird, ist akzeptiert und durch verschiedene Studien belegt [3]. Eine erfolgreiche Entwicklung von OWP setzt eine intensive wechselseitige Abstimmung der Entwicklungs-partner und damit den intensiven Informationsaustausch zwischen den beteiligten Partner voraus. Diese intensive Zusammenarbeit erfordert die Vernetzung der informations-technischen Infrastrukturen. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass in den verschiedenen Bereichen unabhängig voneinander Informationen erzeugt werden, die auch für andere Unternehmensbereiche von Relevanz für das weitere Fortschreiten des Prozesses sind. Mit dem hier vorgestellten Konzept gelangt man zu einer besseren Verzahnung der einzelnen Phasen und erhöht damit die Leistungsfähigkeit der Entwicklung. Die IT-technische Abbildung der phasenübergreifenden Aufbau- und Ablaufstrukturen ist klassische Aufgabe eines Product Lifecycle Management-Systems. PLM-Systeme unterstützen die Kommunikation und Kooperation zwischen den Akteuren entlang des Produktlebensweges und den am Produkt beteiligten organisatorischen Einheiten. Sie bieten eine integrierende Sichtweise auf die unterschiedlichen Daten, Informationen und Disziplinen der lebensphasen-übergreifenden Gestaltung der Produkte, projektspezifischen Organisationen und den dazugehörigen Prozessen, und stellen Werkzeuge für deren Erzeugung und Nutzung bereit. Aufgrund dieser Eigenschaften bietet sich der Einsatz von PLM-Systemen auch für das IT-Management von Offshore-Windpark-Produktprojekten an.

Literatur

[1] Gasch,Robert; Twele, Jochen: *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb.* .5. Aufl. Teubner-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8351-0136-4

[2] Lübke, Ekkehard: Lebenszyklusorientiertes Produktstrukturmanagement eine theoretische und empirische Untersuchung – 1. Aufl. München, 2007.- ISBN 978-3-937236-65-0

[3] Abramovici, M.; Schulte, S.: *PLM - Wege aus der Strategiekrise in der Automobilindustrie*. In: eDM-Report Data-Management-Magazin, 2005.

Analog, digital, virtuell – Der hybride Designprozess in der kooperativen Entwicklung maritimer Produkte

Frank Beier, Thomas Maier

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
frank.beier@iktd.uni-stuttgart.de
http://www.iktd.uni-stuttgart.de/design

Inhalt: *In diesem Beitrag wird am Beispiel einer kooperativen Produktentwicklung (Voith Radial Propeller) die Integration digitaler Hilfsmittel im Designprozess beschrieben und methodisch hinterfragt. Die Erörterung und Ermittlung der Stärken und Schwächen erfolgt dabei aus der Sicht des Technischen Designs mit speziellem Fokus auf die frühen Entwicklungsphasen. Als Ansatz kommt hier auch das Kommunikationsmodell nach Shannon und das Informationsmodell von Gitt zu tragen, an deren Beispielen im dritten Teil des Beitrags das Konzept einer optimierten und integrierten innovativen Designmethode vorgestellt wird. Am Ende dieses Beitrags wird ein Ausblick auf die optimierte Designentwicklung mit Hilfe des hybriden Designprozesses dargestellt.*

Abstract: *In this article, the integration of digital media within the designing procedure is described and analysed on the basis of a cooperative product development (Voith Radial Propeller). This regard bases on the aspects of industrial design engineering and with a special view on the early development steps. The models of communication (Shannon) and information (Gitt) are presented in the third part of this article in context with the innovative concept of an optimized and integrated industrial design methodology. At the end of this article, a vision on the hybrid designing procedure is presented.*

Stichwörter: *Designmethodik, Produktentwicklung, digitale Medien, hybrider Designprozess.*

Keywords: *Industrial design methodology, product development, digital media, hybrid designing procedure.*

1 Einleitung

Digitale Medien sind heutzutage allgegenwärtig. Seit der Entwicklung des Transistors im Jahr 1947 [1], kann eine zunehmende und ab dem Jahr 1968 sogar rasante Entwicklung digitaler Medien beobachtet werden. Bekannte Meilensteine hierfür sind die Erfindung des Personal Computers im Jahr 1962 [1] und das Erscheinen des Commodore C64 im Jahr 1982, der bis heute mit über 30 Millionen Geräten der meistverkaufte Heimcomputer der Welt ist [2]. Neben dieser Computerentwicklung kann auch eine um wenige Jahrzehnte

versetzte Entwicklung der Informationstechnologien nachvollzogen werden, beginnend mit der Entwicklung des APRANET im Jahr 1962 bis weit über die erste Freigabe des WWW im Jahr 1990 hinweg [1]. Bis zum heutigen Tag wurden die digitalen Medien im professionellen und privaten Bereich immer weiter verbreitet und detaillierter an neue Anforderungen und Herausforderungen angepasst. Daher können sie seit vielen Jahren in Form von *Computer Aided Engineering* (CAE) und *Product Lifecycle Managment* (PLM) auch im Bereich der Produktentwicklung eingesetzt werden [3]. Somit kann bei der technischen Produktentwicklung sowie beim Entwicklungsmanagement von einer gelungenen Integration digitaler Medien gesprochen werden.

Im Gegensatz dazu konnte im Bereich der schöpferisch-kreativen Designentwicklung diese Integration bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht erzielt werden [4]. So sind beispielsweise selbst bei einer flächendeckenden Anwendung digitaler Medien, z. B. innerhalb eines Designbüros, noch Einschränkungen notwendig und konventionelle Handarbeit an der Tagesordnung [5], weswegen hier lediglich von Implementierung und nicht von Integration digitaler Medien gesprochen werden kann. In der Praxis bedeutet dies, dass die vorhandene Kluft zwischen Ingenieuren und Designern [6] aufgrund unterschiedlicher Arbeitsgrundlagen zusätzlich vergrößert wird.

Um die digitalen Medien vollständig in den Designprozess zu integrieren, dadurch die Vorteile der neuen Medien für das Design nutzbar zu machen und gleichzeitig die Kluft zwischen Ingenieuren und Designern zu schließen, ist eine Adaption der Designmethode notwendig [7]. Aus dieser Anpassung resultiert der hybride Designprozess, wobei hierbei der Begriff *Hybrid* (im Allgemeinen das „Gemischte“ bzw. „aus Verschiedenen Zusammengesetzte“ [8]) als die Symbiose der drei Begriffe *Analog*, *Digital* und *Virtuell* definiert ist (siehe Bild 1).

Analog wird dabei als Charakteristikum für die menschliche Arbeitsweise (z.B. während kreativer Tätigkeiten) bezeichnet (siehe Bild 2 links), da der Mensch während dieser kreativen Schaffensweise entsprechend einer Definition aus der Elektrotechnik jeden beliebigen „Wert“ generieren kann [9] und keinem vorgegebenen Raster oder Muster folgen muss. Anschaulich wird dies vor allem im Bereich des Freihandskizzierens, einer rein intuitiv-schöpferischen Tätigkeit im Rahmen der Ideenfindung. Implizit bedeutet dies, dass selbst das Skizzieren mit digitalen Werkzeugen (digitales Zeichenbrett) als analoges Vorgehen betrachtet werden muss, da die eigentliche Handlung des Designers analog ist.

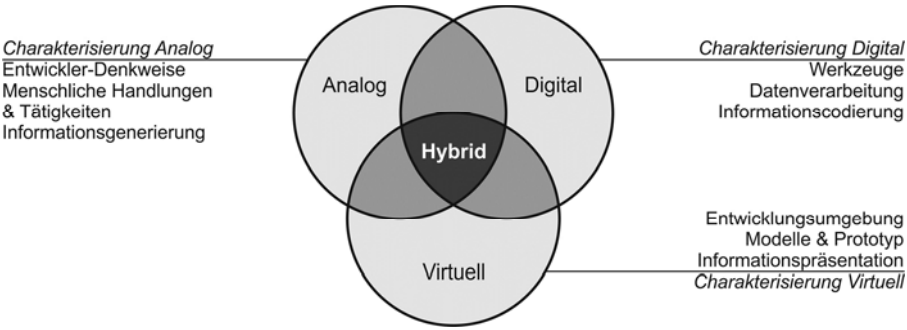


Bild 1: Visualisierung des Begriffs Hybrid

Der Begriff *Digital* wird als das Charakteristikum für die Werkzeuge des Designers bzw. des Entwicklungsteams betrachtet, die „keine zeitkontinuierlichen Veränderungen haben“ [10]. Durch diese diskreten Werkzeuge (siehe Bild 2 rechts) können zu jeder Zeit die gleichen Grundvoraussetzungen für den Designer geschaffen werden, da sie sich im Gegensatz zu den analogen Werkzeugen nicht durch Abnutzung verändern.

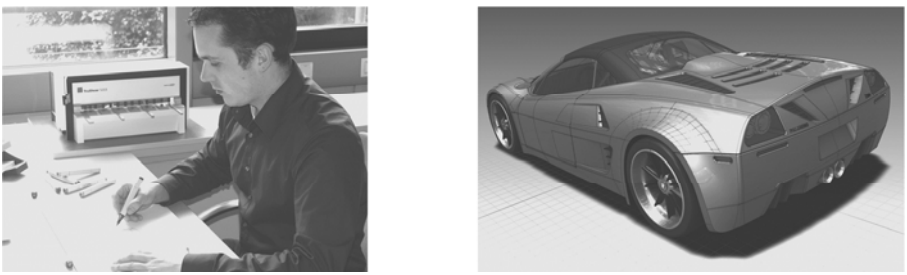


Bild 2: Analoge Tätigkeit (links) und digitales Werkzeug [11] (rechts) im Designprozess

Mit *Virtuell* sind die „scheinbaren“ Entwicklungsumgebungen charakterisiert, in denen ein zu kreierendes Produkt entwickelt, untersucht und optimiert werden kann. Diese Entwicklungsumgebungen sind nicht real vorhanden, sondern gemäß einer Definition aus der Informationstechnologie lediglich eine „Nachbildung eines realen Zustandes“ [10].

Die Begriffe *Analog*, *Digital* und *Virtuell* berücksichtigend, ist unter *Hybrid* die prozessorientierte Verknüpfung dieser drei Einzelcharakteristika zu verstehen. Dies beinhaltet die analoge Arbeit des Designers unter Zuhilfenahme digitaler Werkzeuge in virtuellen Entwicklungsumgebungen.

2 Der Designprozess am Beispiel des Voith Radial Propellers

Die Entwicklung des Voith Radial Propellers wurde weitgehend entsprechend der Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 [12] durchgeführt, in der die Produktentwicklung in vier Phasen unterteilt ist: Planungs-, Konzept-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase. Daran angelehnt orientierte sich auch die Designentwicklung des Radial Propellers (als integrierter Bestandteil der Produktentwicklung) an diesen vier Phasen [7].

Analog zu ersten Voruntersuchungen [13] wurde während dieser Entwicklung der Einsatz digitaler Medien bewusst verstärkt, um deren Fähigkeit zur Integration zu überprüfen. Bild 3 zeigt den für weitere Betrachtungen relevanten Bereich dieser Produktentwicklung – Design und Konstruktion – unterteilt auf die vier Phasen der Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 [12] und unter Kennzeichnung des Informationsflusses innerhalb und zwischen diesen beiden Fachdisziplinen. Zusätzlich sind hier bereits die quantitativen Anteile analog geprägter Vorgehens- und Denkweise (*A*), digitalem Medieneinsatz (*D*), Nutzung virtueller Entwicklungsumgebungen (*V*) sowie die erkennbare Verknüpfung im Verständnis hybrider Entwicklung *(H*) gekennzeichnet. Die Übertragung von Daten oder Material [14] ist hier nicht explizit aufgeführt.

Bei der Betrachtung dieses beispielhaften Entwicklungsprozesses ist ersichtlich, dass in den frühen Phasen der Designentwicklung die analogen Vorgehensweisen dominierten und die digitalen Medien kaum bzw. nicht in ihrer vollen Leistungsfähigkeit zum Einsatz kamen. Virtuelle Entwicklungsumgebungen wurden zu diesem Zeitpunkt seitens des Designs nicht genutzt. Ab der Verwendung dreidimensionaler CAD-Modelle wurde in der Designentwicklung der Einsatz digitaler Medien konstant präsent und im Bereich des Renderings zusätzlich durch virtuelle Umgebungen unterstützt.

Die konstruktive Entwicklung nutzte hingegen sehr früh digitale und virtuelle Techniken, um im Rahmen erster Analysen möglichst früh eine genaue Aussage bzgl. Aufbau- und Formtrends zu treffen. Somit konnte hier auch schon in den frühen Phasen von hybrider Entwicklung gesprochen werden. Die Ergebnisse der konstruktiven Entwicklung gingen zwar in die Designentwicklung ein, wurden dort allerdings lediglich als Leitinformation zur Orientierung und nicht als komplettes Datenmodell verwendet. Dies änderte sich in den späten Phasen, da hier beide Entwicklungspartner (Design und Konstruktion) auf Basis dreidimensionaler Daten arbeiteten und ein gezielter Austausch von Daten stattfand. In den späten Phasen konnten daher Design und Konstruktion bereits kooperativ arbeiten.

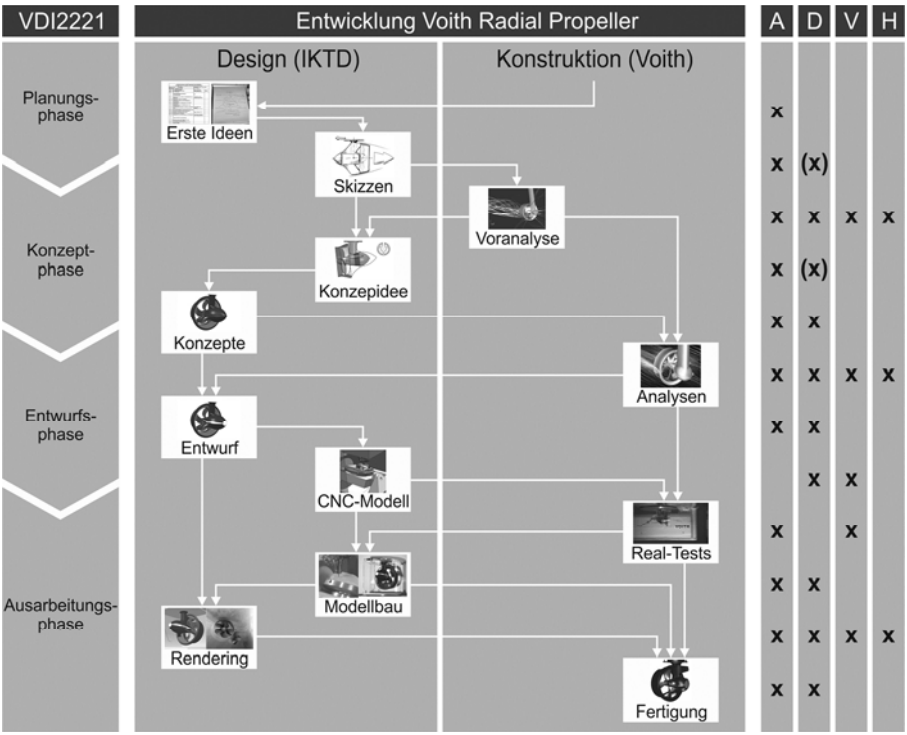


Bild 3: Der reduzierte Entwicklungsprozess des Voith Radial Propeller

2.1 Die Herausforderung der frühen Entwicklungsphasen

Um später eine optimierte Anwendung auf den gesamten Entwicklungsprozess vorzunehmen, werden im Folgenden lediglich die frühen, noch nicht durchgängig kooperativen Phasen betrachtet. Diese schöpferisch-kreativen Phasen sind zudem grundlegend für den weiteren Entwicklungsprozess und das Gesamtergebnis der Entwicklung. Bei genauer Betrachtung fallen zunächst die unterschiedlichen Arbeitsumgebungen und Hilfsmittel von Design und Konstruktion negativ auf. Dies resultiert aus den verschiedenen Arbeitsweisen dieser beiden Disziplinen. Diese verschiedenartigen technischen Grundvoraussetzungen bilden keine gemeinsame Entwicklungsbasis und üben einen hemmenden Einfluss auf die Kommunikation aus. Andersartige Denkstrukturen und Vorgehensweisen hemmen ebenfalls die Kommunikation und sind maßgeblich für die „Kluft zwischen Ingenieuren und Designern“ [6] verantwortlich.

Kommunikation hängt direkt mit Kooperation und Koordination zusammen und bildet die „Basis gemeinsamen Handelns“ [15]. Als gemeinsames Handeln wird u. a. auch eine Produktentwicklung bezeichnet. Durch die Hemmung der Kommunikation wird demnach auch die Kooperation gemindert und eine Koordination der Gesamtentwicklung erschwert.
Für eine Optimierung der Produktentwicklung muss demnach die Kommunikation in diesem Kontext betrachtet und gefördert werden. Da die Kommunikation auch im direkten Zusammenhang mit der Information steht [16, 17], wird dadurch ein gesteigerter Informationsaustausch angestrebt.

2.2 Kommunikation und Informationen im Entwicklungsprozess

Kommunikation ist definiert als die Übertragung einer Information von einem Sender zu einem Empfänger mittels eines Kommunikationsmediums [16]. Die *Information* ist nach Gitt [17] definiert als eine „geistige Größe“, die zum Zeitpunkt und am Ort des Informationsaustauschs im Allgemeinen „nicht gegenwärtig, nicht (mit den Sinnen) wahrnehmbar“ sein muss. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung des Kommunikationsbegriffs [16], dass die absichtliche Information lediglich den reinen geistigen Inhalt darstellt und erst durch ein materielles Kommunikationsmedium sichtbar, speicherbar und transportierbar gemacht werden kann.
In Anwendung dieser Modelle auf die Strukturen einer Produktentwicklung ergeben sich als Sender und Empfänger die einzelnen Personen der verschiedenen Entwicklungsteams und als zu übertragende Informationen die jeweils erzeugten Ideen und erarbeiteten Entwicklungsergebnisse. Aus dieser Analogie heraus lassen sich auch Ingenieure und Designer als Sender bzw. Empfänger und die Ideen und Ergebnisse als Informationen herausstellen.

3 Konzept eines hybriden Designprozesses

Nach Grote [18] ist der Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechniken „integraler Bestandteil moderner Unternehmensstrategien“. Dass dies auch auf Produktentwicklungsprozesse gespiegelt werden kann, wird bei der Betrachtung des reduzierten Prozesses (Bild 3) erkenntlich, da Informationsübertragungen (Pfeile) als auch moderne Technologien (Rechtecke) bereits vorhanden sind. In einer sinnvollen Verknüpfung dieser beiden Aspekte lässt sich ein innovatives Kommunikationsmodell generieren.

Da zudem die Kommunikation relevanter Indikator für Kooperation und Koordination ist [15], wird diese als Schlüsselstelle für weitere Betrachtungen gelten und muss an den hybriden Charakter der Produktentwicklung angepasst werden: Es wird ein hybrides Kommunikationsmodell generiert. Die Information (als Bestandteil der Kommunikation) wird vom Sender generiert und beruht auf menschlichen Denk- und Vorgehensweisen, weswegen sie jeden beliebigen Wert annehmen kann. Sie stellt daher die analoge Komponente der Kommunikation dar. Das Medium, mit dessen Hilfe die Information vom Sender zum Empfänger übertragen wird [16], ist ein Werkzeug, das nicht veränderbar sein sollte (z. B. Sprache oder Datenformate) um jederzeit vom Empfänger verstanden zu werden. Daher ist das Kommunikationsmedium die digitale Komponente der Kommunikation. Die virtuelle Komponente der Kommunikation ist der Raum der Kommunikation, d. h. die Umgebung in der ein Sender seine Information mittels des Mediums bereitstellt. Dies können auch Denkmodelle sein, auf dessen Basis die Überlegungen während eines Gesprächs gestützt sind.

Mit diesem hybriden Kommunikationsmodell lassen sich vorhandene und auch neue digitale Medien besser integrieren, da sie aufgrund ihrer Charakteristik nicht mehr länger nur als Entwicklerwerkzeug sondern auch als Kommunikationsmedium genutzt werden können. Das Erreichen einer 100%igen Kommunikation durch anteilige und variable Abdeckung der analogen, digitalen und virtuellen Komponenten ist das Konzept des hybriden Designprozesses. Dank einer gemeinsamen Basis für die Kommunikation wird auch der Informationsaustausch zwischen Designern und Ingenieuren verbessert und somit durch einfachere Kooperation die Kluft zwischen diesen beiden Disziplinen verkleinert. Dies wiederrum führt zu einer Erleichterung der Koordination einer Entwicklung.

4 Ausblick

Unter Anwendung einer neuen Kommunikationsstrategie im Rahmen des hybriden Designprozesses lassen sich neue digitale Medien nicht nur implementieren sondern als Kommunikationswerkzeug integrieren. Damit kann der eigentliche Einsatzbereich dieser Werkzeuge erweitert werden und eine Produktentwicklung, wie z. B. die des Voith Radial Propellers, kann dadurch effizienter durchgeführt werden. Die Verifizierung dieses Konzepts wird Bestandteil weiterer Untersuchungen und Beispielprojekte sein.

Mit der Anwendung des hybriden Designprozesses können nicht nur digitale Medien besser in den Entwicklungsprozess integriert werden und neue Möglichkeiten der Kommunikation nutzbar gemacht werden: Durch die Optimierung von Kommunikation, Kooperation und Koordination als Basis gemeinsamer Produktentwicklung wird ein essentieller Beitrag zur Schließung der Kluft zwischen Ingenieuren und Designern geleistet.

Literatur

[1] Hafner, K.; Lyon, M.: Arpa Kadabra - Die Geschichte des Internet, dpunkt-Verlag, Heidelberg, 1997

[2] Zahn, C.; Benda, R.; Coners, E.: Die Commodore Story, CSW-Verlag, Winnenden, 2006

[3] El Khaldi, F.; Ullrich, P.; Terres Aboitiz, C.: Vorteile des Virtual Prototyping als gesamtheitlicher CAE-Ansatz, in: Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 01/2011, S. 34-39

[4] Beier, F.; Maier, T.: Digitale Designentwicklung - Fluch oder Segen?, in: Linke, M. (Hg.): DESIGN - Kosten und Nutzen, TUDpress, Dresden, 2010, S. 219–234

[5] Schmieg, A.: Harte Arbeit mit weichem Werkzeug, in: design report, Ausgabe 1/11, 2011, S. 56-57

[6] Reese, J.: Der Ingenieur und seine Designer, Springer Verlag, Berlin, 2005

[7] Beier, F.; Maier, T.: Innovationen im Designprozess - Über den sinnvollen Einsatz digitaler Medien, in: Hentsch, N. (Hg.): Innovation durch Design, TUDpress, Dresden, 2009, S. 133–145

[8] BrockHaus: http://www.brockhaus-enzyklopaedie.de, Website der Enzyklopädie: Gütersloh, 2011

[9] Springer, G.: Fachkunde Elektrotechnik, 21. Aufl., Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 1996

[10] Lipinski, K.: http://www.itwissen.info, Website des Wissens-Portals ITWissen.info, DATACOM Buchverlag GmbH, Peterskirchen, 12. Mai 2011

[11] AutoDesk: http://www.autodesk.de, Website der Autodesk GmbH, München, 13. Mai 2011

[12] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2221, 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993

[13] Iwanitza, A.: Untersuchung zum Designprozess unter Anwendung eines digitalen Zeichenbretts (Wacom Board), Studienarbeit, Universität Stuttgart, 2008

[14] Beier, F.; Maier, T.: How to Digitize Analog Industrial Design Engineering, in: Marjanovic, D. (Hg.): Proceedings of the 11th Int. Design Conference, Bd. 3, Design Society, Zagreb, 2010, S. 1761–1768

[15] Badke-Schaub, P.; Hofinger, G.; Lauche, K.: Human Factors - Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen, Springer Verlag, Heidelberg, 2008

[16] Shannon, C.; Weaver, W.: Mathematische Grundlagen der Informationstheorie, Oldenbourg Verlag, München, 1976

[17] Gitt, W.: Am Anfang war die Information, 2. Aufl., Hänssler-Verlag, Stuttgart, 1994

[18] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel - Taschenbuch Maschinenbau, 21. Aufl., Springer, Berlin, 2005

Die effektive Behandlung großflächiger thermischer Verletzungen - eine medizinisch-technische und wirtschaftliche Herausforderung

Ines Barz, Frank Engelmann

[1]Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen, FH Jena
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena
Email: ines.barz@fh-jena.de, frank.engelmann@fh-jena.de; Internet: http://www.wi.fh-jena.de

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 Problemstellung

Jährlich werden in Deutschland rund 350.000 Fälle von Verbrühungen und Verbrennungen ärztlich behandelt. Dabei müssen von den 15.000 stationär behandelten Patienten etwa 1.500 Fälle mit schweren und schwersten Verbrennungen in spezialisierten Verbrennungszentren intensivmedizinisch behandelt werden. 30-40% dieser Schwerbrandverletzten sind Kinder. 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, 2]
Die chirurgische Standardtherapie zur Behandlung thermischer Verletzungen der Grade IIb und III besteht in der Entfernung der irreversibel geschädigten Haut (Nekrosektomie) und der sofortigen, permanenten Deckung der Wundflächen durch körpereigene (autologe) Haut. Studien haben gezeigt, dass eine frühzeitige Nekrosektomie die Überlebensrate Schwerbrandverletzter signifikant steigert [3]. Bei großflächigen thermischen Verletzungen stehen jedoch nicht keine ausreichend großen Spenderareale zur Transplantatgewinnung zu Verfügung. Dies bedingt eine temporäre Wunddeckung mit Hautersatzmaterialien und mehrfache Hauttransplantationen zu späteren Zeitpunkten. Ziel des Projektes ist daher die Verbesserung der Behandlung von Schwerbrandverletzten durch die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Generierung autologer Transplantate mit maximaler Flächenvergrößerung durch die Anwendung von Mikrogewebspartikeln.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Das medizinische Optimum der Verbrennungsbehandlung stellt trotz intensiver Forschungen auf dem Gebiet des Tissue Engineering nach wie vor die Transplantation autologer Haut dar. Da diese jedoch bei großflächigen Verbrennungen nicht in ausreichender Menge zur Verfügung steht, kommen andere, kostenintensive und weniger effektive Verfahren des Hautersatzes. Es handelt sich dabei überwiegend um einen temporären Hautersatz in Form von synthetischen und biologischen Hautersatzmaterialien. Auch Kombinationen verschiedener Hautersatzmaterialien mit autologer Spenderhaut sind möglich. Keines der angewandten Verfahren des Hautersatzes ist jedoch derzeit 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 [4].
Gegenwärtig ist es möglich, die gewonnene Spenderhaut durch zwei verschiedene Verfahren „mechanisch“ in ihrer Fläche zu expandieren. Dazu wird die dem Patienten als Spalthaut mit einer Dicke von 0,2 bis 0,4 mm entnommene Eigenhaut mechanisch bearbeitet und anschließend auf die Wunde appliziert. Das Meek-Verfahren basiert auf der Zerkleinerung der Spalthaut in kleine quadratische Inseln der Größe 3 mm x 3 mm und der anschließenden Expansion durch ein vorgefaltetes Trägermaterial (Bild 1). Bei dem

Einsatz des Mesh-Verfahrens wird in der Haut eine Gitterstruktur erzeugt und diese zu einem Gitternetz aufgeweitet (Bild 2) [2, 6].

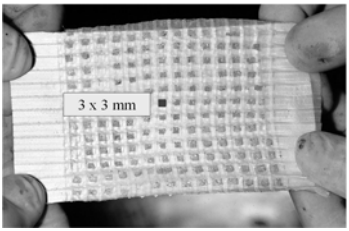


Bild 1: Expansion eines Meek-grafts

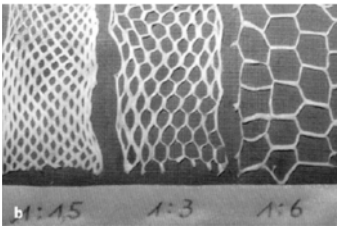


Bild 2: Expansionsraten Mesh-Technik [5]

Das Schließen der Transplantatzwischenräume erfolgt durch sekundäre Epithelisierung ausgehend von den Transplantaträndern. Die technisch möglichen Expansionen reichen von 1:1,5 bis zu 1:9, wobei jedoch Expansionen > 1:4 nur in Ausnahmefällen angewandt werden, da sowohl die funktionellen als auch ästhetischen Ergebnisse aufgrund der zu weiten Partikelabstände unbefriedigend sind [2].

3 Medizinisch-technologische Zielstellung

Im mathematischen Ansatz des Meek-Verfahrens zeigt sich, dass eine Erhöhung der Expansionsrate bei gleichbleibenden oder gar verringerten Partikelabständen nur durch eine Reduzierung der Partikelgröße möglich ist. Ausgehend von den bisherigen Transplantatabständen bei einer Expansionsrate von 1:4 kann bei einer Reduzierung der Partikelgröße auf 1 x 1 mm bei annähernd gleichbleibenden Partikelabständen die Expansionsrate theoretisch auf 1:15, bei einer Partikelgröße von 0,5 x 0,5 mm sogar auf 1:50, erhöht werden (Bild 3). Unter Beibehaltung der Expansionsrate von 1:4 kann durch eine Verkleinerung der Partikel auf 1 x 1 mm der bisherige Partikelabstand um ca. 60% reduziert werden.

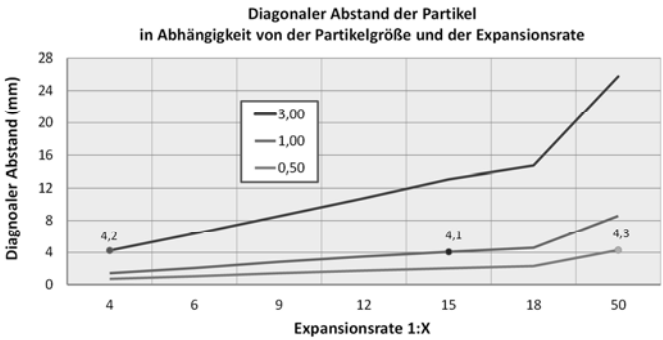


Bild 3: Diagonaler Partikelabstand in Abhängigkeit der Partikelgröße und Expansionsrate

Es wird daher davon ausgegangen, dass sich mit diesem Szenario des Einsatzes von „Mikrogewebspartikeln“ sehr gute medizinische Ergebnisse mit schnellen Heilungsraten und verringerter Narbenbildung erzielen lassen. Ziel ist es daher, eine Technologie zu entwickeln, welche die Herstellung und Transplantation von Mikrogewebspartikeln ermöglicht.

Die Entwicklung einer solchen Technologie gliedert sich in drei wesentliche Problemstellungen:

- Lösungen zur Zerkleinerung der Spalthaut in Mikrogewebspartikel
- Lösungen zur Expansion der Mikrogewebspartikel
- Lösungen zur Transplantation der Mikrogewebspartikel.

Mögliche Lösungen zur Expansion und zur anschließenden Transplantation der Mikrogewebspartikel sind wesentlich abhängig von der gewählten Lösung zur Zerkleinerung der Spalthaut in Mikrogewebspartikeln.

Für die industrielle Fertigung sind vielfältige Verfahren zum Trennen von Werkstoffen bekannt, welche im Hinblick auf die geforderte Anwendung und die stofflichen Eigenschaften des Werkstückes ihre jeweilig spezifischen Vor- und Nachteile besitzen. Eine Vielzahl dieser Verfahren kommt auch in der medizinischen Behandlung zur Anwendung. Insbesondere mit der Weiterentwicklung und dem vermehrten Einsatz der minimalinvasiven Technologie bei verschiedensten chirurgischen Eingriffen werden neben den klassischen Operationswerkzeugen mit Schneidelementen zunehmend auch Schneidverfahren mittels Laser- und Wasserstrahl angewandt. Dabei ist jedoch stets zu

unterscheiden, welchem medizinischen Zweck das Schneiden von Gewebe dient. Bei der Eröffnung des Körpers oder dem Separieren von anatomischen Strukturen ist beispielsweise eine hohe Schneidpräzision mit einer geringen Gewebeschädigung gefordert. Glatte und gut adaptierbare Wundränder verbessern die primäre Wundheilung mit nur geringer Narbenbildung deutlich. Bei der Ektomie von Organen ist dagegen im Schneidprozess eine Schädigung der Schnittränder durch Koagulation erwünscht, um entstehende Blutungen sofort durch Veröden zu stillen. Für die Ermittlung der notwendigen technischen Anforderungen an eine Lösung müssen zunächst die medizinischen Anforderungen der Problemstellung erarbeitet.

Die medizinische Anforderung ist die schnellstmögliche Wundheilung bei geringer Narbenbildung. Die Wundheilungsdauer ist dabei u.a. abhängig von den Partikelabständen im Transplantat und von der Vitalität des Epithelgewebes der Transplantaträndер. Eine wesentliche medizinisch-technische Anforderung für die Technologie des Zerkleinerns von Spalthaut ist daher das Trennen der Spalthaut ohne mechanische oder thermische Schädigung der Schnittränder. Neben der Schädigung der Partikel ergeben sich jedoch zwei weitere medizinische Fragestellungen, bei denen angenommen wird, dass sie einen wesentlichen Einfluss auf die Wundheilung besitzen:

- Welches ist die medizinisch sinnvolle, minimale Partikelgröße?
- Welche Lage/ Orientierung müssen die Partikel zum Wundgrund besitzen?

Grundlegend ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Verringerung der Partikelgröße eine schnellere Wundheilung aufgrund der geringen Partikelabstände erreicht werden kann. Es muss jedoch angenommen werden, dass sich das Vermögen der Partikel zur schnellen Epithelisierung ab einer definierten Partikelgröße gegenläufig zu dieser verhalten wird. Ebenso ist nicht bekannt, welchen Einfluss die Lage der transplantierten Partikel zum Wundgrund auf das medizinische Ergebnis besitzt. Gleichzeitig sind jedoch diese Festlegungen als weitere wesentliche medizinische Anforderungen für die Auswahl einer Zerkleinerungs- und auch Transplantationstechnologie entscheidend.

4 Wirtschaftliche Zielstellung

Neben den medizinischen Anforderungen sind bereits im Entwicklungsprozess die vielfältigen gesetzlichen und normativen Rahmenbedingungen für Medizinprodukte sowie die, durch den stetig wachsenden Kostendruck des Gesundheitssystems, zunehmend

gewichtigeren wirtschaftlichen Randbedingungen zu beachten. Die Schwierigkeit besteht dabei in der Quantifizierung der Wirtschaftlichkeit einer medizinisch-technischen Innovation bzw. in der Erarbeitung einer Kosten-Nutzen-Analyse für verschiedene Entwicklungskonzepte aus Sicht der Gesundheitsversorgung.

Die rechtliche Grundlage des deutschen Gesundheitssystems bzw. den Versorgungsanspruch für alle Versicherten bildet das Sozialgesetzbuch V. Es legt in §12 fest, dass Versicherte eine ausreichende und zweckmäßige Versorgung erhalten müssen, stellt jedoch gleichzeitig fest, dass diese wirtschaftlich erbracht werden muss. Die Aufgabe der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von medizinischen Leistungen wird durch das Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen (IQWiG) (§139a) erfüllt.

Das IQWiG geht bei seinen Betrachtungen methodisch davon aus, dass medizinische Innovationen mit denjenigen Alternativen verglichen werden sollten, welche in der Praxis am häufigsten angewendet bzw. klinisch am wirksamsten sind. Dies sind bei der Behandlung von schweren Verbrennungen aktuell der Einsatz des Meek- und Mesh-Verfahrens. Im Hinblick auf die bisher erarbeiteten konzeptionellen Ansätze kann davon ausgegangen werden, dass eine neue Technologie für die Transplantation von Mikropartikeln die bisherigen Anschaffungskosten für diese Geräte deutlich übersteigen wird. Die Betrachtung der reinen Investitionskosten ist jedoch unter der Betrachtung der Gesamthandlung als Prozess sowie der Gegebenheiten der Finanzierung eines Klinikbetriebes bzw. des Gesundheitssystems in Deutschland unzulänglich und bedarf wesentlicher Erweiterungen der Kostenbetrachtung.

Ebenso wie bei der Beschaffung neuer Betriebsmittel in Produktionsunternehmen sollte für eine gesicherte Entscheidung eine Erweiterung der Kostenbetrachtung auf den Produktlebenszyklus erfolgen. Im Hinblick auf die dem operativen Prozess der Transplantation direkt zurechenbaren Kosten sind dies z. B. die für die angewandte Technologie notwendigen Verbrauchs- und Verschleißmaterialien (z. B. spezielle Trägermaterialien oder Schneidelemente), Kosten für Personalmehraufwand im Prozess, die Notwendigkeit des Einsatzes von spezialisiertem Personal zur Gerätebedienung oder längere Operationsdauern. Die Beschränkung der Kostenbetrachtung auf die Einzelmaßnahme der operativen Wunddeckung greift dabei jedoch zu kurz, da dieser Behandlungsschritt in seinem medizinischen Ergebnis die Gesamtkosten der Behandlung bis zur vollständigen Genesung weitreichend beeinflusst.

Bei der Betrachtung der Kosten einer Krankheit können drei Kostenkategorien unterschieden werden. Die direkten Kosten enthalten den unmittelbaren Ressourcenverbrauch, welcher bei Inanspruchnahme von Gesundheitsleistungen entsteht und weitestgehend quantifizierbar ist. Darunter fallen alle Leistungen der ambulanten und stationären Versorgung sowie Arznei- und Hilfsmittel, aber auch Kosten für Rettungsdienste oder Verwaltungskosten der Leistungserbringer. Demgegenüber sind die indirekten sowie die intangiblen Kosten nur schwer bzw. nicht quantifizierbar. Indirekte Kosten bilden den Ressourcenverlust durch Produktionsausfälle aufgrund von Arbeitsunfähigkeit, Invalidität oder Tod ab. Intangible Kosten beinhalten den Verlust an Lebensqualität etwa durch Einschränkungen aufgrund von Schmerzen oder Depressionen, welche aus der Erkrankung resultieren. [7]

Ziel der Transplantation von Mikrogewebspartikeln ist die Erreichung höherer Expansionsraten bei gleichzeitig schnellerer Wundheilung mit verbesserten funktionellen und ästhetischen Ergebnissen. Die angestrebte Verbesserung des medizinischen Ergebnisses der Behandlung bzw. des „Nutzens“ kann die Gesamtkosten der Behandlung aus Sicht der Krankenversicherungen deutlich minimieren. Neben einer Reduzierung der primären Kosten, z. B. durch Verkürzung der Liegedauer, der Reduzierung der notwendigen Anzahl an Operationen oder der Vermeidung des Einsatzes teurer Hautersatzmaterialien, zählen dazu auch Einsparungen in den sekundären Kosten für Rehabilitations- und Folgebehandlungsmaßnahmen, z. B. in Form von chirurgischen Narbenkorrekturen. In einer erweiterten Betrachtung ergeben sich aus Sicht der Sozialversicherungen weitere Einsparungen für Pflege- und Rentenaufwendungen bei verkürzten Zeiten zur Wiederherstellung der Patienten unter einer Minimierung der körperlichen Einschränkungen. Aus dieser erweiterten Perspektive würde sich die notwendige Investition in eine Technologie zur Behandlung von Schwerbrandverletzten mittels Mikrogewebspartikeln schnell amortisieren und auch Mehrkosten des eigentlichen Behandlungsschrittes der Transplantation über den gesamten Krankheitsverlauf ausgleichen können. Die Problematik im Klinikbetrieb besteht jedoch darin, dass die entstehenden Kosten der Behandlung durch entsprechende Erlöse gedeckt sein müssen. Die Abrechnung von stationären Leistungen erfolgt im deutschen Gesundheitswesen über DRG-Fallpauschalen, wobei die angewandten Behandlungsverfahren im sogenannten OPS-Code hinterlegt sind. Das Kapitel 5-92 beinhaltet dabei Operationen an der Haut nach Verbrennungen und Verätzungen und bildet auch das Verfahren der Mikrograft-

Spalthautdeckung nach Meek (OPS-Code 5-925.7) ab. In Betrachtung eines Krankenhauses als wirtschaftliche Unternehmung ist es das Ziel, die Differenz zwischen DRG-Erlös und Ressourceneinsatz zu maximieren. Ziel muss es daher sein, eine Technologie zu entwickeln, die es dem Krankenhaus ermöglicht kostendeckend zu arbeiten. Dafür ist es notwendig, neben den bereits ermittelten medizinischen Anforderungen des Behandlungsergebnisses zur Technologieauswahl auch die Anforderungen an die Durchführung der Behandlung insbesondere unter Berücksichtigung der dabei entstehenden Kosten zu ermitteln. Wesentlich ist dabei, relevante Kostentreiber der Behandlung zu identifizieren und durch gezielte Entwicklungen positiv zu beeinflussen.

Literatur

[1] Kamolz, L.-P.; Herndon, D. N.; Jeschke, M. G. [Hrsg]: *Verbrennungen – Diagnose, Therapie und Rehabilitation des thermischen Traumas*. Wien: Springer Verlag, 2009

[2] Pallua, N.; von Bülow, S.: Behandlungskonzepte bei Verbrennungen – Teil II: Technische Aspekte. In: Chirurg. (2006) 77:179-188

[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. (1974), 14 (5): 389-395.

[4] Vogt, P. M.; Kolokythas, P.; Niederbichler, A.; Knobloch, K.; Reimers, K.; Choi, C. Y.: *Innovative Wundtherapie und Hautersatz bei Verbrennungen*. In: Chirurg. (2007) 78: 335-342

[5] Jostkleigrewe, F.: Behandlungsstrategien bei Brandverletzungen. In: Trauma Berufskrankh. (2005) 7:185-193

[6] 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. (1994) 20:39-42

[7] Robert Koch-Institut [Hrsg.]: Gesundheitsberichterstattung des Bundes – Heft 48: Krankheitskosten. Berlin, 2009

Entwicklung und Herstellung künstlicher Felsenbeinpräparate mittels Rapid-Prototyping Verfahren für die Optimierung von Cochlea-Implantat Operationen

Fabian Klink[1], Kevin Kuhlmann[1], Joachim Döring[2], Cornelia Hahne[3], Ulrich Vorwerk[3]

[1]Institut für Maschinenkonstruktion, OvGU Magdeburg
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: fabian.klink@ovgu.de, kuhlmann@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/

[2]Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, OvGU Magdeburg
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: joachim.döring@ovgu.de; Internet: http://www.ifq.ovgu.de

[3]Universitätsklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde, OvGU Magdeburg
Leipziger Straße 44, 39120 Magdeburg
Email: cornelia.hahne@med.ovgu.de, ulrich.vorwerk@med.ovgu.de
Internet: http://www.med.uni-magdeburg.de/khno.html

Inhalt: *Cochlea-Implantat Operationen bei hochgradig schwerhörigen und tauben Patienten stellen Chirurgen regelmäßig vor großen medizinischen Herausforderungen. Um auf mögliche Komplikationen routiniert und schnell reagieren zu können, ist es unerlässlich die Operationen detailgetreu und genau zu planen. Derzeit verwendete Leichenpräparate der Innenohrstrukturen sind nur in einem begrenzten Umfang vorhanden. Die Entwicklung und Herstellung von individuell auf den Patienten adaptierten Operationsmodellen ist deshalb für die Operationsvorbereitung und die Ausbildung dringend notwendig. Neue Rapid-Prototyping Fertigungsprozesse und Hochauflösende Computertomographieanlagen für die Fertigung künstlicher Innenohrstrukturen bieten dafür die Forschungsgrundlage.*

Abstract: *Surgeons are continuously confronted with huge medical challenges while performing Cochlear implant surgeries on profoundly or completely deaf patients. It is therefore essential to plan the operations carefully and very detailed to be able to react quickly and experienced to occurring complications. Currently used compounds of the inner ear structure are taken from organ donors and thereby only available in a very limited amount. The development and manufacturing of personalized artificial models is absolutely essential for training and the preparation of the surgeries. The scientific basis for the manufacturing of artificial inner ear structures is given by new production processes in Rapid-Prototyping and high-resolution computer tomography systems.*

Stichwörter: *Rapid Prototyping, Cochlea-Implantat Operationen, künstliche Innenohrstrukturen*
Keywords: *rapid prototyping, cochlea-implant surgery, artificial inner ear structures*

1 Einleitung

In Deutschland führen die Universitäts-HNO-Kliniken und eine Reihe weiterer großer Kliniken im Jahr über 1000 Cochlea-Implantat-Operationen (CI-Operation) durch. Für diese komplexe Operationsmethode ist eine spezifische chirurgische Ausbildung und ein Training an anatomischen Modellen Voraussetzung. Der operative Vorgang besteht im Wesentlichen aus der Schaffung eines mechanischen Zugangs zur Hörschnecke (Cochlea). Um das Einbringen eines sehr dünnen spiralförmigen Elektrodenträgers in den Hohlraum der Hörschnecke zu gewährleisten, ist ein hochpräziser Fräs- und Bohrvorgang durch das Felsenbein im sub-mm-Bereich notwendig. Trainingskurse stehen aufgrund fehlender Leichenpräparate (siehe Bild 1) nur ungenügend zur Verfügung, wodurch das Risiko einer missglückten CI-Operation erhöht wird. Eine CI-Operation kostet ca. 35.000 € und ist für eine Klinik nur wirtschaftlich durchführbar, wenn OP-Fehler bzw. Fehlplatzierungen des Elektronenträgers vermieden werden. Der Totalverlust eines elektronischen Implantats (Kosten 25.000 €) ist dabei der Hauptkostentreiber [1].

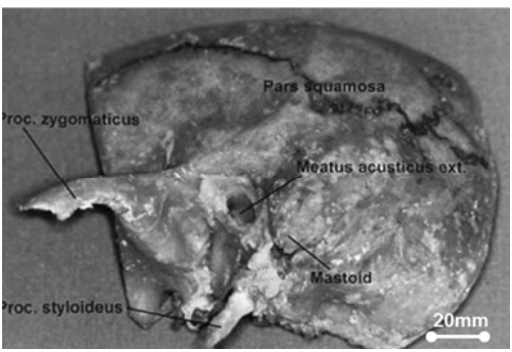


Bild 1: Leichenpräparat des menschlichen Felsenbeins

Die aktuell auf dem Markt befindlichen Gips-Kunststoffmodelle und CI-Operationssimulationen können technologiebedingt keine freien Hohlräume in der Felsenbeinstruktur generieren und eignen sich damit nur bedingt für eine Operationsvorbereitung.

Da der Anteil von CI-Operationen an Kindern bzw. Kleinstkindern aktuell ca. bei 55%-60% liegt, kann die Verwendung von Leichenpräparaten nur eingeschränkt auf eine Operation

vorbereiten. Die kleinen feinen Strukturen verlangen dem Chirurgen ein Höchstmaß an operativem Geschick ab und sind mit Leichenpräparaten eines ausgewachsenen Menschen nur beschränkt zu vergleichen. Außerdem liegt der Anteil an Fehlbildungen des Innenohrs bei angeborener Taubheit bei 15%-20%, was zusätzlich eine erhebliche Herausforderung für den Chirurgen bedeutet [2].
Aufgrund der genannten Problematiken und um eine möglichst realitätsnahe Operationssimulation im Vorfeld durchzuführen, ist es wünschenswert individuelle Felsenbeinmodelle mit den speziellen Hohlraumstrukturen des betroffenen Patienten herzustellen. Dadurch ist es in Zukunft möglich, schonendere Operationen mit geringeren Nebenwirkungen und einer geringeren postoperativen Komplikationsrate erfolgreich durchzuführen.

2 Evaluation von Rapid Prototyping Verfahren

Für die Erzeugung des künstlichen Felsenbeins mit integrierten Hohlraumstrukturen ist es notwendig, ein geeignetes RP-Verfahren zu evaluieren. Dafür mussten verschiedene auf dem Markt befindliche RP-Anlagen geprüft werden, die auf unterschiedlichen generativen Fertigungsprinzipen beruhen. Die Auswahl einer geeigneten RP-Anlage ist einer der ersten Schritte, um das Forschungsvorhaben erfolgreich zu gestalten.
Aufgrund der verschiedenen Forschungspartner war es möglich auf unterschiedliche RP-Anlagen zurückzugreifen. Diese wurden im Vorfeld auf vier Anlagen eingegrenzt, da mit denen die vielversprechendsten Ergebnisse zu erwarten waren. Auf diesen Anlagen konnten testweise die künstlichen Felsenbeinmodelle gefertigt werden, um sie dann auf ihre Eignung hin zu überprüfen. Die verschiedenen Bewertungskriterien durften sich nicht nur auf die Herstellung des künstlichen Felsenbeins beziehen, sondern mussten auch auf eine spätere breite Forschungsnutzung für Konstruktionstechnische Problemstellungen am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Magdeburg abgestimmt werden.

Die menschliche Felsenbeinstruktur besteht aus verschiedenen Knochenschichten, die in ihrer Härte und dem Aufbau unterschiedlich ausgeprägt sind. Diese Struktur ist durchzogen von kleinen Hohlräumen, feinen Verzweigungen und der filigranen Hörschnecke (Cochlea). Diese muss möglichst detailgetreu abgebildet werden, damit eine möglichst realitätsnahe Operation simuliert werden kann. Mit Porengrößen ab ca. 0,01mm

können die auf dem Markt befindlichen RP-Anlagen eine detailgetreue Darstellung nicht 100% gewährleisten. Die angegebenen Schichtdicken, die die RP-Anlagen in der Lage sind zu fertigen, können ein Indiz für eine möglichst realitätsnahe Herstellung des künstlichen Felsenbeinmodells sein und sind somit das erste Auswahlkriterium.

Natürlich sollte ein Präparationsmodell den haptischen Charakter und den Festigkeitsansprüchen des Originals entsprechen. Dafür ist ein RP-Material wünschenswert, dass im Härtegrad, im Elastizitätsmodul und der Streckgrenze dem Knochen ähnelt. Keine der zur Verfügung stehenden Materialien besitzen die originalgetreuen Eigenschaften der Knochenstruktur. Für den Erfolg des Projektes ist somit eine Weiterentwicklung der RP-Materialen in einem erreichbaren Rahmen notwendig. Die vorhandenen RP-Materialien, der verschiedenen RP-Anlagen, bilden den Materialentwicklungsstartpunkt und sollten deshalb in nur einem kalkulierbaren Rahmen von den Eigenschaften des Knochens abweichen.

Bei den auf dem Markt befindlichen generativen Fertigungsverfahren wird in der Regel Supportmaterial verwendet, um die Baukonturen eines Modells während der Fertigung abzustützen. Auch in den Hohlraumstrukturen des künstlichen Felsenbeins befindet sich bei jeder untersuchten RP-Anlage nach dem Fertigungsprozess Supportmaterial, was vor der Operationssimulation entfernt werden muss. Dieses Supportmaterial unterscheidet sich je nach RP-Technologie in der Zusammensetzung und der Konsistenz. Die Möglichkeit das Supportmaterial aus den feinen Hohlraumstrukturen zu entfernen stellt, ein wichtiges Anforderungskriterium dar.

Eine kostentechnische Bewertung der verschiedenen RP-Anlagen muss außerdem durchgeführt werden, da sich die Anlagen im Anschaffungspreis teilweise deutlich unterscheiden.

Das Felsenbein unterscheidet sich von Mensch zu Mensch in der prinzipiellen Struktur und dem Aufbau. In einer Bauraumgröße von 60x60x60mm kann der generative Herstellungsprozess, des künstlichen Felsenbeins, gemeinhin 1:1 abgebildet werden. Die vorher ausgewählten RP-Anlagen besitzen einen ausreichenden Bauraum. Für die sinnvolle Eingliederung in den Maschinenpark ist es aber wünschenswert eine RP-Anlage mit einem angemessenen Bauraum auszuwählen, um für weitere Forschungsprojekte nicht zu sehr limitiert zu sein. Die Bauraumgröße ist somit das fünfte Auswahlkriterium.

Die erste getestete RP-Anlage ist die EDEN 330 der Firma Objet Geometries Ltd., die auf dem PolyJet Verfahren beruht. Hierbei werden dünne Schichten des UV empfindlichen

Modell- und Supportmaterials mit einem Druckkopf aufgetragen und mittels UV-Lampen ausgehärtet. Es sind verschiedenste Harze einsetzbar, die sich durch Elastizität und/oder Härte auszeichnen können und damit ein breites Anwendungsspektrum besitzen. Das Supportmaterial ist gallertartig und lässt sich nur erschwert aus den feinen Hohlraumstrukturen entfernen. Für die Testweise Fertigung wurde das Material FullCure®720 verwendet. Diese Anlage gehört zum Maschinenpark des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik der Universität Magdeburg und würde damit kostenneutral genutzt werden können [3].

Mit der Viper Pro SLA® Anlage der Firma 3D Systems GmbH konnte auf das generative Verfahren Stereolithographie zurückgegriffen werden. Die höhenverstellbare Bauteilplattform befindet sich in einem Kunstharzbad. Mit Hilfe eines Lasers werden dünne horizontale Schichten ausgehärtet. Großer Vorteil dieser Technologie ist das flüssige Supportmaterial, was durch einen vergleichsweisen geringen Aufwand entfernt werden kann [3].

Das Unternehmen Innovation Medi Tech GmbH vertreibt in Deutschland eine neuartige Stereolithographieanlage D30. Im Unterschied zu der Viper Pro SLA® wird das Kunstharz nicht durch Lasertechnologie sondern durch LED UV-Beleuchtung ausgehärtet. Der Vorteil ist eine bessere Energieeffizienz und Zuverlässigkeit. Aktuell befindet sich diese Technologie in der Markteinführung, was der Grund für eine nur begrenzte Materialauswahl ist.

Die vierte RP-Anlage auf der das künstliche Felsenbein gefertigt wurde, beruht auf dem generativen Verfahren des Selective Inhibition Sintering (SIS). Hierbei wird auf die Bauteilplattform pulverförmiges Material aufgebracht und an den gewünschten Stellen großflächiger Wärmestrahlung ausgesetzt und aufgeschmolzen. Das Supportmaterial des ZPrinter® 310 Plus der Firma Z Corporation besteht ebenfalls aus Pulver und kann entfernt werden. Die feinen Partikel können sich aber in den feinen Hohlraumstrukturen festsetzen [3].

In der folgenden Tabelle 1 wurden die fünf verschiedenen Auswahlkriterien den vier untersuchten RP-Anlagen gegenüber gestellt und nach der Nutzwertanalyse bewertet. Die Gewichtung und Bewertung der einzelnen Kriterien erfolgte in Zusammenarbeit mit den Erfahrungsträgern des HNO-Universitätsklinikums und den am Forschungskonsortium beteiligten Instituten der Fakultät für Maschinenbau der Universität Magdeburg [4].

Tabelle 1: Nutzwertanalyse

Kriterien \ RP-Anlagen		Gew.	EDEN 330 (Objet Geometries)	ViperPro SLA® (3D Systems)	D30 (Innovation Medi Tech)	ZPrinter® 310 Plus (Z Corp)
I	Fertigungsschicht	20%	0,016-0,084mm 8	0,05-0,15mm 7	0,03mm 9	0,089-0,203mm 4
II	Material-eigenschaften (E-Modul)	20%	FullCure 720: 2870MPa 6	AcuraBlue-stone: 7600-11700MPa 9	Foto Dent LED A implant: 1700-2200MPa 3	Granulat auf Gips-und Stärkebasis: ca.1500MPa 2
III	Eigenschaften Supportmaterial	30%	gallertartig (klebrig) 2	flüssig (einfach abwaschbar) 9	flüssig (einfach abwaschbar) 9	fest (feines Granulat) 5
IV	Anlagenkosten	20%	160.000€ 10*	460.000€ 2	280.000€ 4	31.200€ 8
V	Bauraumgröße	10%	340x330x200 mm 8	750x650x550 mm 10	255x765x150 mm 6	203x254x203 mm 5
∑		100%	62%	73%	65%	48%

*Bestandteil des Maschinenparks vom Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

3 Auswahl des geeigneten Rapid Prototyping Verfahrens

Nach der testweisen Herstellung diverser künstlicher Felsenbeinstrukturen auf den vier verschiedenen RP-Anlagen ist nach Auswertung der Bewertungskriterien eine Modellfertigung auf der Viper Pro SLA® Anlage der Firma 3D Systems GmbH wünschenswert (siehe Tabelle 1). Mit der zugrundeliegenden Stereolithographietechnolgie besteht die Möglichkeit die Felsenbeinmodelle so zu fertigen, dass die gestellten Anforderungen der HNO Chirurgen am besten erfüllt werden können, um eine optimale Operationsvorbereitung sicher zu stellen. Besonders die flüssige Supportmaterial-eigenschaft ist ein großer Vorteil dieser Technologie. Bei der Schaffung eines mechanischen Zugangs mit Hilfe von Bohr- und/oder Fräswerkzeugen durch das Mastoid des Felsenbeines entsteht Wärme und Staub, welche unter ständiger Wasserkühlung abgeführt werden. Dieser kontinuierliche Wasserfluss kann bei einer Operationssimulation auch für die einfache Auswaschung des flüssigen Supportmaterials verwendet werden.

In Bild 2 sind die ersten testweise gefertigten künstlichen Felsenbeinmodelle zu sehen, an denen Präparationsübungen vorgenommen wurden. Durch Schaffung dieses mechanischen Zugangs, der sogenannten Masteoidektomie, ist es dem HNO-Chirurgen

möglich die genaue Position der Hörschnecke zu identifizieren und schon im Vorfeld auftretende Komplikationen zu erkennen. In die Hörschnecken kann nun ein kleiner feiner Draht (Stimulationselektroden) eingeführt werden, der mittels elektromagnetischer Induktion mit Spannung versorgt wird und dann in der Lage ist Geräuschsignale zu übertragen [5].

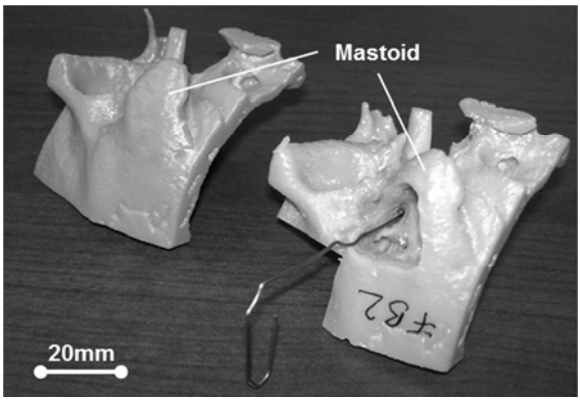


Bild 2: künstliches Felsenbein mit mechanischem Zugang (rechts)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des generativen Fertigungsverfahrens Stereolithographie konnte gezeigt werden, dass eine prinzipielle Herstellung des künstlichen Felsenbeinmodells des Menschen erreichbar ist. Entscheidend für ein möglichst realitätsnahes Operationsmodells war die Erzeugung der kleinen Hohlraumstrukturen und der fein strukturierten Hörschnecke. In ersten Bohr- und Fräsversuchen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist das flüssige Supportmaterial auszuwaschen und damit die feinen Strukturen offen zu legen.

Um ein künstliches Felsenbeinmodell zu entwickeln, das den Anforderungen der HNO-Chirurgen genügt müssen noch verschiedene Bereiche optimiert werden. Unter anderen ist die Entwicklung einer Segmentierungssoftware geplant, mit der CT-Daten eines Patienten deutlich einfacher segmentiert und in eine Universaldatenschnittstelle (STL-Datensatz) umgewandelt werden können. Damit ist eine Fertigung auf RP-Anlagen

möglich. Zukünftige Materialweiterentwicklungen sind geplant, um die Eigenschaften des RP-Materials an die Knocheneigenschaften anzugleichen.

Literatur

[1] Vorwerk, Ulrich; Begall, Klaus: *Präparierübungen am künstlichen Felsenbein Herstellung von Felsenbeinfaksimiles durch Stereolithographie.* In: HNO 46, Nummer 3 (1998), S. 246-251

[2] Ernst, Arne; Battmer, Rolf-Dieter; Todt, Ingo: *Cochlea Implantat heute*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-88235-0

[3] Hoyer, Johannes; Uhl, Christian; Beyer, Christiane: *Virtual & Rapid Prototyping: Bestandsaufnahme aktueller Produkte und deren Einsatz.* Düsseldorf: VDI Verlag, 2006. – ISBN 3-18-365602-7

[4] 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

[5] Mühler, Roland; Ziese, Michael: *Technischer Leitfaden Cochlea-Implantat.* Universitäts-HNO-Klinik Magdeburg, 2010

Analyse dentaler Implantate ausgehend von natürlichen Zähnen unter Berücksichtigung der Konstruktionsmethodik im Allgemeinen und Leitstütz-Strukturen im Speziellen

D. Lemmer, J. Feldhusen, S. Wolfart*, K. Haselhuhn*

Universität Aachen, Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl und Institut für allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstrasse 54B, 52074 Aachen
Email: lemmer@ikt.rwth-aachen.de, feldhusen@ikt.rwth-aachen.de; Internet: http://www.ikt.rwth-aachen.de

*Universitätsklinikum Aachen, Medizinische Fakultät
Klinik für Zahnärztliche Prothetik, Implantologie und Biomaterialien
Pauwelsstraße 30, 52074 Aachen
Email: swolfart@ukaachen.de, khaselhuhn@ukaachen.de; Internet: http://www.ukaachen.de

Inhalt: *In der vorliegenden Arbeit werden anhand des Leitstütz-Strukturen-Modells mit Wirkflächenpaaren nach S. Matthiesen und des „C&CM“ nach A. Albers der natürliche Zahn als idealer Funktionsträger und jeweils ein gestecktes und ein geschraubtes Implantat-System gegenübergestellt und verglichen, um in einer folgenden Analyse Schwachstellen von neuartigen Implantat-Aufbauverbindungen aufzeigen zu können.*

Hierzu werden zunächst Aspekte der Funktion, der Krafteinleitung durch die Okklusion mit dem bzw. den Antagonisten, der Struktur und des Aufbaus eines menschlichen Zahnes sowie seines sogenannten Zahnhalteapparates bis hin zum Knochen betrachtet und dabei die physikalischen Effektträger identifiziert. Ausgehend vom Gesamtkonzept des Produktes „menschlicher Zahn“ werden die wesentlichen Wirkflächenpaare und Wirkkonzepte aufgezeigt. Hierbei ist vor allem der Zahnhalteapparat, mittels dessen der Zahn in den Kiefer integriert ist, von Interesse, da hierdurch eine Druckbelastung auf den Zahn in eine Zugkraft auf den Knochen gewandelt wird. Diese Kraftwandlung ist aus biologischer Sicht notwendig, da der menschliche Knochen unterschiedlich auf Druck und Zug reagiert. Das Fehlen des Zahnhalteapparates hat wiederum Folgen für die Lebensdauer der Implantate, da hierbei eine wesentlich andere Form der Kraftweiterleitung stattfindet. Die Einleitung der Zug- und Druck-Kräfte auf den Knochen ist hier von entscheidender Bedeutung. Ausgehend vom System „natürlicher Zahn“ wird dann der „Implantat-Ersatz“ gegenübergestellt, wobei vor allem betrachtet wird, welche wesentlichen Unterschiede sich in der mechano-biologischen Reaktion der Knochenzellen auf die jeweiligen Belastungen ergeben.

Abschließend erfolgt die gegenüberstellende Analyse von jeweils einem gesteckten und einem geschraubten Implantat-System. Hierbei erfolgt die Untersuchung und Analyse ebenfalls nach dem Leitstütz-Strukturen-Modell, wobei vor allem die Kraftweiterleitung der Aufbauten in das Implantat untersucht wird.

Abstract: *The present study is based on the element model "Working Surface Pairs & Channel and Support Structures" by S. Matthiesen and the "C & CM" introduced by A. Albers. These Methods are applied to the natural tooth as a perfect office-holders, and both technical systems - a plugged and a screwed implant system. The results are compared within a following analysis to demonstrate weaknesses of novel implant-abutment connections.*

Therefore aspects of the force brace function caused by the occlusion with the antagonist are considered as well as the structure of a human tooth, and his periodontium to identify physical carrier effects. Based on the overall concept of the product "of human tooth," the essential concepts of active and effective surface pairs are shown. Especially the periodontium is of interest, as this converts a compressive load on the tooth into a tensile force to the bone. The power conversion is necessary from a biological point of view, since the human bone responds differently to pressure and train. The absence of the gums in turn has consequences for the life of the implants, since this causes a much different form of power forward. The introduction of drag and pressure forces on the bone is of crucial importance. Starting from the system of "natural teeth" the "implant replacement" is faced, especially with regards is that significant differences occurred in the mechano-biological response of bone cells to the respective loads. Finally a plugged and screwed implant system are compared. Here, the investigation and analysis is done considering the C&CM, where most notably the power forward of the superstructure is studied in the implant.

Stichwörter: *Konstruktionsmethodik, Dental, Implantologie, Leitstütz-Strukturen*

Keywords: *engineering design methodology, dental, implantology, C&CM*

1 Einleitung

Die evolutionär entwickelte Konstruktion des humanen Zahnes ist auf den lebenslangen Gebrauch optimiert. Nach 50 Jahren liegt die Überlebenswahrscheinlichkeit bei 99,5% gesunde parodontale Verhältnisse vorausgesetzt [1]. Das Risiko einen oder mehrere Zähne zu verlieren, erhöht sich mit steigendem Alter durch Erkrankungen wie Karies, Parodontopathien, Bruxismus oder genetische Defekte. Hinzu kommen Faktoren wie Traumata und Nichtanlagen [2]. Kommt es zum Zahnverlust, stellt sich die Frage nach den Versorgungsmöglichkeiten, die einen Lückenschluss und die Wiederherstellung der gestörten Funktionen in Bereichen der Ästhetik, Phonetik und der Mastikation ermöglichen. Eine substanzschonende Alternative zur Versorgung der Einzelzahnlücke bieten dentale Implantate, vor allem für den Fall von gesunden Nachbarzähnen [3]. Dieser künstliche Zahnwurzelersatz (Implantat-Körper) stellt zumeist über Schraubverbindungen die Kopplung von Kieferknochen mit Implantat und mit dem sichtbaren Zahnkronenersatz (Implantat-Aufbau) her. Die durchschnittliche Überlebenswahrscheinlichkeit dieser in den Kieferknochen eingewachsenen, künstlichen Zahnwurzeln liegt nach 10 Jahren zwischen

80 und 90% [1]. Allerdings treten in dieser Funktionsphase neben biologischen Komplikationen (Entzündungsreaktionen am Knochenimplantatverbund mit Knochenabbau) auch mechanisch-technische Fehler auf. Dabei zeigen sich in 12,7% der Fälle Schraubenlockerungen, bei 0,38% Schraubenbrüchen und bei 0,38% Frakturen der Aufbauten [4]. Neue Implantatsysteme mit einer schraubenfreien steck-kleb Verbindung zwischen Implantat-Körper und Implantat-Aufbau wurden entwickelt, um diese Komplikationen zu reduzieren oder sogar zu beseitigen. In der vorliegenden Analyse werden diese Verbindungssysteme in ihrem Idealzustand verglichen. Durch experimentelle Untersuchungen werden die Ergebnisse des theoretischen Vergleichs belegt.

2 Grundlagen – Stand der Technik und Forschung

2.1 Aufbau Implantat System im Vergleich zum natürlichen Zahn

In den folgenden Abbildungen sind exemplarisches ein gestecktes und ein geschraubtes Implantat System dargestellt und einem natürlichen Zahn gegenübergestellt.

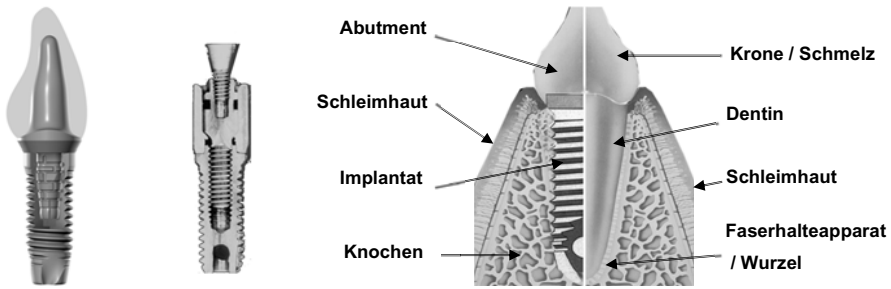


Bild 1a/1b: Implantate gesteckt/geschraubt - Bild 1c: Gegenüberstellung Implantat und natürlicher Zahn

Ohne Kaubelastung heilt das Implant nach dem chirurgischen Einbringen in den Kieferknochen in der Regel nach 6 bis 12 Wochen ein. Danach beginnt die prothetische Herstellung der Zahnkrone, die über einen Implantataufbau mit dem Implantatkörperverbunden wird. In *Bild 1* sind die Varianten „verschraubt“ und „geklebt“ in Schliffbildern dargestellt. Am Anfang der Funktionsphase (Remodelling Phase) kommt es durch die kaufunktionelle Belastung zu Umbaubauvorgängen der periimplantären Knochenstrukturen. Diese ist nach ca. 12 Monaten abgeschlossen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Osteoklasten- und -blastenaktivität ein. Im Gegensatz zum

natürlichen Zahn, der in den Sharpeyschen Fasern aufgehangen und im Zahnfach in Gewebe und Gewebsflüssigkeit gelagert ist, ist der Implantat-Körper dann direkt in den Knochen eingewachsen.

2.2 Methode der Leitstützstrukturen (LSS)

Tabelle 1: Begriffsübersicht Leitstützstrukturen nach Matthiesen [5]

	Flächenelemente		Körperelemente		Auftreten
Bauteil-ebene	Wirkfläche	WF	TS	Tragstruktur	Zu jeder Zeit
	Begrenzungsfläche	BF	RS	Reststruktur	
System-ebene	Wirkflächenpaar	WFP	LSS	Leitstützstruktur	Temporäres Auftreten möglich
	(Funktionskontakt)	FK			

In der Begrifflichkeit des Modells der Leitstützstrukturen sind Bauteile die Elemente auf der niedrigsten Hierarchiestufe, aus denen sich die Systeme zusammensetzen lassen. Auf der Systemebene wird unterschieden zwischen der Wirkstruktur, die sich aus den Flächenelementen Wirkflächenpaar/ Funktionskontakt zusammensetzt, und der sie verbindenden Leitstützstruktur aus den einzelnen Tragstrukturen. Hierbei wird der Output eines Elements / Systems mit den Inputs des anderen Elements/Systems gekoppelt, wobei das physikalische Prinzip actio = reactio gilt. Die Beschreibung mittels Reststruktur und Begrenzungsflächen kann je nach Betrachtungsweise und Standpunkt variieren. Nach Lemburg können somit z.B. Seitenflächen an Messern je nachdem sowohl als Begrenzungsfläche der Reststruktur als auch als Wirkfläche einer Störfunktion betrachtet werden [6].

3 Voraussetzungen, Randbedingungen und Annahmen

Für die folgende Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit, sind gewisse Vereinfachungen, Idealisierungen und Annahmen notwendig, um die Modelle nicht unnötig komplex werden zu lassen. Somit wird hier exemplarisch ein Zahn des menschlichen Gebisses, welches in voller Bezahnung 32 Zähne umfasst, betrachtet. Zu punktförmigen okklusalen und approximalen Kontakten zwischen den Zähnen, sofern das Gebiss nicht durch pathologischen Bruxismus oder Atrition geschädigt ist. Beim natürlichen Zahn mit seinen Rezeptoren im Parodontium schützt ein physiologischer neuromusklärer Reflexbogen das stomatognathe System vor zu hohen Belastungen. Dieses System ist beim Implantat nur noch reduziert vorhanden.

3.1 Annahmen

Der menschliche Zahn wird als starrer Körper angenommen. Die Kraftleitung in weitere Weichgewebsstrukturen wie der Gingiva (Zahnfleisch) und der Pulpa wird im Verhältnis zu den Hauptstrukturen wie dem Zahn, dem Knochen und dem Parodontium vernachlässigt.

3.2 Krafteinleitung

Die Krafteinleitung geschieht oftmals von einem Zahn auf bis zu zwei Zähne verteilt auf mehrere Kontaktstellen. Hier wird der Fall exemplarisch betrachtet, in dem ein einfacher Kontakt an einer Stelle zwischen einem oberen und dem antagonistischen Eckzahn stattfindet. Als Winkel der Krafteinleitung werden α_1 = 0° (axiale Belastung) und α_2 = 30° (Belastung entsprechend DIN 14801) betrachtet. Im Fall von α_2 kommt es zur Querkräft F_q mit

$$F_q = \sin\alpha * F_D \tag{1}$$

Mit der Annahme α = 30° folgt somit aus Gleichung (1), dass $F_q=0{,}5\ F_D$ ist. Bei einer nach Literaturwerten angenommen maximalen Bißkraft von 500N auf dem dritten Zahn links unten (Zahn 33) folgt somit eine Querkraft von bis zu 250N.

4 Analyse der Implantat-Systeme / des natürlichen Zahnes

Im Folgenden wird ein gestecktes, geklebtes Implantatsystem mit einer geschraubten Variante theoretisch und in Laborversuchen analysiert und dem Zahn 33 gegenübergestellt. Die Krafteinleitung erfolgt jeweils unter 0° (senkrecht) und unter 30°.

4.1 Theoretischer Vergleich der Systeme

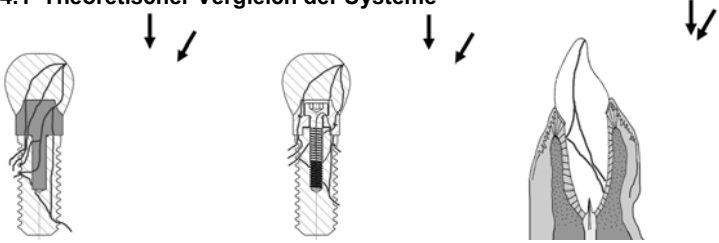


Bild 2: Gegenüberstellung gestecktes und geschraubtes Implantat System mit natürlichem Zahn

Im geklebt-gesteckten System werden die Querkräfte über den Zapfen und die Axialkräfte über die Stirnflächen geleitet. Im geschraubten System ist der Kraftschluss über die

Schraube zwischen Abutment und Implantat gemäß Pahl/Beitz [7] kurz und geschlossen, jedoch führen exzentrisch wirkende Kräfte zu Belastungen jenseits elastischer Bereiche zum Versagen der Schraubverbindung. Im geschraubten System ist vor allem die Stufe ein Vorteil in Bezug auf die Ableitung der Querkräfte (bis zu 50% der Normalkraft). In beiden Systemen erfolgt die Ableitung der Kräfte in den Knochen als Druckkraft. Beim natürlichen Zahn hingegen erfolgt die Ableitung der Kräfte als Kombination von Druckkraft auf das Flüssigkeitspolster und vor allem aufgrund der Sharpeyschen Fasern als Zugkraft auf den Knochen, was für die Biologische Reaktion des Knochens entscheidend ist.

4.2 Experimentelle Laborversuche an den Implantat-Systemen

Entsprechend der theoretischen Analyse wurden Experimente an den Systemen durchgeführt. Die Verformung der Aufbauten wurde durch DMS-Applikation auf den Original Bauteilen erfasst. Durch Licht- und Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurde die relative Bauteilbewegung unter Last dargestellt. *Bild 3* zeigt den fügebedingten, gleichmäßigen Restspalt von im Mittel 12,5 µm bei dem gesteckt geklebten System. Die Krafteinleitung von 500N unter dem Winkel von 30° kippt im geschraubten System das Abutment und es kommt initial zu einem punktförmigen Kontakt, der unter Wechsellast durch Abrieb flächig wird. Die Schraubverbindung zeigt hier unter hoher Belastung ein Öffnen der Schnittstelle zwischen Implantat und Abutment.

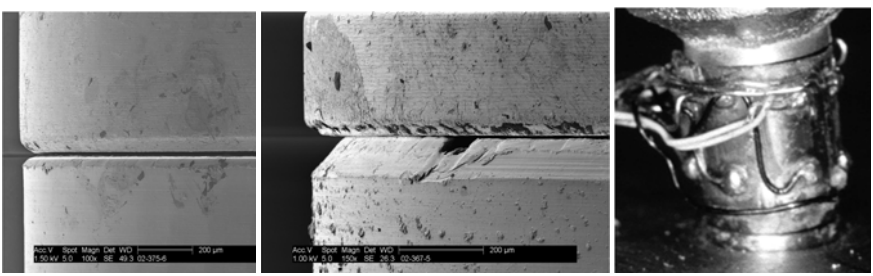


Bild 3: Rasterelektronenmikroskopische Analyse des resultierenden Spaltes gestecktes, geklebtes System unter axialer Belastung (links) und unter einem Winkel von 30° (Mitte); sowie Aufnahme des mit DMS bestückten, verschraubten Implantataufbaus unter Last in einem Winkel von 30° (rechts)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methode der Leitstützstrukturen hilft technische Systeme, wie die hier betrachteten Implantatsysteme, auf ihre mechanische Funktionsweise hin zu untersuchen, dabei Schwachstellen aufzuzeigen und ermöglicht so eine optimierte Implantat-Entwicklung. Hierdurch können ggf. später in der Praxis auftretende Komplikationen bereits in der Entwicklungsphase erkannt und rechtzeitig eliminiert werden. Die vergleichende Analyse der dentalen Implantatsysteme zeigt die unterschiedliche Auslegung der Implantatsysteme in Bezug auf extraaxiale Krafteinwirkungen. Anschaulich wird dies vor allem auch bei den Experimenten. Bei der verschraubten Variante reicht die Vorspannkraft nicht mehr aus, um Hebelkräften entgegen zu wirken und somit ein Öffnen der Verbindungsstelle zu verhindern. Die Folge ist ein Versagen der Schraubverbindung. Die gesteckt und verklebte Variante zeigt auch bei diesem Kraftniveau kein Öffnen der Schnittstelle zwischen Implantatkörper und Aufbau. Mit den gewählten Kraftgrößen sind die maximalen Kaukräfte an dieser Stelle im Gebiss abgebildet. Die Klassifizierung der Patienten nach ihrer Bißkraft wird in der täglichen Praxis heute noch nicht durchgeführt. In bisherigen klinischen Versuchsreihen zur maximalen Kaukraft variieren die Werte zwischen 150N und 500N je nach Versuchsaufbau. Dies zeigt die Schwierigkeit für den Konstrukteur auf, dass viele biomechanische Randbedingungen des stomatognathen Systems noch nicht ausreichend klinisch untersucht sind. Dies gewinnt vor allem im Hinblick auf die Rahmenbedingungen durch das neue MPG nach den Änderungen aus dem April 2010 besondere Bedeutung.
Allerdings sind die biologischen Grundlagen, wie die Größe der individuellen Kaukräfte, die als bestimmende Anforderungen notwendig sind, noch nicht ausreichend untersucht.

Literatur

[1] Holm-Pedersen P, Lang NP, Müller F.: *What are the longevities of teeth and oral implants?* Clin Oral Implants Res. 2007 Jun; 18 Suppl 3:15-9. Review. Erratum in: Clin Oral Implants Res. 2008

[2] Strub, J. R. / Kern, M. / Türp, J. C. / Witkowski, S. / Heydecke, G. / Wolfart, S.: *Curriculum Prothetik*; Band 3; Reihe: Curriculum 4. Auflage 2011. ISBN - 978-3876524993

[3] Spiekermann H.: *Implantologie. Farbatlanten der Zahnmedizin*. Hrsg.: Rateitschak K. und Wolf H., Bd. 10, Thieme 1994. ISBN - 978-3-13-733201-5

[4] Jung RE, Pjetursson BE, Glauser R, Zembic A, Zwahlen M, Lang NP.

[5] A systematic review of the 5-year survival and complication rates of implant-supported single crowns.

[6] Clin Oral Implants Res. 2008 Feb; 19(2):119-30. Epub 2007 Dec 7. Review.

[7] Matthiesen, Sven: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementemodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Karlsruhe: Institut für Produktentwicklung Karlsruhe. Universität Karlsruhe, 2002.

[8] Lemburg, Johannes Peter: *Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese*. Dissertationsschrift. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik. Band 6. Aachen: 2009. ISBN - 978-3-8322-8117-5

[9] 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

Strukturmechanische Untersuchungen zur Carapax-Verstärkung von Daphnia cucullata

Hans-Peter Prüfer

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Email: hp@itm.rub.de

Inhalt: *Bei Anwesenheit von Fressfeinden verteidigt sich der Helmwasserfloh D. cucullata, indem er bei der nächstmöglichen Häutung einen stärkeren Panzer entwickelt. Dieser so genannte Carapax ist eine zweischalige Struktur, bei der Außen- und Innenschale durch pfeilerartige Stützen verbunden sind. Zur Verstärkung werden Durchmesser und Länge der Pfeiler vergrößert. Die strukturmechanische Wirksamkeit dieser Maßnahme konnte an einem Ausschnitt des Carapax bereits in einem früheren Beitrag mit numerischen Methoden bestätigt werden. Mit einer verbesserten alternativen Modellierung werden diese Ergebnisse weiter validiert. Gleichzeitig soll durch die Verringerung des Rechenzeitbedarfs eine Betrachtung der Gesamt-struktur mit Berücksichtigung zusätzlicher physikalischer Effekte, z.B. Strömungsmechanik, möglich werden.*

Abstract: *In the presence of predators, the waterflea D. cucullata shows a specific defense strategy. D. cucullata is covered with an armour, the so-called carapace, consisting of an inner and an outer shell connected by pillars which maintain the distance between the shells. The stability of the carapace is increased by lengthening and thickening the pillars. A higher resistance against crushing and puncturing is achieved. The effectiveness of this modification has been measured by means of an ultrasonic microscope. In a preceeding paper we have confirmed these results by a finite element analysis. In this paper an alternative numerical model is presented, which gives further validations and allows for extended analyses including the modelling of a complete carapace.*

Stichwörter:*, FEM, Schalen, Bionik, Modellbildung*

Keywords: *FEM, shells, bionics, modelling*

1 Motivation

In der biologischen Forschung sind Daphnien von besonderem Interesse, weil sie sich vorzugsweise ungeschlechtlich durch Parthenogenese vermehren, wodurch eine Population aus genetisch identischen Organismen entsteht. Als Krebstiere müssen sich Daphnien im Laufe ihres Lebens mehrfach häuten, da der Chitinpanzer – der Carapax – nicht mitwächst. Hierbei zeigt der Helmwasserfloh D. cucullata zwei Phänomene. Zum

einen gibt es eine jahreszeitlich wechselnde Gestalt des Panzers, die so genannte Zyklomorphose. Zum anderen wird bei Anwesenheit von Fressfeinden wie z.B. Mückenlarven der Panzer bei der nächsten Häutung verstärkt, indem der Abstand zwischen Innen- und Außenschale, der durch pfeilerartige Strukturen realisiert ist, vergrößert wird, wobei mit der Länge der Pfeiler auch ihre Dicke zunimmt. Die Wirksamkeit dieses besonderen Mechanismus ist mit Ultraschalluntersuchungen nachgewiesen worden. Im Sinne der Bionik stellt sich die Frage, inwieweit das Prinzip der Carapaxverstärkung technisch nutzbar gemacht werden kann, da es offensichtlich eine Verbesserung der Struktureigenschaften mit tendenziell geringem Materialeinsatz bietet. Dazu ist es sinnvoll, den beobachtbaren Effekt zu quantifizieren.

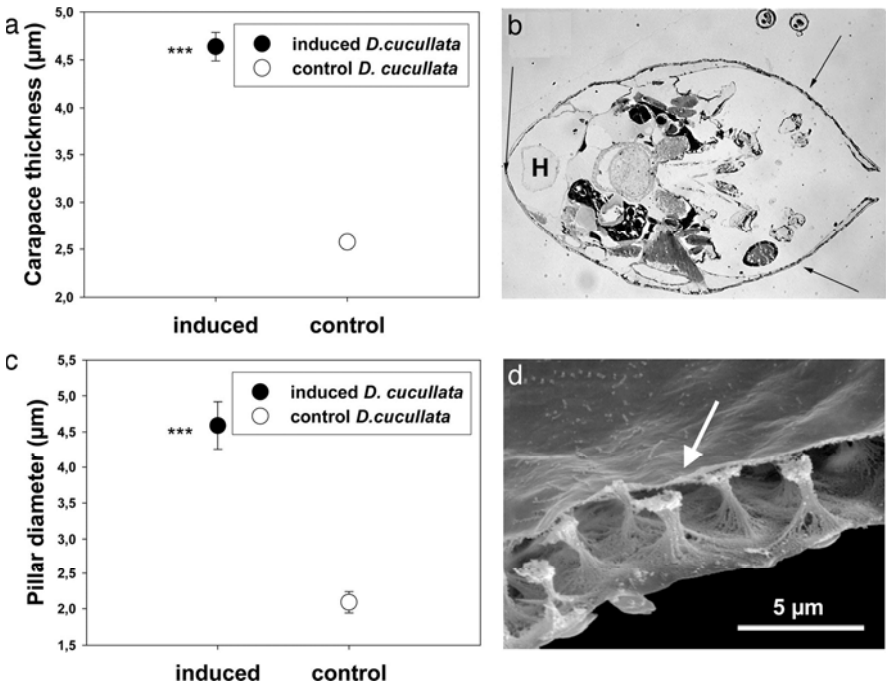


Bild 1: Carapax und Verstärkung [1]

2 Vorgeschichte

Die Methode der Wahl zur Bestimmung strukturmechanischer Eigenschaften ist die FEM. Auf der Basis der durch Ultraschallmikroskopie erschlossenen Dimensionen des *Carapax* wurde ein stark vereinfachtes Modell erstellt [2]. Dazu wurde die Betrachtung des *Carapax* auf einen kleinen Ausschnitt reduziert, die Pfeiler wurden als massive zylindrische Strukturen betrachtet, und für die Belastung durch den Erbeutungsvorgang wurde eine willkürlich festgelegte Flächenlast angenommen. Zusätzlich wurde der gewählte Ausschnitt auf ein symmetrisches Viertel reduziert.

2.1 Bereichsreduktion

D. cucullata hat eine Körperlänge in der Größenordnung von 1mm. Bei einem Pfeilerabstand von ca. 5µm würde man bei einer angenommenen Carapaxfläche von 1mm^2 eine Gesamtzahl von 40000 Pfeilern erhalten, die ihrerseits ebenso wie die Innen- und Außenschale elementiert werden müssten. Da diese Vorgehensweise völlig unrealistisch ist, wurde der interessierende Bereich des *Carapax* verkleinert. Dieser Überlegung liegt die Idee zugrunde, dass bei einer angenommenen Schädigung durch einen punktierenden Biss die Beanspruchung deutlich lokalisiert bleiben dürfte. Damit wurde der Ausschnitt auf 12 mal 12 Pfeiler beschränkt (was sich bei der rechnerischen Analyse in der Tat als akzeptabel erwiesen hat).

2.2 Modellierung der Pfeiler und der Schalen

In der textuellen Beschreibung der Struktur des *Carapax* werden die Pfeiler nur durch die Kenngrößen Länge und Durchmesser beschrieben. In erster Näherung wurde daher eine tendenziell zylindrische Pfeilerform angenommen. Angesichts des erforderlichen Modellierungsaufwandes wurde ebenfalls auf die Beschreibung der Feinstruktur der Pfeiler verzichtet, die in der Realität verdrillte Faserbündel sind. Die Modellpfeiler sind daher einfache Zylinder mit vollständig isotropem Verhalten. Sie werden mit traditionellen Kontinuumselementen elementiert.

In natürlicher Weise würde man Innen- und Außenschale durch Schalenelemente beschreiben. Da die Kopplung von Schalenelementen mit Volumenelementen nicht ganz unproblematisch ist, wurden die Schalen ebenfalls durch Volumenelemente dargestellt.

2.3 Randbedingungen und äußere Lasten

Angesichts der Gestaltfestigkeit des *Carapax* – es handelt sich immerhin um eine zweifach gekrümmte Schale – wurde die Annahme getroffen, dass bei einer quasi punktuellen Belastung die Wirkung außerhalb der Lasteinleitung rasch abklingt. An den Rändern wurde der Modellausschnitt daher in allen Freiheitsgraden gefesselt. Bei der Betrachtung des Viertels wurden die erforderlichen Symmetrierandbedingungen berücksichtigt.

Mangels detaillierter Angaben zum Prinzip der Erbeutung wurde für die äußere Last ein mechanisch noch vertretbarer Kompromiss gewählt. Der Bereich der Lasteinleitung ist nicht wirklich bekannt. Da Punktlasten aufgrund ihres singulären Verhaltens eher unrealistisch sind, wurde ein Bereich von der Größe eines Pfeilergevierts mit einer Druckkraft belastet, deren Größe allerdings nicht bekannt ist. Da ferner ein lineares Materialverhalten angenommen wurde, spielt der exakte Betrag des Drucks keine Rolle; hier sollte ja nur der Unterschied zwischen einem „normalen“ und einem verstärkten Carapax bestimmt werden. Eine Einheitslast genügt daher.

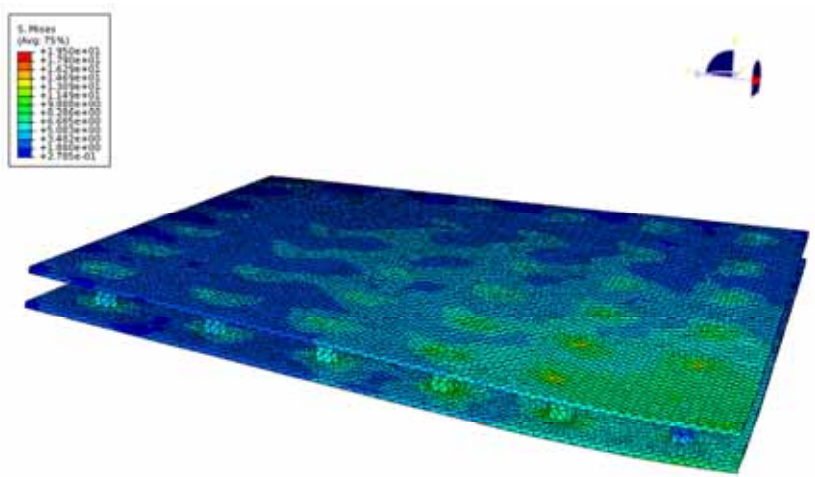


Bild 2: Einfaches Carapaxmodell mit Ergebnissen [2]

2.4 Ergebnisse

Die Durchführung der Analyse unter diesen stark vereinfachenden Annahmen konnte die Messergebnisse im Wesentlichen bestätigen. Interpretiert man die in [1] genannte Steifigkeitserhöhung des *Carapax* als Verringerung der Durchbiegung, so stimmt die um den Faktor 3 kleinere Durchbiegung recht gut mit der Steifigkeitserhöhung auf 350% überein. Gleichzeitig werden die maximalen Spannungen auf die Hälfte reduziert. Damit erweist sich das beschriebene Prinzip der Carapaxverstärkung als ausgesprochen ökonomisch: Für Verdreifachung der Steifigkeit genügt der anderthalbfache Materialeinsatz. Eine derartige Form des Schutzes findet man im Übrigen auch bei modernen Panzerungen, die in ähnlicher Weise als Sandwich aufgebaut sind.

3 Neues zur Modellbildung

Bereits im Rahmen der ersten Untersuchungen wurde es klar, dass viele der vereinfachenden Annahmen recht willkürlich sind. Um den Einfluss solcher Unzulänglichkeiten zu klären, wurde nach weiterer Rücksprache mit den beteiligten Biologen eine erweiterte Modellierung entworfen. Diese betrifft vor allem die Geometrie der Pfeilerstruktur sowie die Beschreibung von Außen- und Innenschale durch Schalenelemente.

3.1 Die Pfeilergeometrie

Dass die vereinfachende Auffassung der Pfeiler als Zylinder nur tendenziell korrekt ist, zeigt ein Blick auf Bild 1, in dem man gut die Faserbündelstruktur erkennen kann. Betrachtet man die Aufnahme des *Carapax* und den eingezeichneten Maßstab genauer, so fällt auf, dass die in den Diagrammen eingezeichneten Werte für Länge und Durchmesser der Pfeiler nicht nachvollziehbar sind. Aus einer intensiven Diskussion ergab sich die Erkenntnis, dass eine echte Vermessung der Carapaxgeometrie mit den üblichen Werkzeugen der Biologie nicht möglich ist. Ein weiterer ungünstiger Einfluss ergibt sich aus der Tatsache, dass die untersuchten Strukturen nicht mehr dem Lebendzustand entsprechen. Unter diesen Aspekten bleiben natürlich auch Modellveränderungen grundsätzlich anfechtbar.

Keine Zweifel gibt es hinsichtlich des Pfeilerabstands. Der in Bild 1 eingeblendete Maßstab von 5µm dürfte eine gute Näherung darstellen.

Die konkrete Form der Pfeiler ergibt sich aus dem Prinzip der verdrillten Faserbündel und der Eigenschaft, dass in der Natur Kerben vermieden werden. Damit kann man einen ge-

glätteten Übergang vom Pfeilerschaft in Außen- und Innenschale annehmen. Insgesamt folgt aus diesen Betrachtungen, dass die Form der Pfeiler einem taillierten Zylinder entspricht. Um eine akzeptable Elementierung zu ermöglichen, wurde ferner willkürlich angenommen, dass der Minimaldurchmesser eines Pfeilers ein Drittel des Enddurchmessers betragen sollte. Die in [1] benannten Pfeilerdurchmesser wurden reduziert, um die geometrischen Verhältnisse zumindest grob wiedergeben zu können.
Die folgenden Werte wurden der Modellbildung zu Grunde gelegt (referenz/verstärkt):

- oberer/unterer Pfeilerdurchmesser 1.8µm 3.6µm
- Pfeilerlänge 2.5µm 4.5µm
- Schalendicke 0.3µm 0.3µm

3.2 Außen- und Innenschale

Es ist nicht grundsätzlich nachteilig, eine dünnwandige Schale durch Volumenelemente zu beschreiben. Um mit einer so durchgeführten FEM-Analyse zuverlässige Resultate zu erhalten, muss man allerdings die Kantenlänge der Elemente ungefähr gleich der Schalendicke wählen. Bei sehr dünnen Schalen ergibt sich daraus eine extrem hohe Elementanzahl. Diese ist ohnehin erforderlich, weil Volumenelemente typischerweise nur über die translatorischen Freiheitsgrade verfügen und das Fehlen der rotatorischen Freiheitsgrade durch eine geringe Elementgröße ausgeglichen werden muss.
Schalenelemente sind daher eine durchaus sinnvolle Alternative, sowohl hinsichtlich einer denkbaren Rechenzeitverkürzung als auch durch die zu erwartenden besseren Ergebnisse bei der Beschreibung der Durchbiegung.
Bleibt man bei der Modellierung der Pfeiler durch Volumenelemente, steht man vor der Aufgabe, Volumen- und Schalenelemente koppeln zu müssen. Wie üblich wird dazu eine der Teilstrukturen zur Master-Struktur erklärt, deren Knotenunbekannte auf die andere Struktur abgebildet werden. Wegen des unterschiedlichen Verhaltens von Schalen und Volumenelementen ist diese Wahl nicht symmetrisch (auch wenn die Unterschiede eher gering sind)!

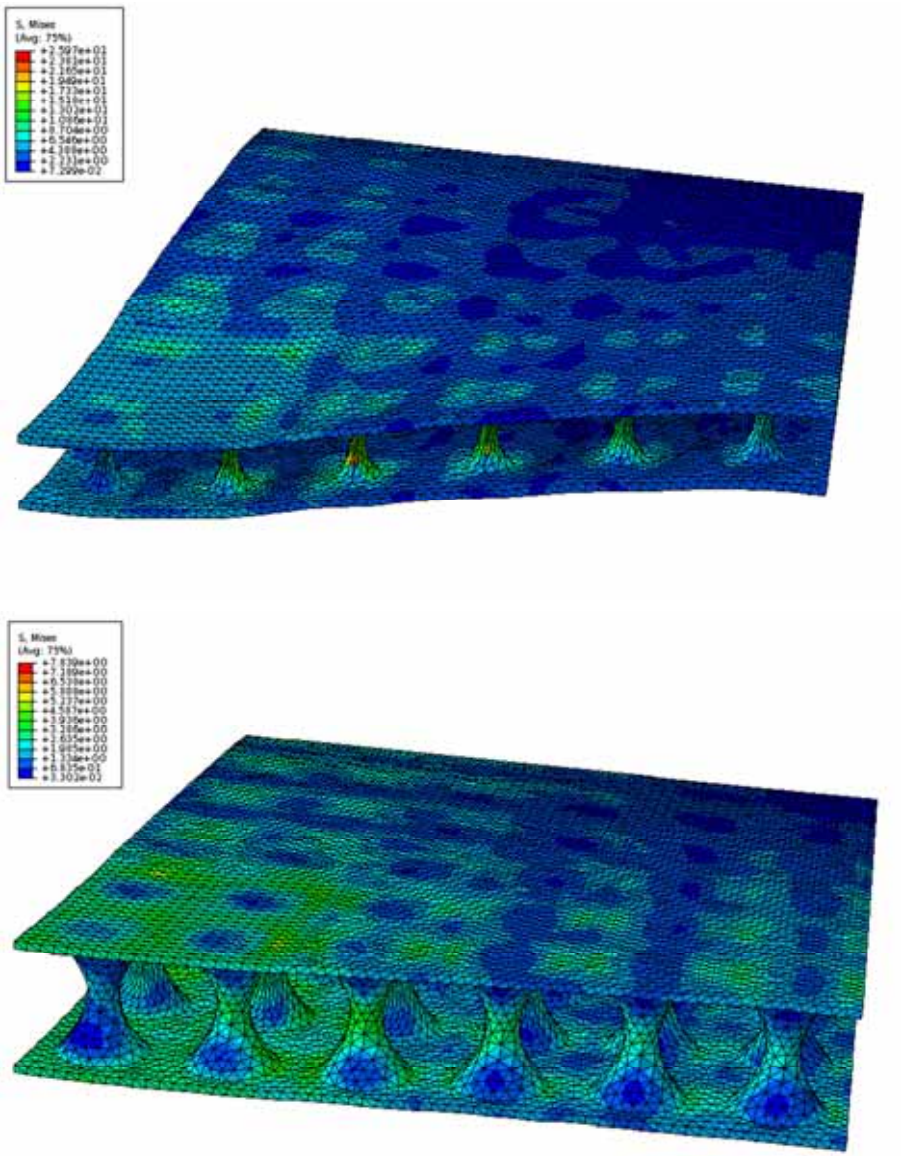


Bild 3: Modifiziertes Modell mit Ergebnisdarstellung

3.3 Ergebnisse und weitere Überlegungen

Die in [2] beschriebene sehr stark vereinfachte Modellierung lieferte bereits eine um den Faktor 3 geringere maximale Durchbiegung. Das neue Modell mit der verbesserten Pfeilergeometrie zeigt hier eine noch deutlichere Verbesserung von 16.5 auf 3.85 Einheiten und liefert damit einen Verbesserungsfaktor von ca. 4. Das gegenüber der einfachen Variante günstigere Verhalten dürfte auf die kerbärmeren Übergänge von Pfeiler zu Schale zurückzuführen sein. Anzumerken bleibt, dass bei der modifizierten neuen Modellierung die Innen- und Außenschalen sogar noch dünner gewählt wurden. Zur besseren Vergleichbarkeit und aus Platzgründen wird hier nur die Version aus Volumenelementen gezeigt.

Die deutliche geringere Elementanzahl bei der Verwendung von Schalenelementen in einem hybriden Modell würde es erlauben, größere Ausschnitte des *Carapax* zu betrachten. Auf diese Weise könnte man beispielsweise die Krümmung der Gesamtstruktur berücksichtigen, die ebenfalls zur Steifigkeit beiträgt. Ferner bietet sich die Definition einer Substruktur (Makroelement) an, die einen Carapaxausschnitt beschreibt. Die Kopplung derartiger Elemente ist dann allerdings nur noch manuell möglich.

4 Schlussbemerkungen

Die erweiterte mechanische Analyse zeigt, dass die Wirksamkeit des Verteidigungsmechanismus rechnerisch gut nachweisbar ist. Weitergehende Untersuchungen sollten größere Carapax-Ausschnitte betrachten, um auf diese Weise die bislang nicht vollständig geklärte Mechanik des Erbeutungsvorgangs besser zu verstehen. Besonderer Dank gebührt erneut dem Lehrstuhl für Evolutionsökologie und Biodiversität der Tiere an der Ruhr-Universität Bochum, der nicht nur die Motivation für diese Untersuchungen geliefert hat, sondern durch intensive Diskussionen das Verständnis des Autors für Aufbau und Funktion des *Carapax* entschieden erweitert hat.

Literatur

[1] Laforsch, C., Ngwa, W., Grill, W., Tollrian, R.: An acoustic microscopy technique reveals hidden morphological defenses in *Daphnia*. PNAS, November 9, 2004, vol. 101(45), 15911-15914

[2] Prüfer, H.-P.: Verteidigungsstrategien des Wasserflohs. Die Verstärkung des Carapax unter strukturmechanischen Gesichtspunkten. Deutsche SIMULIA-Konferenz 2010, Heidelberg, 20.-21. September 2010

Methoden der virtuellen 3D-Rekonstruktion von Knochenstrukturen für die Modellierung individueller funktioneller Implantate

Philipp Sembdner, Liciane S. Bertol*, Christine Schoene, Ralph Stelzer

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

*Federal University of Rio Grande do Sul
Laboratory of Design and Material Selection
90035-190 Porto Alegre, Brazil
Email: Liciane.Bertol@ufrgs.br; Internet: http://www.ufrgs.br

Inhalt: *Kontur- und steifigkeitsangepasste Implantate zur Überbrückung von Knochendefekten am Unterkiefer weisen durch ihre individuelle Anpassung Vorteile gegenüber den derzeit verwendeten Osteosyntheseplatten oder Vollkörperimplantaten auf. Oftmals lassen sich jedoch die zu rekonstruierenden Bereiche aufgrund von z.B. fortschreitendem Tumorwachstum nicht als 3D-Modell abbilden. Im Beitrag wird ein Ansatz zur rechnergestützten Rekonstruktion von äußeren Knochenstrukturen vorgestellt. Für die optimale Einheilung des Knochens ist es weiterhin notwendig, filigrane Strukturen nach Vorbild des natürlichen Knochenaufbaus in das Implantat einzubringen. Die Problematik, die sich aus der Generierung feinporöser Innenstrukturen bzw. deren Ausrichtung und Vereinigung mit der entstandenen Hüllgeometrie ergibt, wird im Beitrag umrissen. Schwerpunkte werden somit im Bereich der Entwicklung und Modellierung neuer Konstruktionsvarianten von konturtreuen, funktionellen Knochenimplantaten für das Direct Manufacturing gesetzt.*

Abstract: *Contour- and stiffness-adapted implants for the reconstruction of the lower jaw bone show advantages compared to standard osteosynthesis plates or full-body implants. As a result of progressive tumor growth some areas of the mandible can not be represented as a 3D model. This article presents an approach for computer-aided reconstruction of the lacking external bone structures. For optimal healing of the bone it is still necessary to integrate filigree structures into the implant. The problem which arises from the generation of fine porous internal structures as well as their alignment and unification with the resulting bounding geometry is outlined in the article. Emphasis is set on the development and modeling of new design variants of customized functional bone implants suitable for direct manufacturing.*

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

Keywords: *Individual implant, Direct Manufacturing, CAD, Biomechanics*

1 Einleitung

Überbrückungen von Knochendefekten mit den derzeit üblichen Standardrekonstruktionsplatten oder Vollkörperimplantaten stellen ein nur unzureichend befriedigendes Ergebnis hinsichtlich Konturtreue, Stabilität und Ästhetik dar. Daraus ergibt sich das Bedürfnis nach der Entwicklung neuer Konstruktionsvarianten für formidentische Implantate. Eine mögliche Gestalt sieht die Modellierung einer schalenartigen steifigkeitsangepassten Hüllstruktur und einer inneren Filigranstruktur für die Herstellung mit generativen Fertigungsverfahren vor. Dieses neue Design soll einerseits die negativen Aspekte der bisherigen Applikationen kompensieren und weiterhin die Gestaltungsfreiheiten moderner Direct Manufacturing Verfahren nutzen [1, 2, 3].

Die Konstruktion eines Implantats erfolgt im CAD-System auf Grundlage des aus den CT-Daten gewonnenen Volumenmodells eines Unterkiefers. Die Form der äußeren Hüllstruktur folgt dabei der Kontur des Knochens im Defektbereich. Da jedoch dieser betroffene Bereich in der Regel durch Tumore oder andere Erkrankungen zerstört worden (Bild 1 links) bzw. nach der Resektion gar nicht mehr vorhanden ist (Bild 1 rechts), besteht die Notwendigkeit, Methoden für die rechnergestützte Rekonstruktion der Form des zu ersetzenden Knochenbereiches zu entwickeln.

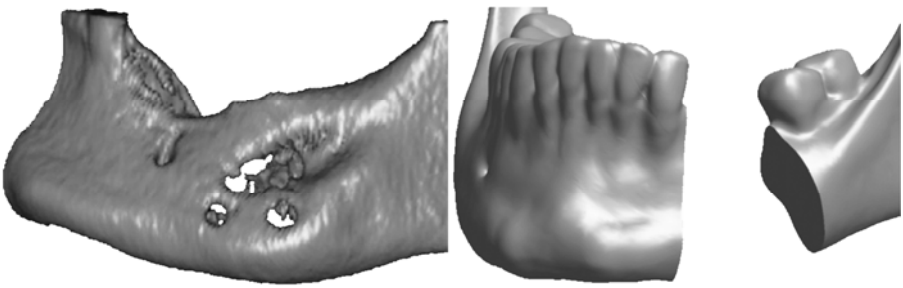


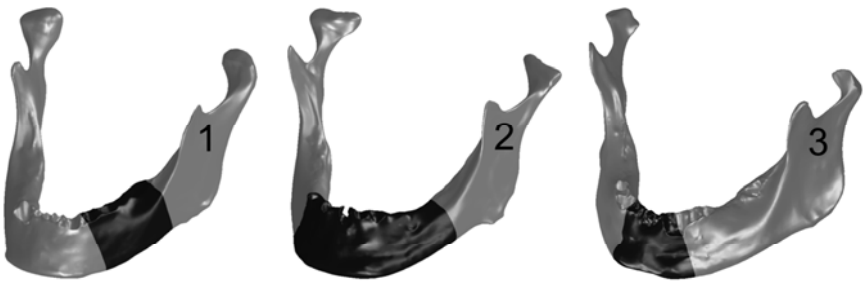
Bild 1 - Unterkiefer mit defektem Knochen (links) [4] und resezierter Unterkiefer (rechts)

Eine weitere Problemstellung ergibt sich aus der Modellierung offen-poröser Leichtbaugitterstrukturen. In Anlehnung an die reale Knochenstruktur sollen diese filigranen Strukturen in Kombination mit der Hülle die Stabilität des Implantats erhöhen und gleichzeitig das Einwachsen des Knochens fördern. Die Fertigung dieser Strukturen mit neuen Verfahren des Direct Manufacturing ist bereits Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten [5, 6, 7]. Dem Schritt der Fertigung steht jedoch die Gestaltung bevor. Mit den derzeit gängigen

Modellierfunktionen im CAD-System ist aufgrund der resultierenden Menge an Geometriedaten die Konstruktion und die modellbasierte Ausrichtung bzw. Kombination der Leichtbaugitterstrukturen mit der Hüllgeometrie des Implantats nur eingeschränkt möglich.

2 Modellierung fehlender Unterkieferbereiche

Kerngedanke der Rekonstruktion eines defekten Unterkieferbereiches ist, Schnittkonturen von nicht-resezierten Unterkieferknochen gesunder Patienten abzuleiten. Dies kann sowohl auf Grundlage zurückgeführter 3D-Volumenmodelle als auch direkt auf CT-Schichtbilddaten erfolgen. Bedingung ist die Positionierung von Schnittebenen, an denen entlang der Unterkiefer getrennt wird. Die Lagebestimmung erfolgt in Abhängigkeit bestimmter Unterkiefercharakteristika, wie z.B. anhand der Zahnstellung des Unterkiefers. Die Häufigkeit von Defekten in bestimmten Bereichen des Knochens ist dabei ebenfalls zu berücksichtigen und gegebenenfalls die Anzahl an Schnitten lokal zu erhöhen. In Bild 2 ist eine Auswahl typischer Bereiche für Unterkieferdefekte dargestellt.



1...Unterkieferwinkel bis Prämolaren- bzw. Frontzahnregion der gleichen Seite
2...Unterkieferwinkel bis zur Gegenseite
3...Frontalregion

Bild 2 - Bereiche, in denen ein Unterkieferdefekt häufig auftritt [8]

Für eine annähernd exakte Rekonstruktion sollten Schnittkonturen möglichst vieler Unterkiefermodelle zur Verfügung stehen, so dass eine Vorauswahl für den realen Patientenfall nach Alter, Geschlecht, besonderen Kiefermerkmalen oder -abmessungen etc. getroffen werden kann. Die Speicherung der Konturen (Bild 3) erfolgt z.B. in Form von geordneten 3D-Punkten bzw. ebenen Freiformkurven in einer Datei oder einer Datenbank mit einer eindeutigen Zuordnung zur Schnittposition (z.B. Schnitt zwischen Zahn 33 und 34).

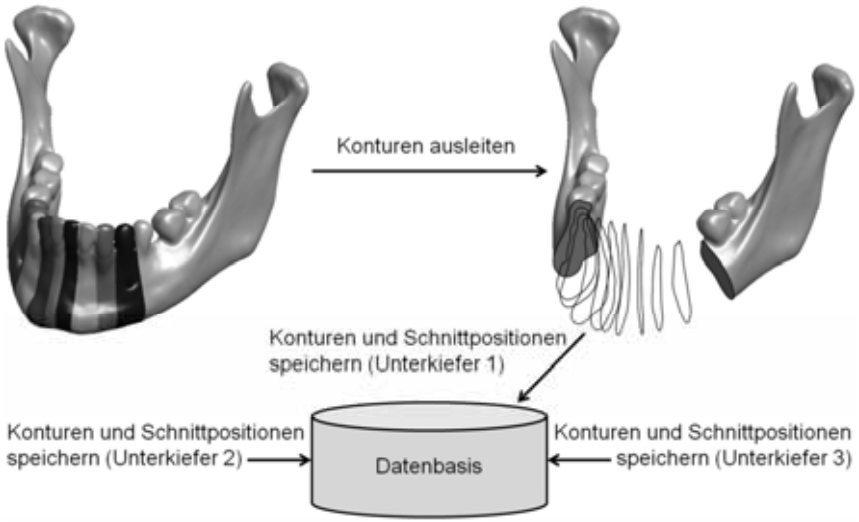


Bild 3 - Schnittebenen definieren, Unterkiefer schneiden und Schnittkonturen ausleiten

Die Schnittkonturen werden im Anwendungsfall durch die Abbildung mittels einfacher geometrischer Formen wie z.B. Kreise oder Ellipsen abstrahiert, wobei die ursprüngliche Kontur des Knochens hinreichend genau wiedergegeben werden soll. Ein mögliches Verfahren dafür ist die elliptische Fourier-Analyse, bei der geschlossene Konturen durch Fourierreihen dargestellt werden [9, 10]. Die Summe der Fourierkoeffizienten beschreibt die Kontur des Schnittbildes, die sich in der Regel durch wenige Koeffizienten gut approximieren lässt (Bild 4). Prinzipiell bildet eine Fourierreihe mit einem Koeffizienten einen Kreis ab. Kommt ein weiterer Koeffizient dazu, ergibt sich eine Ellipse. Werden weitere Koeffizientenpaare verwendet, entstehen zusätzliche Ellipsen, die als Ursprung den Zeiger der Ellipse mit der nächst kleineren Ordnung besitzen.

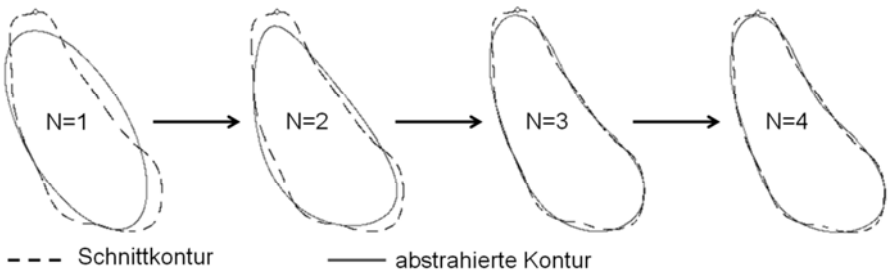


Bild 4 - Approximierung der Kontur durch Fourierreihen mit Koeffizienten der Anzahl N

Da jeder Unterkieferknochen in gewissen Grenzen eine andere Geometrie aufweist, muss die Kontur an den individuellen Patientenfall angepasst werden. Durch die mathematische Beschreibung der Kontur über Fourierreihen kann durch Veränderung der Koeffizienten die Form und Größe des Schnittbildes in Abhängigkeit definierter Unterkieferparameter (Hauptabmessungen, Knochenstärke, Kieferwinkel, Schnittkonturen des resezierten Unterkiefers etc.) variiert werden. Die Koeffizienten der Fourierreihe und die Unterkieferparameter müssen dafür in Korrelation gebracht werden.

Neben der Anpassung in Form und Größe ist auch die Lage der Kontur am defekten Unterkiefer zu bestimmen. Dies kann zum einen durch ein vereinheitlichtes Koordinatensystem erfolgen, welches sowohl für die ausgeleiteten Schnittkonturen, als auch für den zu rekonstruierenden Unterkiefer gilt. Zum anderen können die Konturen auf einer Leitkurve positioniert werden, die zwischen den beiden noch verbliebenen Unterkieferstümpfen des resezierten Unterkiefers modelliert wird (Bild 5).

Sind die angepassten Konturen im CAD-System z.B. durch Skizzen oder Kurven generiert, werden sie über entsprechende Funktionen als Volumenkörper ausgetragen (Bild 5).

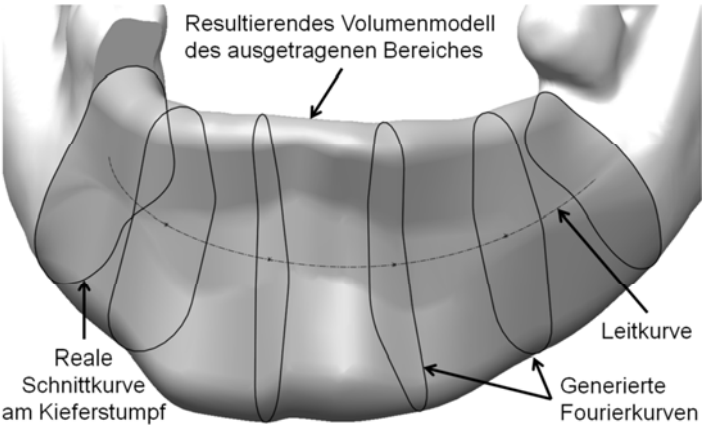


Bild 5 - Austragen der angepassten Schnittkonturen als Volumenkörper

3 Modellierung von Leichtbaugitterstrukturen im CAD-System

Die Generierung filigraner Strukturen auf der Grundlage von facettierten Dreiecksdaten wird bereits von einigen Anbietern in Form von Softwaretools für das Direct Manufacturing zur Verfügung gestellt [11, 12]. Der Nachteil dieser Lösungen ist jedoch, dass eine spätere konstruktive Änderung des Modells auf diesen Daten nicht möglich ist. Die Verwendung von Gitterstrukturen macht jedoch zumeist nur in Kombination mit einer weiteren Hüll- oder Anschlussgeometrie Sinn. Somit ergibt sich der Anspruch eine Lösung zu entwickeln, mit der Leichtbaugitterstrukturen direkt im CAD-Umfeld erstellt und direkt mit anderen Körpern kombiniert werden können.

Die größte Restriktion ist die Datenmenge, die durch die Modellierung einer Gitterstruktur entsteht und somit die Rechenkapazität heutiger Hardwaresysteme ausreizt. In einem Versuch wurde eine symmetrische Elementarzelle mit 1mm Größe und 0,3mm Wandstärke (Bild 6 links) vervielfältigt. Dabei war die Modellierung eines Gitterstrukturblocks, der die Dimension 12x15x45mm überschritten hatte, im CAD-System nicht mehr möglich (Tabelle 1). Das Speichern als Dreiecksnetz im STL-Format ist bereits bei halber Blockgröße nicht mehr durchführbar gewesen. Damit erreicht der erzeugte Block einer Gitterstruktur die für das Füllen einer Implantathülle (ca. 25x45x30mm bei Variante 1 aus

Bild 2) notwendige Größe nicht. Der Test erfolgte mit SolidWorks® 2010, einem DualCore Prozessor und einem 64bit Betriebssystem.

Tabelle 1 - Übersicht über die im CAD-System modellierbaren Blockgrößen einer Gitterstruktur

Blockgröße (mm)	Oberfläche (mm²)	Volumen (mm³)	CAD-Dateigröße (KB)	Speichern als STL möglich?
12x15x12	3952	560	7077	Ja
12x15x24	7864	1120	13559	Ja
12x15x27	8842	1260	15029	Nein
12x15x30	9820	1400	16913	Nein
12x15x33	10798	1540	18590	Nein
12x15x36	11776	1680	20215	Nein
12x15x39	12754	1820	21598	Nein
12x15x42	13732	1960	23381	Nein
12x15x45	14710	2100	24809	Nein

Eine prinzipielle Vorgehensweise für die Erzeugung filigraner Strukturen wurde mit Hilfe der Softwaresysteme SolidWorks® (Dassault Systèmes) und Geomagic Studio® (Geomagic) erarbeitet (Bild 6). Hierbei wird im CAD-System eine symmetrische Elementarzelle modelliert, die ein Strukturelement in Form einer Wabe, eines Gitters, einer Hohlkugel etc. darstellt. Das erzeugte Modell wird in einem Datenformat für facettierte Geometrie gespeichert und über ein entwickeltes Tool unter Angabe der benötigten Blockgröße in allen Raumrichtungen vervielfältigt. Das Verschneiden und Vereinigen mit der Hüllgeometrie erfolgt mittels booleschen Operatoren im Geomagic Studio® derzeit noch auf facettierten Daten. Der Elementarzellenblock wird dabei gegenüber der Hülle rotiert und verschoben, bis die Struktur den zu schließenden Bereich gleichmäßig ausfüllt.

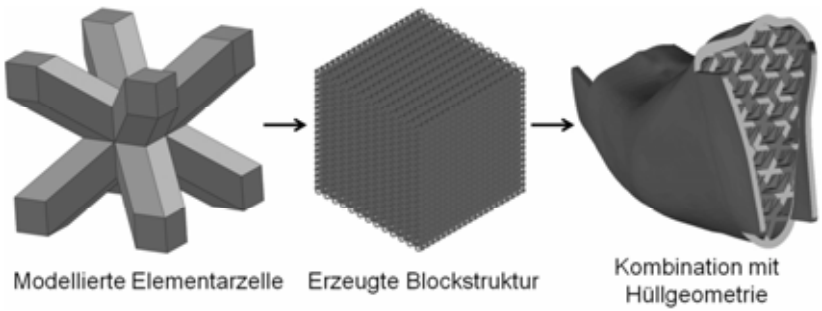


Bild 6 - Von der Elementarzelle über die Blockerzeugung zur integrierten Gitterstruktur

4 Resümee und Ausblick

Implantate im Mund-, Kiefer- und Gesichtsbereich sind notwendig, um Defekte im Knochen für die Wiederherstellung von Funktion und Ästhetik zu überbrücken. Der Anspruch dabei ist, den Knochen möglichst konturtreu nachzubilden. Über CT-Daten des erkrankten Patienten kann das virtuelle Modell des Unterkiefers erstellt werden. In Bereichen, in denen der Knochen zerstört worden ist, muss die Geometrie näherungsweise rekonstruiert werden, da Informationen über Form und Größe des wiederherzustellenden Knochens zumeist nicht vorhanden sind. Im Beitrag wird eine Methode für die Rekonstruktion eines Knochendefekts auf Grundlage bereits bekannter Schnittkonturen aufgezeigt. Diese Konturen werden mathematisch über geometrische Formen beschrieben und an den individuellen Patientenfall angepasst. Neben der Konturrepräsentation über die elliptische Fourier-Analyse stehen auch noch andere Verfahren zur Verfügung, die aber noch zu untersuchen sind. Zukünftig müssen Parameter für die Anpassung der Geometrie ermittelt, eine optimale Anzahl an Schnitten und Schnittpositionen erarbeitet und die Positionierung der Konturen am defekten Unterkiefer bestimmt werden. Zielstellung ist die Umsetzung in einem Softwaretool für die Bearbeitung im CAD-System.

Filigrane Strukturen sind für die Beförderung des Knochenwachstums und das Erzeugen einer stabilen aber dennoch leichten Implantatkonstruktion unumgänglich. Die Modellierung dieser Gitterstrukturen im CAD-System ist bisher nur eingeschränkt möglich. Wünschenswert ist somit eine direkte Modellierung von Leichtbaugitterstrukturen beliebiger Größe im CAD-System. Dabei sollen sowohl regelmäßige, als auch unregelmäßige, d.h. stochastische Bildungsvorschriften zum Einsatz kommen. Die Ausrichtung der Strukturen gegenüber der Restgeometrie erfolgt wie beschrieben gleichmäßig oder aber die Struktur folgt der Außenform des umschließenden Modells. Das Ergebnis soll auch hier ein Softwaretool für CAD-Systeme sein.

Literatur

[1] Sembdner, P.; Schoene, C.; Stelzer, R.; Reitemeier, B.: Festigkeits- und verformungsoptimierte Gestaltung konturidentischer Implantate für die Fertigung im Direct Manufacturing, KT2010 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Magdeburg, 2010, ISBN 978-3-86912-040-0

[2] Schoene, C.; Stelzer, R.; Sembdner, P.; Markwardt, J.; Reitemeier, B.; Engel, G.: Individual Contour Adapted Functional Implant Structures in Titanium, 21st CIRP Design Conference, Daejeon, 2011

[3] Schoene, C.; Stelzer, R.; Sembdner, P.; Markwardt, J.; Reitemeier, B.; Engel, G.: Reverse Engineering und Direct Manufacturing zur Herstellung individueller Implantate, Rapid.Tech, 2011, ISBN 978-3-932875-33-5

[4] http://www.sedentexct.eu/content/dental-uses-cbct (Stand: 05.07.2011)

[5] Bertol, L.; Kindlein Junior, W.; da Silva, F.; Aumund-Kopp, C.: Medical design : Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V, Materials and Design 31 (2010), S. 3982-3988

[6] Müller, B.: Generative Fertigungsverfahren - Möglichkeiten der Herstellung patientenspezifischer Implantate und medizintechnischer Komponenten, Workshop Präzisionsfertigung für die Medizintechnik, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz, 2009

[7] http://www.strahlschmelzen.de (Stand: 05.07.2011)

[8] Markwardt, J.: Rekonstruktion von Unterkieferdefekten mit Kontinuitätstrennung mittels Rekonstruktionsplatten aus Titan, Dissertation, Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus der Technischen Universität Dresden, 2004

[9] Stiene, S.: Konturbasierte Objekterkennung aus Tiefenbildern eines 3D-Laserscanners, Masterarbeit, Universität Osnabrück, 2006

[10] Handels, H.: Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie,2. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8351-0077-0

[11] http://www.netfabb.com (Stand: 05.07.2011)

[12] http://www.marcam.de (Stand: 05.07.2011)

FEM-Untersuchung der Zahnfuß-Spannung an Beveloidzahnrädern

M. Beck, H. Binz, M. Bachmann

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

Inhalt: *Geradverzahnte Beveloidräder weisen gegenüber Stirnrädern eine deutlich erhöhte Zahnfuß-Nennspannung auf. Diese Erhöhung resultiert vorwiegend aus einer punktförmigen Berührung, da sich der tragende Stirnschnitt von Beveloidrädern im Vergleich zu Stirnrädern nur unwesentlich unterscheidet. Das Klaffen und damit die tragende Breite ergibt sich aus den Verzahnungshauptdaten, deshalb wurden Abhängigkeiten zur Berücksichtigung der Beveloidradeigenschaften für einen Tragfähigkeitsnachweis nach DIN 3990-3 für diesen Zahnradtyp untersucht.*

Abstract: *A straight teeth beveloid gear has a significantly increased tooth root stress. This increase results primarily from a point of contact, since the transverse section of beveloid gears compared to spur gears differs only slightly. The gaping and thus the bearing width is determined by the main gearing data, therefore, dependencies for consideration the beveloid gear characteristics for calculating the load capacity according to German standard DIN 3990-3 for this gear type were examined.*

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

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

1 Einleitung

Beveloidräder gehören zur Gruppe der außenverzahnten Stirnräder, da sie ebenso wie die bekannten Zylinderräder im Stirnschnitt Evolventen aufweisen. Obwohl sie wie diese mit zahnstangenartigen Werkzeugen hergestellt werden können, weisen sie aufgrund der Verkippung des Werkzeugbezugsprofils um den Profilverschiebungswinkel θ während der Fertigung geometrische Unterschiede zu Stirnrädern auf. Ihre veränderliche Profilverschiebung über der Zahnbreite bewirkt eine konische Mantelfläche, sodass eine parallele, kreuzende oder windschiefe Achslage erreicht werden kann.
Ein Einsatz in kreuzender Achslage ermöglicht Achswinkel von 0° bis etwa 20°, beispielsweise in KFZ-Getrieben. Ohne Flankenmodifikation entsteht dabei eine

Punktberührung, sodass die Last örtlich konzentriert ist und damit zu erhöhten Beanspruchungen führt.

2 Stand der Technik und Forschung zur Spannungsermittlung an Beveloidrädern

Die grundlegende Geometrie von Beveloidrädern ist in [4] beschrieben. Bei Schrägverzahnung entstehen für Rechts- und Linksflanken unterschiedliche Eingriffswinkel und Grundkreisdurchmesser, der Stirnschnitt ist asymmetrisch, A in Bild 1. Das Beveloidrad kämmt mit dem Gegenrad bei kreuzender Achslage nur in einem Stirnschnitt, andere Stirnschnitte klaffen, was zu einer punktförmigen Berührung führt. Die Zahnfußkurve eines Beveloidrades, B in Bild 1, ändert ihre Form über der Zahnbreite, was aus der Kippung des Werkzeugs um den Profilverschiebungswinkel θ herrührt [5]. Da der Fußkreisdurchmesser ebenso wie die Profilverschiebung über der Zahnbreite zunimmt, entsteht ein Zahngrundkörper mit ansteigender Mächtigkeit, C in Bild 1.

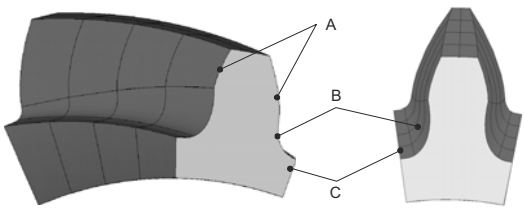


Bild 1: Schräg- und gradverzahnter Beveloidzahn, Zahngrundkörper nicht dargestellt

Für Zylinderräder existieren verschiedene analytische Berechnungsverfahren, um die Tragfähigkeit nachzuweisen, beispielsweise DIN 3990 [3]. Da deren geometrische Eigenschaften, wie etwa symmetrische Stirnschnitte und konstante Zahnform über der Breite, von Beveloidrädern nicht erfüllt werden, kann für diese ein Festigkeitsnachweis damit nicht geführt werden. Trotzdem wird in der Praxis eine Berechnung für Beveloidräder mit diesen Verfahren durchgeführt, wobei versucht wird, ihre Zahnform durch eine abschnittsweise Annäherung verschiedener Stirnschnitte als Zylinderräder zu berücksichtigen.

Verfügbare Software zur Stirnradauslegung wie „STIRAK“, „RIKOR“ oder „KISSsoft“ berücksichtigen die Besonderheiten der Beveloidradgeometrie bislang nicht. Die in der

Entwicklung befindliche Forschungssoftware „ZaKo3D“ vom WZL der RWTH Aachen erstellt die Beveloidradgeometrie mithilfe des Hüllschnittverfahrens und berechnet anschließend die Beanspruchung mit der Einflusszahlenmethode [6]. Das am IMM der TU Dresden entstandene Kegelradberechnungsprogramm „BECAL“ ist grundsätzlich für die Anwendbarkeit auf Beveloidräder geeignet, dort fehlt aber die Möglichkeit einer Geometrieerzeugung dieses Zahnradtyps.
Neben den spezialisierten Programmen kann die Finite Elemente Methode zur Spannungsermittlung herangezogen werden. Mit ihr berechnete Liu die Hertzsche Pressung von Beveloidrädern [1].

3 Verwendetes FE-Modell

Da eine FE Analyse die komplexe Zahnform von Beveloidrädern berücksichtigen kann, bietet sich dieses Werkzeug zur genaueren Beanspruchungsanalyse an. Bei den hier vorgestellten FE-Simulationen wird die Geometrie mithilfe eines analytischen Flankengenerators erzeugt, der in vorangegangenen Arbeiten am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design der Universität Stuttgart entstand [5]. Die berechnete theoretisch ideale Geometrie wird an das FE Programm übergeben.
Untersucht wird der beanspruchungskritische Fall von Gradverzahnungen in kreuzender Achslage mit Einzeleingriff und Lastkonzentration auf einen Zahn. Dies wird im FE-Modell dadurch berücksichtigt, dass nur am Untersuchungszahnpaar ein Kontakt zur Kraftübertragung definiert ist. In diesem Beitrag werden Beveloidräder untersucht, deren Profilverschiebung in Zahnmitte Null beträgt. Sie berühren sich in diesem Stirnschnitt, er wird als Zahnbezugsebene bezeichnet [4] und ist zur Untersuchung der Beanspruchung maßgebend.
Das Belastungsmoment wird gleichmäßig am Zahnradinnendurchmesser von Rad 2 eingeleitet, welches einen Rotationsfreiheitsgrad besitzt, während das Untersuchungsrad 1 fest eingespannt ist. Die statische Rechnung erfolgt unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens von Stahl. Dieses Vorgehen ist an Zylinderrädern verifiziert worden und zeigt bei der Berechnung der Fußspannung und Eingriffssteifigkeit Abweichungen von weniger als 3 Prozent im Vergleich zu Normrechnungen nach DIN 3990.

4 Beanspruchungen in der Fußkurve

Beim analytischen Tragfähigkeitsnachweis von Stirnrädern nach DIN 3990-3 wird die größte Zugspannung in der Zahnfußkurve berechnet. Sie ist am Berührpunkt einer Tangente an die Fußkurve, die im Winkel von 30° zur Stirnschnittmittellinie verläuft, am größten. Dieses Verhalten zeigt sich erwartungsgemäß ebenso an der Fußausrundung des Beveloidrades. An der zur Belastung abgewandten Zahnseite addieren sich die Normalspannungen aus den Biege- und Druckkomponenten der Belastung vorzeichenidentisch, sodass sich dort betragsmäßig leicht größere Druckspannungen einstellen. Auch dieses Verhalten ist bei Zylinder- wie auch Beveloidrädern zu beobachten, wobei die Differenz zwischen Zug- und Druckseite mit zunehmendem Profilverschiebungswinkel größer wird. Da Anrisse am Zahnfuß meist von der zugbelasteten Seite ausgehen, wird diese Seite zur Auswertung herangezogen. Für die Untersuchung der Zahnfußspannung an Zylinderrädern wird die Wälzstellung des äußeren Einzeleingriffspunkts D berechnet, weil dabei die volle Zahnkraft am größten Biegehebelarm auftritt und somit die Fußspannung am größten ist. Bei den untersuchten gradverzahnten Beveloidrädern wirkt sich die Änderung der Wälzstellung nicht wesentlich auf die Zahnfußspannung aus, sondern sie verbleibt auf hohem Niveau, Bild 2 links. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit Zylinderrädern wird in weiteren Untersuchungen die Wälzstellung des äußeren Einzeleingriffspunkts D berechnet.

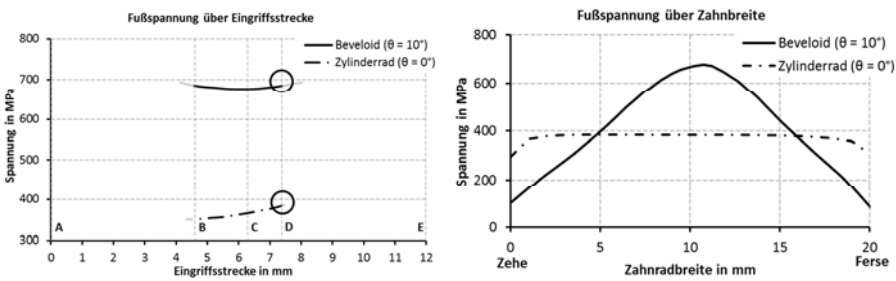


Bild 2: Links: Spannungsverlauf in verschiedenen Wälzstellungen
Rechts: Spannungsverlauf über der Zahnbreite

Deutlich ist in der Gegenüberstellung der Fußspannungen eines Stirnrades mit einem entsprechendem Beveloidrad mit θ = 10° eine Spannungserhöhung leicht außerhalb der

Breitenmitte von rund 80% beobachtbar, Bild 2 rechts. Mit den Ergebnissen kann das Verhältnis der maximalen Zahnfußspannungen von Beveloidrad zu Stirnrad gebildet und mit dem Spannungskorrekturfaktor Y_{Be} beschrieben werden, Gleichung (1).

$$Y_{Be} = \frac{\sigma_{F0,Beveloidrad}}{\sigma_{F0,Stirnrad}} \geq 1{,}0 \qquad (1)$$

Den Untersuchungen sind ideale, abweichungsfreie Verzahnungen zugrunde gelegt. Daher entspricht die berechnete Fußspannung der Definition in DIN 3990-3. Dort wird die Spannung mithilfe der Biegekomponente der Belastung berechnet. Vergleicht man nur die Ergebnisse der Biegespannungskomponenten von Stirn- und Beveloidrad, zeigt sich ein geringeres Verhältnis als durch den Faktor Y_{Be} beschrieben.

Im Vergleich der Stirnschnittgeometrie eines Zylinderrades und eines Beveloidrades mit großem Profilverschiebungswinkel von θ = 10° in der Zahnbezugsebene ergibt sich nur eine geringfügige Unterscheidung der Zahnform. Die verschiedenen Beanspruchungen der Verzahnungen resultieren daher wesentlich aus der veränderten Zahnform über der Breite. Sie bewirkt die Klaffung und damit Punktberührung der Beveloidverzahnung, während beim idealen Stirnrad ein Tragen über der gesamten Breite stattfinden kann. Dies ist anschaulich am Tragbild einer Wälzstellung beider Radtypen darstellbar.

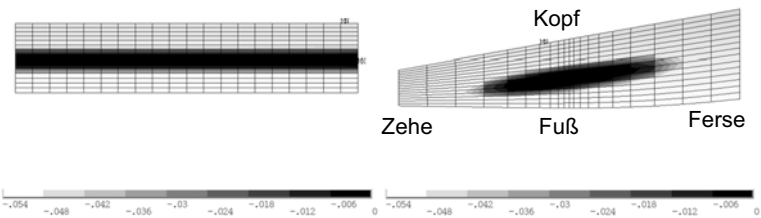


Bild 3: Tragbilder eines idealen gradverzahnten Zylinderrads (θ = 0°, links) und Beveloidrads (θ = 10°, rechts), Klaffung in mm

Das punktuelle Tragen bewirkt eine Beanspruchungskonzentration im Bereich der Zahnbezugsebene, hier in Zahnradbreitenmitte. Im Gegensatz zu idealen Zylinderrädern mit einem gleichmäßigen Tragen besitzt die Fußspannung von Beveloidrädern deshalb einen eindeutigen Maximalwert. Damit muss der oben eingeführte Spannungskorrekturfaktor Y_{Be} auf makrogeometrischen Zusammenhängen beruhen.

5 Parametervariationen

Von Interesse ist die Veränderung der Zahnfuß-Nennspannung einer Beveloidradpaarung in Abhängigkeit verschiedener Hauptverzahnungsdaten, die nun variiert werden. Den Verzahnungen gemein sind nachfolgende Daten, falls nicht anders angegeben.

Tabelle 1: Hauptdaten der untersuchten Verzahnungen

Bezugsprofil nach DIN 867	ideale Zahngeometrie, abweichungsfrei, unkorrigiert
m_n = 2,5 mm	ρ_{aP0}^* = 0,25
z_1 = 19, u = 2,0	Antriebsmoment an Rad 1: T_1 = 150 Nm
b_1 = 20 mm	$\theta_1 = \theta_2$, x = 0 bei $b_1/2$
Geradverzahnung, β = 0°	Achswinkel Σ = 2 x θ_1

5.1 Achswinkel Σ und Profilverschiebungswinkel θ

Nachfolgend wird der Profilverschiebungswinkel beider Räder, vom Zylinderrad ausgehend, gleichermaßen schrittweise auf 10° erhöht. Zwar sind darüber hinausgehende Winkel denkbar, allerdings reduzieren die geometrischen Grenzen Unterschnitt und Spitzgrenze die Zahnbreite eines Beveloidrads, sodass ein sinnvoller Einsatz üblicherweise 6° bis 8° zulässt. Die sich bei den FE-Analysen ergebenden Maximalwerte der Zahnfuß-Nennspannung sind mit steigendem Profilverschiebungswinkel monoton steigend und lassen sich gut mittels einer quadratischen Gleichung beschreiben, Bild 4.

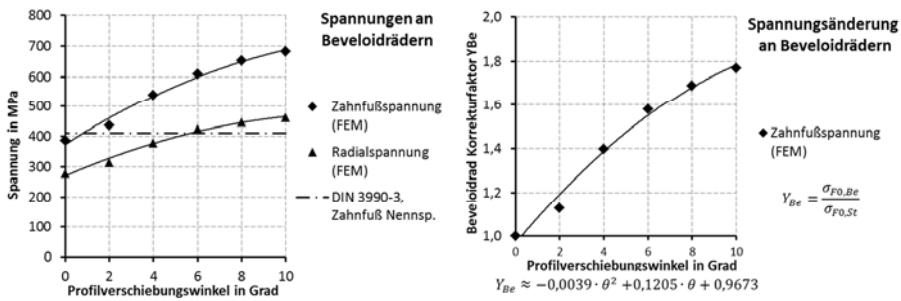


Bild 4: Änderung der Spannungen in Abhängigkeit des Profilverschiebungswinkels

Der große Anstieg des Korrekturfaktors Y_{Be} zeigt die Notwendigkeit für eine Überarbeitung des Regelwerks nach DIN 3990-3, wenn damit ein Tragfähigkeitsnachweis für Beveloidräder geführt werden soll.

5.2 Zahnradbreite b und tragende Breite b_{tr}

Dass die im Vergleich zu Zylinderrädern erhöhte Nennspannung hauptsächlich aus der punktuellen Lastkonzentration auf der Flanke resultiert, kann durch die Variation der Zahnbreite und Belastung gezeigt werden. Bei Zylinderrädern trägt aufgrund der Linienberührung die gesamte Zahnbreite, sodass die Fuß-Nennspannung $\sigma_{F0} \sim M_t / b$ ist. Bei dem in Bild 5 gezeigten Beispiel eines Beveloidrads mit $\theta = 8°$ ist dies nicht der Fall: Die Vergrößerung der Zahnbreite von 10 mm auf 20 mm bewirkt nur eine Spannungsreduzierung um ca. 25%, die bei weiter steigender Breite nur noch geringfügige Verringerungen bewirkt. Die Fußspannung von Beveloidrädern ist also nicht abhängig von der Zahnbreite wie bei Zylinderrädern, sondern vom tragenden Anteil der Breite b_{tr}.

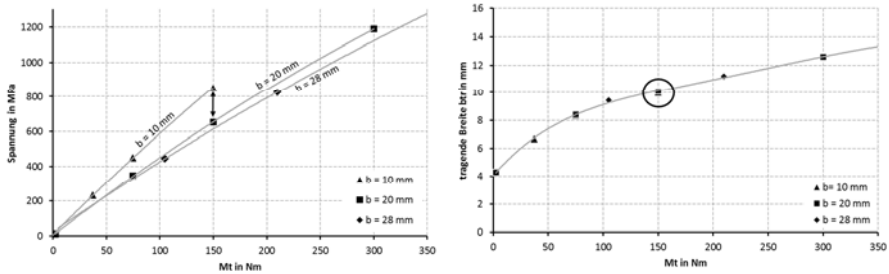


Bild 5: Links: Änderung der Fußspannung in Abhängigkeit der Breite und Belastung.
Rechts: tragende Zahnbreite

Die tragende Breite ist von der Klaffung und damit von θ und weniger von der Breite abhängig, dies zeigt sich in Bild 5 rechts, worin für unterschiedliche Zahnbreiten ähnliche tragende Breiten markiert sind. Stirnschnitte, in denen kein Kontakt zwischen Rad und Gegenrad aufgrund der Klaffung zustande kommt, wirken versteifend auf die Zahnbezugsebene, in der Kontakt auftritt. Bei steigender Belastung wird die Klaffung zunehmend geschlossen und die tragende Breite vergrößert sich, sodass sich die Last breiter verteilen kann. Daher ist auch die tragende Breite nichtlinear von der Belastung abhängig, siehe Bild 5 rechts, und die Eingriffssteifigkeit der Verzahnung nicht belastungsunabhängig. Somit ist der oben eingeführte Spannungskorrekturfaktor Y_{Be} belastungsabhängig.

5.3 Werkzeugbezugsprofil

Neben den Hauptverzahnungsdaten hat das Bezugsprofil des Herstellungswerkzeugs großen Einfluss auf die Form der Fußkurve und damit auch auf die sich ergebende Kerbschärfe und Zahnfußspannung. Im analytischen Tragfähigkeitsnachweis für Zylinderräder nach [3] wird der Einfluss des Werkzeugbezugsprofils mit den Faktoren Y_F und Y_S berücksichtigt. Bei den untersuchten Formen nach [2] nehmen auch bei Beveloidrädern mit zunehmenden Werkzeugkopfrundungsradius ρ_{aP0} die Fußspannungen ab. Die Verhältnisse zwischen Zylinderrädern und Beveloidrädern sind dabei vergleichbar, Bild 6 rechts, sodass die Spannungsänderung durch die Faktoren Y_F und Y_S ausreichend beschrieben ist. Der Spannungskorrekturfaktor für Beveloidräder Y_{Be} ist daher in erster Näherung unabhängig vom Werkzeugbezugsprofil.

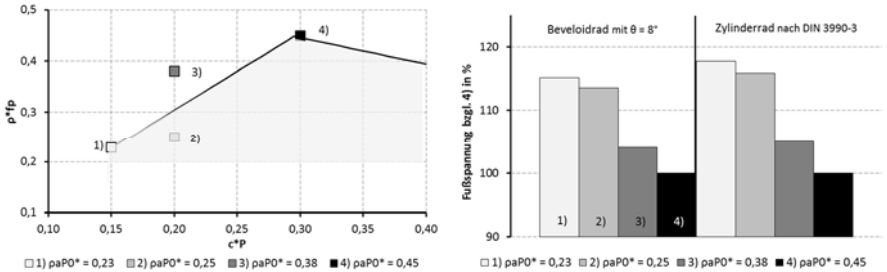


Bild 6: Änderung der Fuß-Nennspannung in Abhängigkeit des Werkzeugbezugsprofils [2], [3]

Literatur

[1] Liu, C.: *Contact Stress Analysis of Straight Concave Conical Involute Gear Pairs with Small Intersected Angles,* Proceedings of the International MultiConference of Engineers an Computer Scientists, Hong Kong 17.-19.03.2010

[2] DIN 867 1986. Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern, Beuth Verlag Berlin 1986

[3] DIN 3990 12.1987. *Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern*, Beuth Verlag Berlin 1990

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

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

[6] Röthlingshöfer, T.: *Simulationsmethoden von Beveloidverzahnungen,* Tagung Innovationen rund ums Kegelrad, RWTH Aachen, 13./14.04.2010

Die Korrelation von Modell- und Modellierungsparametern in der Kontaktanalyse bei Maschinenelementen

Nützel, Florian; Alber-Laukant, Bettina; Neidnicht, Martin; Wehmann, Christoph; Rieg, Frank

Universität Bayreuth, Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
Email: Florian.Nuetzel@uni-bayreuth.de; Internet: http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Das mechanisch nichtlineare Verhalten von Maschinenelementen im Kontakt kann sehr gut mittels der Finite-Elemente-Analyse (FEA) abgebildet werden. Mit Hilfe einer Dependency-Structure-Matrix (DSM) sollen die komplexen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der die FE-Kontaktanalyse beeinflussenden Parameter aus Modellbildung und Modellierung strukturiert werden. Dadurch ist es möglich, einzelne Einflussparameter zu isolieren und zu untersuchen. Am Beispiel einer Stirnradstufe wird die Abhängigkeit von FE-Diskretisierung und Kontaktbereich analysiert und anschließend bewertet.*

Abstract: *The nonlinear mechanical behaviour of machine elements in contact can be very well mapped by using the finite element analysis (FEA). With the help of a dependency structure matrix (DSM), the complex interactions and dependencies of influencing modelling parameters within the FE contact analysis can be structured. So it is possible to isolate individual parameters of modeling to investigate dependencies. Here, an example of a spur is analyzed and evaluated with the focus on the dependency of FE discretization and contact area.*

Stichwörter: *Finite-Elemente-Analyse, Kontaktberechnung, Dependency-Structure-Matrix.*

Keywords: *Finite Element Analysis, Contact Calculation, Dependency Structure Matrix.*

1 Einleitung

Analytische Ansätze oder Mehrkörpersimulationen können in vielen Fällen die komplexen Wechselwirkungen des elastischen Verhaltens von Maschinenelementen im Kontakt nicht mehr ausreichend exakt abbilden. Zur Erfassung des stark nichtlinearen Verhaltens der Maschinenelemente in der Kontaktzone können numerische Verfahren, wie die Finite-Elemente-Analyse (FEA) herangezogen werden, um den Konstrukteur im Entwicklungsprozess bei solchen Fragestellungen zu unterstützen.

Grundlage einer belastbaren Kontaktanalyse in der FEA ist eine der Aufgabenstellung angepassten Modellbildung. Besonders sensitiv sind die Ergebnisse gegenüber der

Modellierung des Kontaktbereichs. Je nach Geometrie, verwendetem Material, FE-Netzparameter oder Kontaktdefinition können die Berechnungsergebnisse stark variieren [1, 2, 3, 4]. Die Festlegung der geeigneten Modellierungsparameter ist in vielen Fällen nicht trivial. Deshalb stellt sich im Vorfeld der Simulation die Frage nach einer für die Kontaktanalyse sinnvollen Modellierung. In diesem Zusammenhang wird exemplarisch an Stirnrädern die Übertragbarkeit und Korrelation von Modell- auf FE-Modellierungs-parameter diskutiert. Zur Darstellung dieser komplexen Abhängigkeiten in der FE-Kontaktanalyse wird eine Dependency-Structure-Matrix (DSM) verwendet [4]. Auf Grundlage der DSM erfolgt eine Untersuchung des Einflusses von Diskretisierungsgrad auf Kontaktbereich am Beispiel von Zahnrädern.

2 Korrelation von Modell- und Modellierungsparametern

2.1 Theoretische Grundlagen der DSM

Die DSM [4, 5] ist eine systematische Methode zur Visualisierung und Analyse von Bestandteilen und Abhängigkeiten zwischen einzelnen Aufgaben oder Einflussgrößen. In einer quadratischen Matrix werden Parameter aufgetragen und ihre Bezüge zueinander dargestellt. Dieses Verfahren kann zur Produktentwicklung, Planung/Organisation des Entwicklungsprozesses oder für komplexe Produktarchitekturen herangezogen werden. Im Modell werden jeder Einflussgröße eine Zeile und eine Spalte zugeordnet, jeweils in der gleichen Reihenfolge. Von oben nach unten werden die Größen genannt, welche von der vorangegangenen Aufgabe abhängig sind. Von rechts nach links ergibt sich der Input der Einflussgröße A auf die Größe B. Die Hauptdiagonale bleibt leer. Durch die Auftragung in Matrixform können Informationsflüsse und die Repräsentation komplexer Abhängigkeiten dargestellt werden. Sensible Bereiche werden so lokalisiert.

Werden zur Dokumentation von Zusammenhängen nur Kreuze verwendet, wird von einer binären DSM gesprochen. Bild 1 zeigt mögliche Beziehungen:

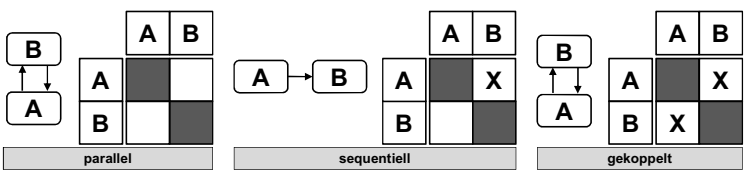


Bild 1: Beziehungen in einer DSM nach [4]

Es ist weiterhin möglich, zusätzliche Gewichtungen der Beziehungen in numerischen DSM darzustellen oder das System statisch bzw. dynamisch, also zeitunabhängig bzw. zeitabhängig zu betrachten.

Nach der Phase der Eintragung der Beziehungen in die Matrix werden zur Klärung von Abhängigkeiten verschiedene Algorithmen zur Konditionierung der Matrix angewandt. Es stehen Sequenzierung, Partitionierung und Clustering zur Verfügung. Je nach Art der Anwendung sind andere Sortierverfahren sinnvoll.

Bei zeitlich aufeinanderfolgenden sequenziellen Eigenschaften ist nur jeweils ein Dreieck der Matrix gefüllt (Upstreaming). Ein Eintrag in der anderen Dreiecksmatrix weist darauf hin, dass eine frühere Einflussgröße von einer später spezifizierten abhängt (Downstreaming). Wenn die Matrix nicht so umsortiert werden kann, dass nur eine Dreiecksmatrix vorhanden ist, sind die jeweiligen Einflussparameter miteinander gekoppelt. Diese Methoden geben über die Abhängigkeiten der einzelnen Einträge Aufschluss. Zwei Aufgaben sind parallel, wenn es keine Markierungen gibt, die sie verknüpfen.

2.2 DSM zur Charakterisierung einer FE-Kontaktanalyse

Zur Charakterisierung der einzelnen Schritte der FE-Kontaktanalyse wird im Folgenden eine DSM angefertigt. Sie visualisiert die komplexen Verknüpfungen einzelner Modell- und Modellierungsparametern.

Zunächst werden Parameter der FE-Kontaktberechnung definiert. Sie bilden die Achsen der DSM. Zu den Modellparametern, die die Basis zur FE-Simulation bilden, zählen neben der Geometrie die Materialparameter und Lasten sowie die Vorgaben zur Kontaktberechnung. Diese werden nach [1] in Normalkontakt und Tangentialkontakt unterschieden. Die Modellierungsparameter gliedern sich in solche, die die Kontaktdefinition abbilden und in allgemeinere, die die FE-Definition beschreiben. Diese Gliederung stellt jedoch keine Konvention dar und dient in diesem Beispiel der besseren Strukturierung. Die FE-Definition setzt sich in dieser Darstellung zusammen aus der FE-Diskretisierung, mit Elementtyp und Netzfeinheit, dem Materialmodell und dem FE-Solver. Der Parameter FE-Solver ist stark vereinfacht gegliedert und umfasst alle zur Lösung des Gleichungssystems notwendigen Informationen und Einflüsse. Die FE-Kontaktdefinition gliedert sich in Kontaktsuche, Kontaktinitialisierung, Festlegung der Kontaktzone zwischen den Kontaktkörpern, Reibgesetz zur Konkretisierung der Wechselwirkung der Oberflächen

und Kontaktbedingungen zur FE-Diskretisierung [1, 3]. Als Ausgabegrößen werden die ermittelten Verschiebungen, die Spannungsverteilung und die berechneten Kräfte und Momente aufgeführt.

Je nach Art der Anwendung können die DSM unterschiedlich sortiert werden [5]. In dem hier erläuterten Beispiel ist es nicht sinnvoll, durch Partitionierung der Matrix die Ausgabeparameter der Simulation in der zeitlichen Abfolge vor die Modellparameter zu ordnen. In den vorliegenden komplexen Multikomponentenbeziehungen ist nur das Clustern eine sinnvolle Strukturierungsmöglichkeit. Die zeitliche Abfolge der FE-Kontaktanalyse bleibt somit direkt in der DSM erhalten. Bild 2 zeigt eine DSM für die FE-Kontaktanalyse.

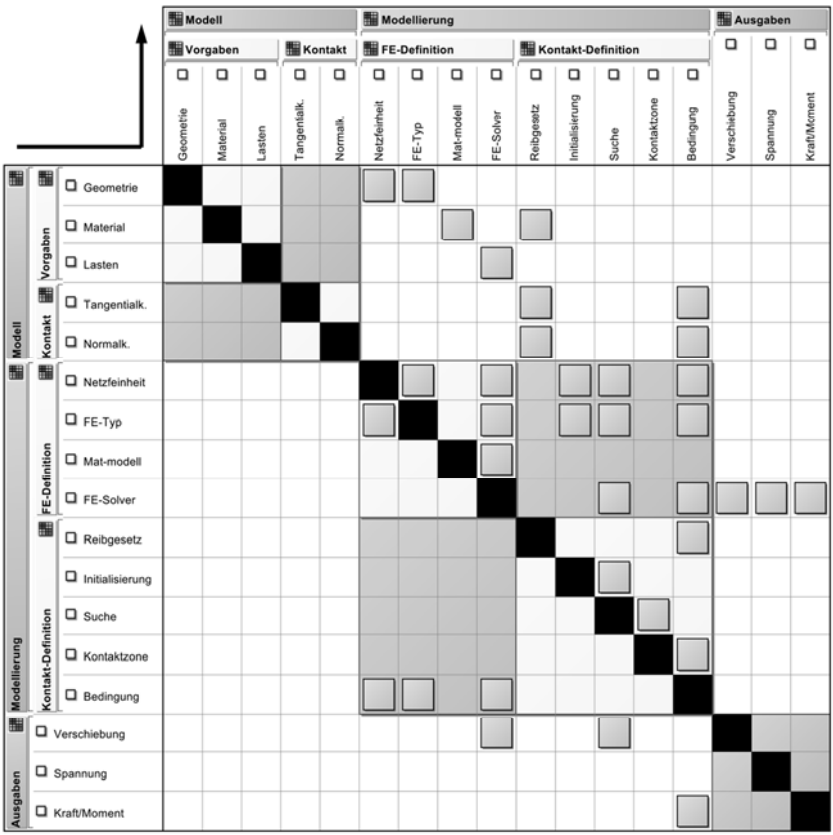


Bild 2: DSM FE-Kontaktanalyse, erstellt mit [6]

2.3 Analyse der DSM zur FE-Kontaktanalyse

Die DSM aus Bild 2 zeigt den starken sequentiellen Charakter der FE-Kontaktanalyse. Dabei ist hauptsächlich die obere Dreiecksmatrix gefüllt (Upstreaming). Es existieren jedoch auch einige Parameter, die zeitlich frühere Einflussgrößen beeinflussen. Die Modellparameter sind unabhängig voneinander.

Zur Beschreibung der Korrelation von Modell- und Modellierungsparametern muss die Untermatrix Modellparameter – Modellierungsparameter betrachtet werden. Dazu kann aus der DSM abgelesen werden, dass die Geometrie die Diskretisierungseigenschaften, Elementtyp und Vernetzungsgrad festlegen und die Materialparameter das Materialmodell für die FEA kalibrieren. Die Lasten der FEA spiegeln sich direkt im zu lösenden Gleichungssystem als diskretisierter Kraftvektor wieder [7]. Speziell für die FE-Kontaktanalyse ist die Untermatrix Modellparameter – Kontaktdefinition von Interesse. Die Materialparameter liefern Informationen für das Reibgesetz der Kontaktflächen [8]. Das Reibgesetz ist wiederum abhängig von den Kontaktvorgaben (Normal- und Tangentialkontakt). Einerseits wird es nur dann in die Lösung der Kontaktanalyse eingehen, wenn Tangentialkontakt vorausgesetzt ist und andererseits erfolgt in diesem Fall die Entscheidung der Relativbewegung der Kontaktflächen zueinander, mit Haften und Gleiten, durch z.B. das Coulombsche Reibungsgesetz mit Normalkraft und den entsprechenden Reibungskoeffizienten für Haft- und Gleitreibung [8].

Damit sind die Kontaktvorgaben auch eine direkte Eingangsgröße für die Kontaktbedingungen. Diese können z.B. mittels Lagrange-Multiplikator-, Augmented-Lagrange-, Perturbed-Lagrange-, Penalty- oder Nitsche-Methode realisiert werden [1, 2]. Modellierungsparameter, sowohl die der Kontaktdefinition als auch die FE-Definition liefern dagegen keine Informationen für die Modellparameter. Die Modellierungsparameter untereinander zeigen hingegen Up- und Downstreaming-Effekte. Wechselseitige Abhängigkeiten zeigt die DSM innerhalb der Parameter zur FE-Definition. Dabei haben die Diskretisierung beschreibenden Größen Netzfeinheit und Elementtyp mehrere Abhängigkeiten. Sie stellen Eingangsgrößen für den FE-Solver sowie die Kontaktsuche und Kontaktinitialisierung dar und stehen gleichzeitig in einer gekoppelten Beziehung mit der Kontaktbedingung. In 2.4 soll die indirekte sequentielle Abhängigkeit des Vernetzungsgrades von der Belastung an einem Beispiel näher erläutert werden. Die Parameter der Kontaktdefinition sind hauptsächlich sequentiell abhängig und folgen dem Ablauf Kontaktsuche, Kontaktinitialisierung, Kontaktzone und Kontaktbedingung. Eine

Ausnahme stellt die Kontaktbedingung dar, die in indirekt gekoppelter Abhängigkeit mit dem Reibgesetz steht, da je nach maximaler Reibkapazität der Kontaktfläche, berechnet aus den Kontaktkräften, die Kontaktbedingung verändert und die Iteration erneut durchzuführen ist [8]. In der Untermatrix FE-Definition – Kontaktdefinition zeigt sich, dass die Kontaktbedingung im besonderen Maße die frühere Einflussgröße der Vernetzung beeinflusst. Je nach Diskretisierung des Kontaktbereichs muss der Vernetzungsgrad und der Elementtyp entsprechend gewählt werden. So ist bei Knoten-Segment-Kontakt der Diskretisierungsgrad höher zu wählen als bei Segment-Segment-Kontakt, um eine ausreichend genaue Beschreibung des Kontaktbereichs zu erzielen [2, 3]. Genauso stellen die Verschiebungen eine Eingangsgröße für die nächste Iteration der Kontaktberechnung dar.

2.4 Anwendung der DSM zur Untersuchung des Einflusses von Diskretisierungsgrad auf den Kontaktbereich am Beispiel von Stirnrädern

Am Beispiel einer Stirnradstufe soll eine in der DSM gezeigte Korrelation von Modell- und Modellierungsparameter analysiert und bewertet werden. Dafür wird die indirekt gekoppelte Abhängigkeit von Vernetzungsgrad, Kontaktzone und Belastung näher erläutert (Bild 3).

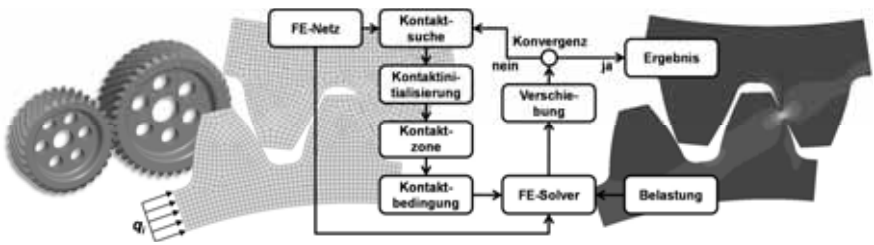


Bild 3: Stirnradstufe, FE-Modellund iterativer Lösungsprozess FE-Kontaktanalyse

Das FE-Modell besteht aus 2D-Scheibenelementen mit quadratischen Ansatzfunktionen. Die Lagerung ist versteift durch Rigid-Link-Elemente. Die Berechnung erfolgt mit linear elastischem Materialmodell ($E = 206000\,N/mm^2$, $\nu = 0{,}3$), fünf verschiedenen Vernetzungs-graden *NF0,51, NF0,26, NF0,07, NF0,03* und *NF0,02* mit der jeweils mittleren Elementkantenlänge von $0{,}51\,mm$ bis $0{,}02\,mm$ und fünf Streckenlasten q_i von $400\,N/mm$ bis $2000\,N/mm$, welche lastschrittweise aufgegeben werden. Die FE-Modellbildung, Berechnung und Visualisierung erfolgt mit Z88 Aurora [9] bzw. Z88CON.

3 Ergebnisse und Zusammenfassung

Die Untersuchung des Kontaktbereichs zeigt, dass mit höherem Vernetzungsgrad bei gleicher Belastung die Ausdehnung des Kontaktbereichs weniger starken Sprüngen unterworfen ist als bei niedrigeren Vernetzungsgraden. Die Begründung dafür ist die sprunghafte Zunahme der Kontaktbereichslänge mit zuvor inaktiven Kontaktknoten in Kombination mit der vergleichsweise großen mittleren Elementkantenlänge im Kontaktbereich (Bild 4, li.). Aus dem gleichen Grund vergrößert sich der Kontaktbereich mit Zunahme der Last bei konstantem Vernetzungsgrad (Bild 4, re.). Nur wenn die Last eine ausreichende Verschiebung der Kontaktknoten bewirkt, wird der zur Kontaktinitialisierung notwendige Trennabstand überschritten und der Kontaktknoten aktiv.

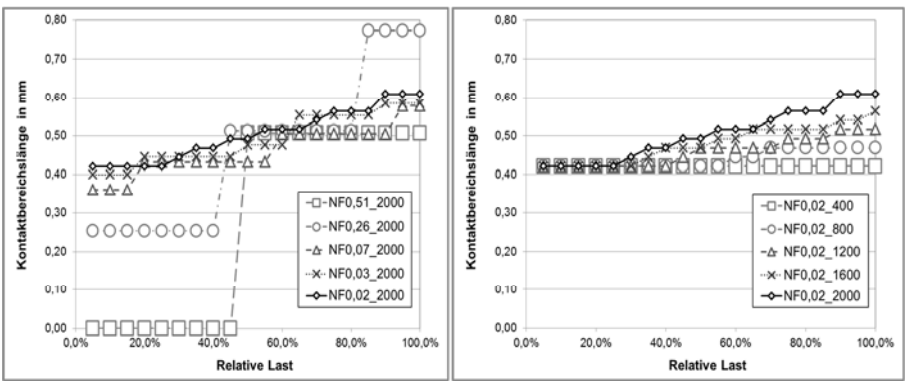


Bild 4: Vergrößerung des Kontaktbereichs in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades bei konstanter Last (li.), Vergrößerung des Kontaktbereichs in Abhängigkeit der Last (re.)

Wird die Kontaktbereichslänge $l_{NF0,02}$ des höchsten Vernetzungsgrads *NF0,02* als am zuverlässigsten betrachtet, kann eine Matrix (Tabelle 1) aufgestellt werden, die die Zuverlässigkeit z einer Kontaktbereichslänge l_{NFi} für eine bestimmte Last beschreibt (1).

$$z_i = 1 - \frac{\left| l_{NFi} - l_{NF0,02} \right|}{l_{NF0,02}} \tag{1}$$

Daraus kann abgeleitet werden, dass mit zunehmender Last auch geringere Vernetzungsgrade Ergebnisse liefern, die nur gering von denen mit höheren Vernetzungsgraden abweichen. Bei geringen Belastungen sind die höheren Vernetzungsgrade in der Zuverlässigkeit jedoch überlegen. Für das berechnete Beispiel kann demnach ausgesagt

werden, dass ein Vernetzungsgrad von $0{,}03\ mm$ mittlerer Kantenlänge im Kontaktbereich akzeptable Ergebnisse verglichen mit dem höchsten Diskretisierungsgrad bei geringer Rechenzeit liefert. Das Beispiel zeigt, dass mit Hilfe der DSM gezielt Abhängigkeiten in der komplexen FEA strukturiert, isoliert und analysiert werden können.

Tabelle 1: Beurteilung der Zuverlässigkeit des Kontaktbereichs für die Stirnradstufe aus Bild 3

Zuverlässigkeit		Streckenlast in N/mm					Mittlere Zuverlässigkeit
		400	800	1200	1600	2000	
Diskretisierungsgrad	*NF0.51*	0,00%	0,00%	98,14%	89,88%	82,95%	54,20%
	NF0.26	60,38%	90,63%	99,30%	90,94%	73,36%	82,92%
	NF0.07	97,32%	92,36%	97,83%	89,60%	94,51%	94,32%
	NF0.03	94,20%	95,17%	92,32%	98,16%	95,62%	95,09%
	NF0.02	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Literatur

[1] Wriggers, P.: *Finite Element Algorithms for Contact Problems*. Archives of Computational Methods in Engineering, Volume 2 (1995), Number 4, 1-49.

[2] Wriggers, P.: *Computational Contact Mechanics*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. - ISBN 978-3-540-32608

[3] Laursen, T.A.: Computational Contact and Impact Mechanics: Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis.2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2010. - ISBN 978-3-642-07685-5

[4] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design.*1. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2009. - ISBN 978-3540878889

[5] Yassine, A.A.: An Introduction to Modeling and Analysing Complex Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM) Method. Quaderni di Management (Italian Management Review), No.9, 2004.

[6] Wynn, D.; Nair, S.: *Cambridge Advanced Modeller*. URL: http://www-edc.eng.cam.ac.uk/cam/. Stand: 15.07.2011.

[7] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure. Eine leicht verständliche Einführung*. 3. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009. - ISBN 978-3446402157

[8] Bathe, K.-J.; Chaudhary, A.: *On Finite Element Analysis of large Deformation frictional Contact Problems*. North-Holland Mathematics Studies, Volume 94, 1984, Pages 123-147, Unification of Finite Element Methods.

[9] Rieg, F.: *Z88 Aurora*. URL: http://www.z88.de/. Stand: 15.07.2011.

Ermittlung und Analyse des dynamischen Einsatzverhaltens von Zahnrädern im Antriebsstrang mit Hilfe der Zahnkontaktanalyse

Christian Brecher, Christof Gorgels, Christian Carl

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen
Email: C.Carl@wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *Zahnradgetriebe kommen in vielen modernen Antriebssystemen zum Einsatz, die durch dynamisches Systemverhalten gekennzeichnet sind. Hierzu zählen beispielsweise Kraftfahrzeuge, Windenergieanlagen und Luftfahrtsysteme. Dabei treten häufig dynamische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemteilen durch eine konstruktive Kopplung auf. Moderne Konstruktionstendenzen wie Leichtbau und Systemintegration tragen hierzu zunehmend bei. Aufgrund dessen gewinnt die dynamische Interaktion im Antriebsstrang zunehmend an Bedeutung. Dabei treten insbesondere Fragestellungen von verringerter Tragfähigkeit und erhöhter Geräuschentwicklung durch Zusatzbelastungen infolge dieser dynamischen Zusammenhänge in den Vordergrund. Ursache hierfür sind sowohl konstruktiv bedingte Resonanzerscheinungen als auch die damit in Wechselwirkung stehenden Anregungsmechanismen der einzelnen Funktionseinheiten und letztlich der hierzu eingesetzten Maschinenelemente.*

Aus diesem Grunde wird die Ermittlung und Vorhersage des dynamischen Verhaltens einer Verzahnung als zentrales Maschinenelement des Antriebsstrangs immer wichtiger. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Zahnradstufe prinzipbedingt niemals anregungslos ausgelegt werden kann. Vielmehr ist es die Aufgabe des Konstrukteurs die Verzahnungsgeometrie möglichst anregungsarm zu gestalten und die Antriebstrangkonstruktion so zu definieren, dass Resonanzen im verbleibenden Anregungs- und Betriebsbereich der Verzahnung vermieden werden. Ein etabliertes Konstruktionswerkzeug stellt hierzu die dynamische Systemsimulation mit Hilfe von MKS-Programmen dar. Die Abbildung des Eingriffsverhaltens der Verzahnungen kann dabei auf verschiedenen Detailebenen erfolgen. Häufig ist eine sehr genaue Betrachtung der mikrogeometrischen Kontaktverhältnisse und der daraus resultierenden Lastverteilung auf die einzelnen Zahnpaare erforderlich, da das dynamische Anregungsverhalten der Verzahnung hierdurch sehr stark beeinflusst wird. Am WZL wurde daher in den vergangenen Jahren ein Simulationswerkzeug in Form eines Kraftkoppelelementes entwickelt, das es gestattet, das dynamische Anregungsverhalten von Verzahnungen auf Grundlage der realen Makro- und Mikrogeometrie im Antriebsstrang zu berechnen. Auf diese Weise wird es möglich, sowohl die Verzahnungsgeometrie als auch den Antriebsstrang möglichst anregungsarm zu gestalten.

In diesem Beitrag wird die Methode des Kraftkoppelelementes hergeleitet und vorgestellt. Die praktische Anwendung wird anhand einer Prüfverzahnung dargestellt. Als Referenzantriebstrang wird dabei ein Komponentenprüfstand herangezogen, der seit einiger Zeit zur Anregungs- und Geräuschuntersuchung von Verzahnungen am WZL etabliert ist und alle Konstruktionselemente eines praxisnahen Antriebsstrangs beinhaltet. Die Berechnungsergebnisse zum Anregungsverhalten werden mit Prüfstandsuntersuchungen abgeglichen. Dadurch wird eine Einordnung der Gestaltung der Verzahnung hinsichtlich des dynamischen Verhaltens ermöglicht, sodass abhängig vom Betriebsbereich konstruktive Maßnahmen zur Optimierung des Anregungsverhaltens abgeleitet werden können. Der Beitrag wird mit einem Ausblick auf die gehörbezogene Anregungsanalyse und die Bewertung der dynamischen Bauteilbelastung abgeschlossen.

Abstract: *Modern drive trains require an increased system analysis and comprehension due to increased dynamic interactions and interdependencies. Construction tendencies like lightweight construction, electrification and high velocity application generate additional demand on analysing, determining and avoiding critical dynamic operating conditions. Thus, tools must be provided for the construction and engineering of modern drive trains that allow determining and evaluating the dynamic system interaction. Since gear transmissions still play an important role in modern drive trains, there is a high demand for a tool to analyse and evaluate its dynamic behaviour in order to avoid inadmissible high noise generation and loads. Therefore, a force coupling element has been developed at the WZL since years that allows simulating the dynamic excitation of general gear transmissions in the dynamic MBS. This element is based on a highly detailed tooth contact analysis using FEM. In this report the underlying method is presented. Furthermore, a comparison between experimental and simulation results show the validation of this method. The report is concluded by an outlook on the perception related evaluation of gear excitation and on the realistic analysis of the dynamic load situation.*

Stichwörter: *Verzahnung, Realistische Geräusch- und Lastannahmen, Dynamik, Antriebsstrang, Systeme*

Keywords: *Gear Design, Realistic Noise and Load Assumptions, Dynamics, Drive Train, Systems*

1 Einleitung

Die zunehmende Systemkopplung und eine daraus hervorgerufene dynamische Wechselwirkung erfordert eine verbesserte Untersuchung, Vorhersage und Vermeidung von resonanzkritischem Betriebsverhalten. Konstruktionstendenzen wie Leichtbau, Elektrifizierung und Hochdrehzahlanwendung tragen zunehmend zu diesem Bedarf bei. Um unzulässige Bauteilbeanspruchung und Geräuschabstrahlung zu vermeiden, muss bei der Konstruktion und Systementwicklung von Antriebssträngen folglich der Fokus sowohl auf die systemimmanente Eigendynamik als auch die dynamische Anregung der einzelnen Funktionseinheiten gelegt werden.

In vielen Anwendungsbereichen werden Zahnradgetriebe als Funktionselement zur Leistungsübertragung verwendet. Aufgrund verschiedener Einflüsse, die in Abschnitt 2

beschrieben sind, weisen Zahnradgetriebe stets eine nicht zeitinvariante Übersetzung auf, was eine Schwingungsanregung im Antriebstrang zur Folge hat. Diese Anregung tritt vornehmlich in der Frequenz des Zahneingriffs und deren höheren Harmonischen auf. Treffen diese Anregungsfrequenzen in Abhängigkeit vom Betriebspunkt auf eine Eigenfrequenz des Antriebsstrangs, so kommt es zu Resonanzüberhöhungen. Für den Konstrukteur ergibt sich daraus die Aufgabenstellung, sowohl die Anregung im Zuge der geometrischen Verzahnungsauslegung zu optimieren als auch das Auftreten von Eigenfrequenzen im relevanten Betriebsbereich durch die Gestaltung des Antriebsstrangs zu vermeiden. Entsprechend müssen dem Konstrukteur Werkzeuge an die Hand gegeben werden, diese Wechselwirkung zu beurteilen. Seit einiger Zeit wird daher am WZL ein Kraftkoppelelement entwickelt, das zur Ermittlung der dynamischen Kraftanregung im Zahneingriff innerhalb eines MKS Modells des Antriebstrangs dient. Damit können realistische Annahmen für dynamisch auftretende Zahnkräfte ermittelt werden. Diese Methode wird im vorliegenden Bericht hergeleitet und mit Messergebnissen validiert.

2 Dynamisches Anregungsverhalten im Zahneingriff

Die Anregung im Zahneingriff lässt sich gemäß [1] in verschiedene Wirkmechanismen unterteilen. Diese sind in Bild 1 schematisch aufgeführt. Um ein möglichst konstantes Übersetzungsverhalten der Verzahnung zu gewährleisten, wird in der technischen Anwendung zumeist eine Evolventenform der Verzahnung eingesetzt. Diese hat die Eigenschaft, dass während des Abwälzvorganges von treibender auf getriebener Flanke der theoretische Hebelarm der gemeinsamen Normalkraft unverändert bleibt. Bei Erzielung einer idealen Evolvente würde sich somit ein geometrisch konstantes Übersetzungsverhältnis ergeben. In der Realität treten jedoch Abweichungen von dieser Idealform infolge von fertigungs-, montage- oder betriebsbedingten Einflüssen auf. Diese Abweichungen rufen eine nicht konstante Übersetzung hervor und wirken somit schließlich als Weganregung für den Zahneingriff. Als Funktionseinheit zur Leistungsübertragung übertragen Verzahnungen Kräfte, sodass dabei eine elastische Verformung der Zähne hervorgerufen wird. Im Zusammenwirken mit dem veränderlichen Kraftangriffspunktes am Zahn während des Abwälzvorganges kommt es zu einer veränderlichen Steifigkeit des Zahnpaares [2]. Wird berücksichtigt, dass üblicherweise mehr als ein Zahnpaar an der Kraftübertragung beteiligt ist, ergibt sich aus der dabei resultierenden Überlagerung ein

komplexer, zeitlicher Verlauf der Summensteifigkeit. Die so veränderliche Steifigkeit wirkt als Schwingungsanregung und wird mathematisch als Parameteranregung beschrieben. Kommt es weiterhin infolge von Fertigungsabweichungen oder lastbedingten Verformungen zu Teilungsfehlern, so treten Zahnflanken vorzeitig in Eingriff. Dann sind die Bedingungen der idealen Evolventenform nicht erfüllt. Infolgedessen weisen die in Kontakt tretenden Flanken unterschiedliche Geschwindigkeiten auf. Diese Relativgeschwindigkeit führt zum Impulsaustausch und ruft eine Stoßanregung hervor.

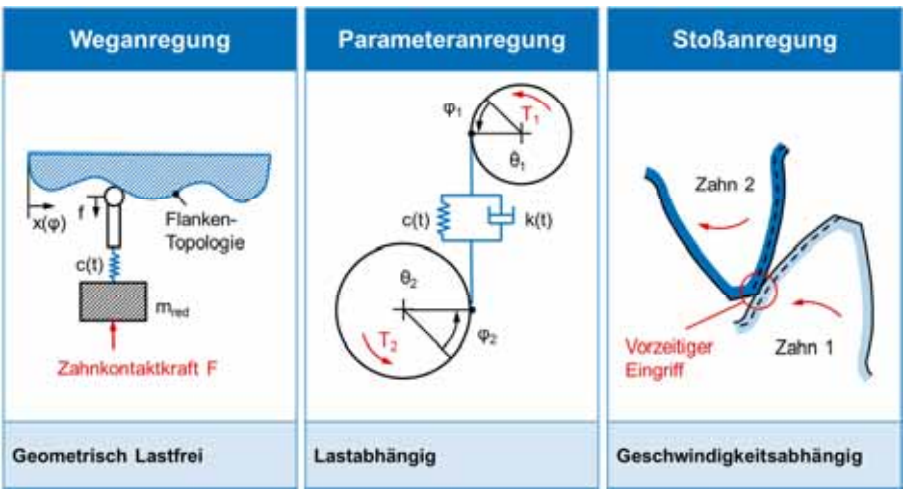


Bild 1: Überblick über die Anregungsmechanismen im Zahnkontakt

Eine Reduzierung des dynamischen Anregungsverhaltens der Verzahnung kann entsprechend dieser Mechanismen vor allem durch die Verminderung der Steifigkeitsschwankung, Kompensation von Fertigungsabweichungen und die Optimierung der Lastverteilung erzielt werden [3, 4]. Hierzu ist eine gezielte und betriebsgerechte Gestaltung der Makrogeometrie und der Flankentopologie der Verzahnung erforderlich. Dies kann insbesondere durch Anwendung einer detaillierten Zahnkontaktanalyse erfolgen, die der Methode des kennfeldbasierten Kraftkoppelelementes zugrunde liegt.

3 Methode zur Ermittlung des Verhaltens bei dynamischen Systembedingungen

Am WZL wird seit einigen Jahren ein kennfeldbasiertes Kraftkoppelelement entwickelt, das zur Ermittlung der dynamischen Anregung im Zahneingriff dient [5, 6]. Die entsprechende Methode ist in Bild 2 schematisch skizziert. Die Ausgangslage bildet dabei die Ermittlung der tatsächlichen Kontaktgeometrie der Verzahnung. Dies kann entweder durch analytische Vorgabe, Fertigungssimulation oder topographische Vermessung der Zahnflanken erfolgen. Auf Grundlage der so definierten Flankentopologien des Radsatzes wird eine Variationsrechnung mit Hilfe der FE-basierten Zahnkontaktanalyse im möglichen Betriebsbereich der Verzahnung durchgeführt. Auf diese Weise werden für diesen Variationsbereich Kennfelder der Anregung im Voraus ermittelt, die anschließend zur Dynamiksimulation einem Kraftkoppelelement übergeben werden.

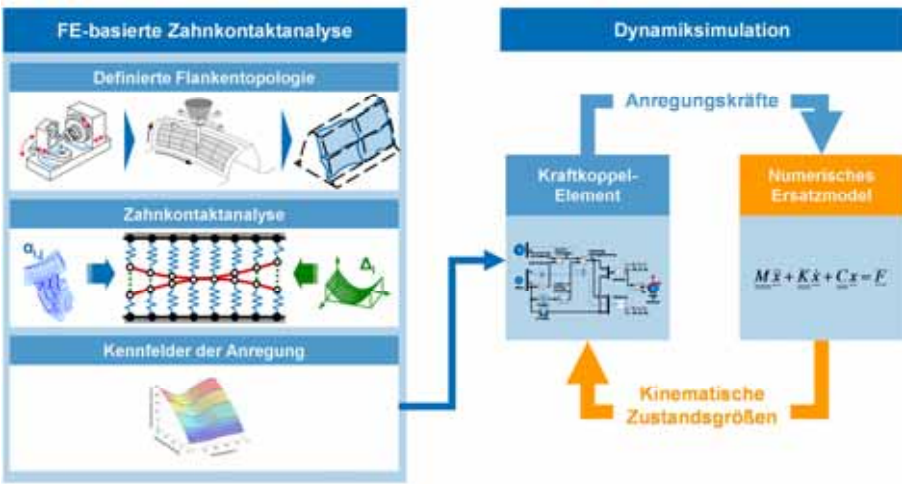


Bild 2: Schema des kennfeldbasierten Kraftkoppelelementes zur Berücksichtigung der dynamischen Anregung im Zahneingriff

Dieses Kraftkoppelelement ist in das zeitdiskrete, numerische Dynamikmodell des Antriebsstrangs eingebunden. In jedem Zeitschritt erhält es aus dem numerischen Ersatzmodell des Antriebstrangs kinematische Zustandsgrößen, die die Randbedingungen für den Zahneingriff darstellen. Durch Interpolation innerhalb der eingebundenen

Anregungskennfelder werden dann die dynamischen Zahnkräfte für den nächsten Zeitschritt berechnet. Diese Methode gestattet die Rückführung des dynamischen Eingriffsverhaltens der Verzahnung auf die detaillierte, FE-basierte Zahnkontaktanalyse, ohne dass das Kontaktproblem in jedem Zeitschritt gelöst werden muss. Auf diese Weise können komplexe, dynamische Betriebspunkte effizient untersucht werden.

4 Prüfstandsuntersuchungen und Berechnungsergebnisse

Die Methode des kennfeldbasierten Kraftkoppelelementes soll in diesem Bericht anhand eines Komponentenprüfstands am WZL validiert werden, Bild 3.

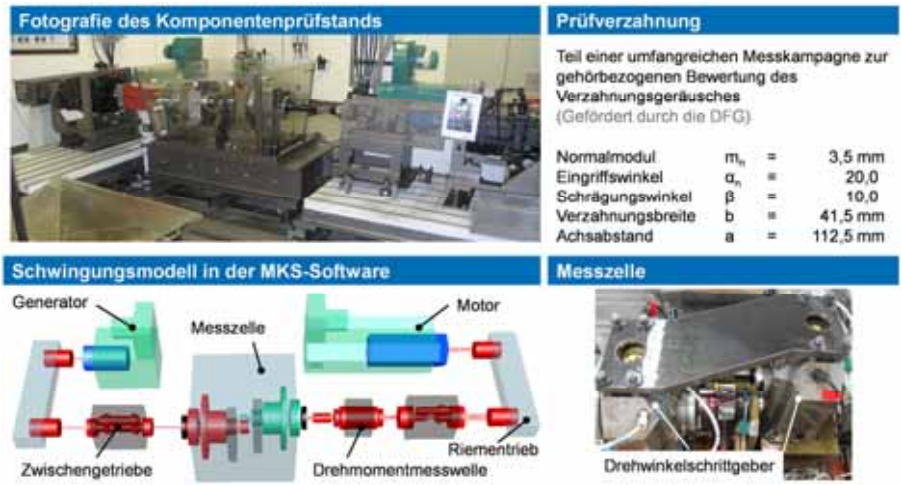


Bild 3: Prüfaufbau, Simulationsmodell und Prüfverzahnung

Dieser Prüfaufbau nach [7] dient zur messtechnischen Erfassung des Anregungsverhaltens in Form der nach VDI 2608 standardisierten Wälzabweichung, die die Ungleichmäßigkeit der Übersetzung beschreibt. In einem von der DFG geförderten Forschungsprojekt werden damit verschiedene Prüfradsätze hinsichtlich ihres spezifischen, lastabhängigen Anregungsverhaltens untersucht, bevor sie zur Geräuschanalyse in einem Prüfgetriebe eingesetzt werden. Die hier ausgewählte Prüfverzahnung entstammt ebenfalls der Prüfmenge dieses Vorhabens. Ausgehend vom tatsächlichen Aufbau des Antriebsstrangs wurde ein dynamisches Schwingungsmodell in der Mehrkörpersimulation abgebildet und das kennfeldbasierte Kraftkoppelelement für die

Prüfverzahnung in der Messzelle eingesetzt. Die Drehwinkelschwankung in der Prüfverzahnung wird mit Winkelschrittgebern in den Lagerböcken von An- und Abtrieb der Messzelle gemessen und in die Wälzabweichung im Eingriff umgerechnet. Die so experimentell in verschiedenen Drehzahlen mit einer Schrittweite von 100 min^{-1} erfasste Wälzabweichung kann mit der rechnerisch bestimmten Größe verglichen werden, Bild 4 Zur besseren Veranschaulichung wird in der Darstellung die erste Zahneingriffsordnung der Prüfverzahnung betrachtet.

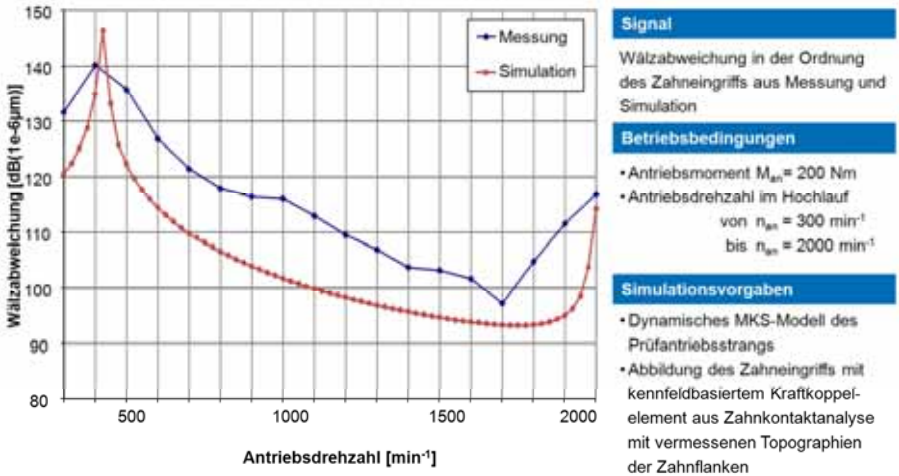


Bild 4: Ergebnisse aus Messung und Simulation für die Verzahnungsanregung

Das dargestellte Ergebnis zeigt zunächst zwei Resonanzbereiche, die sowohl in Messung als auch Simulation von der Zahneingriffsfrequenz während des Drehzahlhochlaufs getroffen werden. Als Hauptresonanz kann dabei eine Frequenz von etwa 176 Hz identifiziert werden, die im Bereich von 420 min^{-1} erreicht wird. Daneben kann eine Resonanzfrequenz im oberen gemessenen Drehzahlbereich festgestellt werden, die bei etwa 835 Hz liegt. In Verlauf und Anregungsintensität, insbesondere in den Resonanzbereichen, zeigen Experiment und Simulation sehr gute Übereinstimmung. Lediglich in den Zwischenbereichen kommt es zu größeren Abweichungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Schwingungsmodell Resonanzfrequenzen mit geringerer Bedeutung für den Zahneingriff (hier etwa bei 1000 min^{-1} und 1350 min^{-1}) noch unberücksichtigt sind. Weiterhin beruhen die verwendeten Dämpfungsparameter auf einer

phänomenologischen Abschätzung, da eine messtechnische Erfassung nahezu unmöglich ist. Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass das entwickelte Rechenmodell das reale dynamische Verhalten von Verzahnung und Prüfstand sehr gut abbildet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Konstruktion von Antriebsträngen mit Zahnradstufen als Funktionseinheit steht nun mit dem kennfeldbasierten Kraftkoppelelement in der Mehrkörpersimulation ein Werkzeug zur Verfügung, das die Berücksichtigung des Anregungsverhaltens der Verzahnung im System gestattet. Dies ist durch den Abgleich mit experimentellen Messdaten validiert worden. Auf Grundlage dieser Methode ist es möglich, die konstruktive Gestaltung der Verzahnung und des Antriebsstrangs so zu optimieren, dass die Anregung reduziert und der Betrieb in Resonanzbereichen vermieden wird. In weiteren, von der DFG geförderten, Untersuchungen wird aktuell der Zusammenhang zwischen Radsatzanregung, dynamischem Systemverhalten und menschlicher Geräuschwahrnehmung ermittelt. Ziel dabei ist es, bereits im Konstruktionsstadium der Verzahnung eine Bewertung hinsichtlich der Lästigkeit des hervorgerufenen Getriebegeräusches vornehmen zu können. In Zukunft wird es darüber hinaus notwendig sein, die Berechnung des lokalen dynamischen Beanspruchungsverhaltens der Verzahnung auf Grundlage der Betriebssimulation ermöglichen zu können. Nur auf diese Weise können realistische Lastannahmen für das Antriebssystem und insbesondere die Verzahnung getroffen werden, wodurch eine betriebs- und anwendungsgerechte Konstruktion moderner Antriebsstränge möglich wird.

Literatur

[1] Salje, H.: Optimierung des Laufverhaltens evolventischer Zylinderrad-Leistungsgetriebe – Einfluss der Verzahnungsgeometrie auf Geräuschemission und Tragfähigkeit, Diss., RWTH Aachen, 1987

[2] Bosch, M.: Über das dynamische Verhalten von Stirnradgetrieben unter besonderer Berücksichtigung der Verzahnungsgenauigkeit, Diss., RWTH Aachen, 1965

[3] Möllers, W.: Parametererregte Schwingungen in einstufigen Zylinderradgetrieben – Einfluss von Verzahnungsabweichungen und Verzahnungssteifigkeitsspektren, Diss., RWTH Aachen, 1982

[4] Müller, R.: Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben, Diss., TU München, 1991

[5] Brecher, C.; Gorgels, C.; Gacka, A.: Development of a Force Element for the Emulation of the Dynamic Behaviour of Bevel Gears, in: VDI-Berichte Nr. 2071, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2009

[6] Brecher, C.; Gorgels, C.; Carl, C.: Inclusion of the premature Meshing Impact in an augmented FE-based Force Coupling Element for Spur Gears, in: VDI-Berichte Nr. 2108, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2010

[7] Hohle, A.: Auswirkungen von Rauheit, Oberflächenstruktur und Fertigungsabweichung auf das Lauf- und Geräuschverhalten hartfeinbearbeiteter hochüberdeckender Zylinderräder, Diss., RWTH Aachen, 2002

Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Kegelradfräsen durch simulationsbasierte Standzeitoptimierung

Christian Brecher*, Fritz Klocke, Christof Gorgels**, Ario Hardjosuwito***

*Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen
Steinbachstr. 19, 52074 Aachen
Email: a.hardjosuwito@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

** Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen

Inhalt: *Für die drehsteife Leistungsübertragung in Winkelgetrieben werden überwiegend Kegelräder verwendet. Kegelräder finden u.a. Anwendung in Hinterachsgetrieben von Automobilen, in Helikoptern, in Schiffsgetrieben und in Industriegetrieben. Die Fertigung der Kegelräder wird standardmäßig auf speziellen Kegelradfräsmaschinen mit sechs CNC-Achsen durchgeführt. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge des Fertigungsprozesses ist das Kegelradfräsen nicht ohne weiteres analytisch beschreibbar. Vor allem beim Wälzprozess zur Ritzelfertigung wird eine Analyse der Fertigung und daraus ein Ableiten der Belastungen, des Verschleiß- und Standzeitverhaltens der Werkzeuge auf analytischem Wege nahezu unmöglich. Aufgrund des nicht vorhersagbaren Verschleißverhaltens der Werkzeuge kommt es beim Kegelradfräsen immer wieder zu ungeplanten Produktionsunterbrechungen in Form von Werkzeugwechseln, welche mit hohen Zusatzkosten verbunden sind. Wegen des Mangels an Möglichkeiten für simulationsbasierte Analysen zur Optimierung des Verschleiß- und Standzeitverhaltens erfolgt die Prozessauslegung im Vorfeld der Produktion in Realversuchen iterativ (Trial-and-Error). Dies ist ebenfalls mit hohen Zusatzkosten verbunden. Für eine simulative Analyse des Verschleißverhaltens und einer Standzeitoptimierung ist es unumgänglich, den Fertigungsprozess mit seiner Kinematik sowie den Werkzeug- und Werkstückgeometrien abzubilden und hieraus Zerspankenngrößen zur Verschleißanalyse zu berechnen. Im Rahmen dieses Berichtes wird gezeigt, dass es möglich ist mittels einer Verschleißkenngröße, welche aus einer Fertigungssimulation berechnet wird, lokale Verschleißmaxima zu identifizieren und basierend auf einem qualitativen Vergleich die Standzeit zu optimieren. Die Simulation bietet somit erstmals die Möglichkeit den Fertigungsprozess des Kegelradfräsens detailliert hinsichtlich des Werkzeugverschleißes zu analysieren. Hierdurch können die vom Konstrukteur ausgelegten Verzahnungen hinsichtlich der Herstellbarkeit und Wirtschaftlichkeit zum Zeitpunkt der Produktentwicklung vor dem Produktionsbeginn bewertet und gegebenenfalls optimiert werden. Die präsentierten Ergebnisse fließen in ein Standzeitmodell zum Kegelradfräsen ein, welches im Rahmen eines DFG-Projektes entwickelt wird.*

Abstract: *The transmission of torque and speed from one axle to an orthogonal axle can be realised by bevel gears. Bevel gears are applied in helicopters, in marine, in rear axles of automobiles and industrial*

drives. The manufacturing of bevel gears is generally performed in a complex CNC cutting process. Due to unpredictable tool wear in bevel gear cutting, unexpected production stops e.g. for tool changes occur. This leads to additional manufacturing costs, because of its complexity. It is currently not possible to analyse the bevel gear cutting process sufficiently. So the design of the cutting process happens iteratively in order to find the best process parameters for a high productivity and optimal tool wear. Thus, an exact knowledge of the tool wear behaviour is necessary. Hence, a manufacturing simulation for bevel gear cutting has been developed at WZL. This simulation enables a detailed analysis of the process and consequently of the tool wear. Within this report a new approach for the tool wear analysis is presented. The calculable new characteristic value enables a simulation-based tool wear optimization for the first time. Thus an evaluation of the cutting process by the engineer is possible before production start. All the presented investigations are to be considered in a simulation-based tool life prediction model which will be developed within a project funded by the German Research Foundation (DFG).

Stichwörter: *Fertigungssimulation, Verschleißanalyse, Standzeitoptimierung*

Keywords: *Manufacturing Simulation, Tool Wear Analysis, Tool Life Optimization*

1 Einleitung

Im Bereich der spanenden Bearbeitung ist die Wirtschaftlichkeit von Fertigungsprozessen wesentlich durch das Verschleiß- bzw. Standzeitverhalten der Werkzeuge bestimmt. Um die Wirtschaftlichkeit zu steigern, bedarf er der genauen Kenntnis des Verschleiß- und Standzeitverhaltens der Werkzeuge. Eine Standzeitoptimierung bietet somit ein hohes Potential zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Fräsprozesses. Diese Optimierung kann jedoch erst realisiert werden, wenn genaue Kenntnis über die Belastung und den Verschleiß einzelner Werkzeugbereiche existiert. Aufgrund der komplexen Prozesskinematik ist das Kegelradfräsen nicht ohne weiteres rein analytisch beschreibbar. Vor allem beim Wälzprozess zur Ritzelfertigung wird eine Analyse des Verschleiß- und Standzeitverhaltens auf analytischem Wege nahezu unmöglich. Zusätzlich erschweren der hohe lokale Werkzeugverschleiß und das nicht reproduzierbare Verschleißverhalten (Bild 1) die Auslegung einer prozesssicheren Fertigung. Wegen des nicht vorhersagbaren Verschleißverhaltens der Werkzeuge beim Kegelradfräsen kommt es immer wieder zu ungeplanten Produktionsunterbrechungen in Form von Werkzeugwechseln, welche mit hohen Zusatzkosten verbunden sind. Aufgrund des Mangels an Möglichkeiten zur Analyse des Verschleiß- und Standzeitverhaltens erfolgt die Prozessauslegung während der Produktionsphase meist iterativ, da die optimalen Prozessparameter oftmals per kostenintensivem Trial-and-Error ermittelt werden.

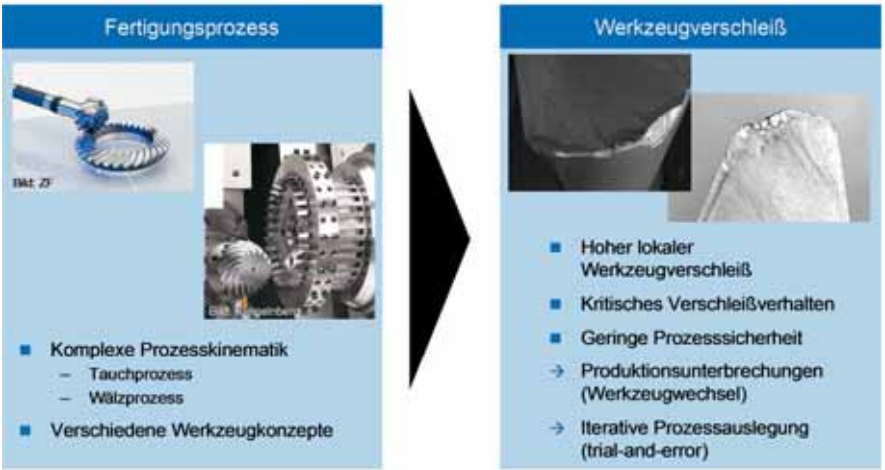


Bild 1: Verschleißproblematik beim Kegelradfräsen

Aus wirtschaftlichen Aspekten ist es erstrebenswert den Prozess schon möglichst früh im Produktentstehungszyklus optimal auszulegen, sodass mögliche Folgekosten vermindert bzw. vermieden werden. Daher wurde am WZL der RWTH Aachen eine Fertigungssimulation („KegelSpan“) entwickelt, die es erstmals ermöglicht detaillierte Kenngrößen zur Analyse des Kegelradfräsens zu berechnen [1, 2]. Leider korrelieren die berechneten Kenngrößen oftmals nicht mit dem realen Verschleißverhalten. Somit existiert bis dato keine Möglichkeit und keine Kenngröße, die eine Nachvollziehbarkeit des Werkzeugverschleißes für verschiedene Kegelradfräsprozesse, wie Tauch- oder Wälzprozesse, ermöglicht. Zudem sollte mit Hilfe dieser Kenngröße eine Analyse von lokalen Verschleißmaxima auf der Werkzeugschneide möglich sein. Ziel des Berichtes ist es zu zeigen, dass eine neue integrierte Verschleißkenngröße erstmals eine Nachvollziehbarkeit des Werkzeugverschleißes beim Kegelradfräsen ermöglicht (Fallstudie 1). Aufbauend hierauf wird ein nächster Schritt in Richtung Verschleißvorhersage und Standzeitoptimierung vollzogen (Fallstudie 2). Fokussiert wird in diesem Bericht auf das Einzelteilverfahren mittels Messerköpfen mit Hartmetall-Stabmessern.

2 Entwicklung einer neuen Kenngröße zur Verschleißanalyse

Im Zuge von Untersuchungen und Analysen zum Werkzeugverschleiß beim Kegelradfräsen [3] wurde deutlich, dass vor allem im Bereich des Eckenradius der Werkzeuge eine einfache Betrachtung der Spanungsdicke nicht ausreichend ist. Dies ist im Einfluss der mehrflankigen Spanbildung im Übergangsbereich zwischen Flanke und Kopf der Werkzeugschneide begründet. In diesem Bereich kommt es im Realprozess zu Stauch- und Quetschvorgängen des Spans. Die räumliche Stauchung des Spans hängt maßgeblich vom Eingriffs- und Spanwinkel des Werkzeugs ab. Um diese Stauchvorgänge während der Spanbildung aufgrund des Eckenradius bzw. Eingriffswinkels in der Fertigungssimulation „KegelSpan“ berücksichtigen zu können, wird der Gradient der Spanungsdicke $\Delta h_{cu}/\Delta l_s$ herangezogen werden. Dieser Gradient gibt die Steigung der Spanungsdicke h_{cu} entlang der abgewickelten Schneidkante l_s wider. Je höher die Stauchung des Spans, desto größer ist die thermische und mechanische Belastung am Schneidteil und somit die Gefahr eines erhöhten Werkzeugverschleißes.

Da die Spanbildung und demzufolge auch die Spanstauchung räumlich erfolgt, gilt es nicht nur die Wirk-Bezugsebene, wie beim Gradient der Spanungsdicke geschehen, gemäß [4] zu berücksichtigen, sondern auch die Wirk-Schneidenebene, in der der Span orthogonal zur Spanfläche abfließt. Beide Ebenen berücksichtigen die Wirk-Bewegung der Schneide resultierend aus der Vorschub- und Schnittbewegung [5]. Wird anstatt der Wirk-Bezugsebene die Wirk-Schneidenebene betrachtet, so kann als Kenngröße zur Beschreibung des Stauchvorgangs der Gradient des Wirk-Spanwinkels $\Delta\gamma_e/\Delta l_s$ herangezogen werden. Diese Kenngröße spiegelt den veränderlichen Spanwinkel entlang der Schneidkante wider und ist somit eine weitere Größe für die unterschiedliche Spanbildung entlang der Schneide und somit für die Spanstauchung. Wechselt bspw. der Gradient in einem kurzen Schneidenbereich sprungartig seinen Wert bzw. das Vorzeichen, so resultiert dies im Realprozess in einer veränderlichen Spanbildung und demzufolge in einer wechselnden Umformarbeit an der Schneide. Diese wechselnden Belastungen wirken sich negativ auf das Verschleißverhalten der Werkzeuge aus. Neben dem Aspekt der Spanstauchung und der damit einhergehenden Werkzeugbelastung, können noch zwei weitere Kenngrößen zur Bewertung der Werkzeugbelastung herangezogen werden. Die Gesamt-Wirklänge $l_{e,ges}$ beschreibt die Kontaktlänge, die ein Schneidenpunkt während des Schnittvorgangs unter Berücksichtigung der Wirk-Bewegung zurückgelegt hat, Bild 2.

Hierdurch kann für jeden Schneidenpunkt entlang der Werkzeugschneide die thermische und mechanische Belastung aufgrund des zerspanten Materials in einem ersten Ansatz analysiert werden. Je höher die Wirklänge, desto höher sind die eingebrachten Temperaturen bzw. die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück. Dies resultiert in einer höheren Belastung der Schneide. Weiterhin kann der Wirk-Freiwinkel [4] zur Analyse der Schneidenbelastung herangezogen werden. Der Wirk-Freiwinkel beeinflusst maßgeblich die Wärmeeinbringung in die Schneide [1]. Um die wechselnde thermische Beanspruchung entlang der Schneide auf der Freifläche untersuchen zu können, bietet sich die Betrachtung des Gradienten des Wirk-Freiwinkels $\Delta\alpha_e/\Delta l_s$ an. Je höher der Gradient des Wirk-Freiwinkels, desto größer ist die thermische Wechselbelastung auf der Freifläche der Schneide. Daher sollte der Fertigungsprozess inklusive Werkzeuggeometrie hinsichtlich eines geringen Wertes des Gradienten ausgelegt werden. Basierend auf den vorgestellten Kenngrößen, wurde eine neue integrierte Kenngröße K_G entwickelt, siehe Bild 2 rechts.

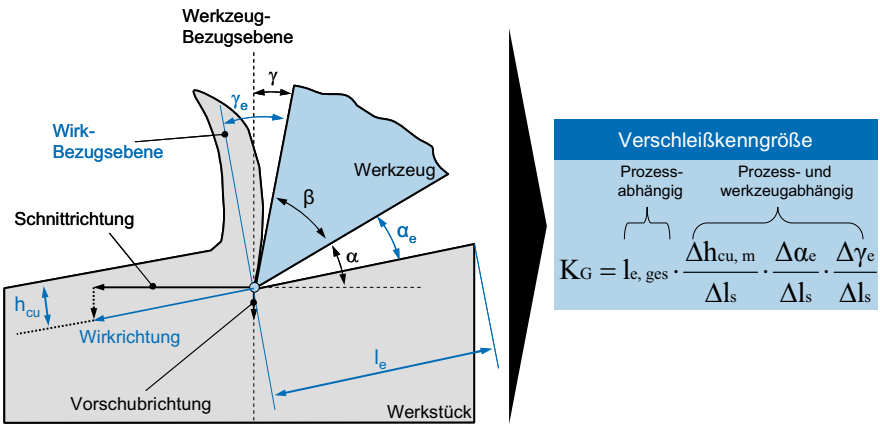


Bild 2: Integrierte Kenngröße zur Verschleißvorhersage

Hierbei wurde zum einen die Gesamt-Wirklänge $l_{e,ges}$ in der Formel integriert und zum anderen der Bezug der Gradienten der Kenngrößen auf die abgewickelte Schneidkantenlänge l_s. Die Kenngröße $l_{e,ges}$ stellt hierbei eine rein prozessabhängige Kenngröße dar, da sie primär vom Vorschub- und Schnittweg abhängt [4]. Die weiteren Kenngrößen (Gradienten der Spanungsdicke $\Delta h_{cu,m}/\Delta l_s$, des Wirk-Freiwinkels $\Delta\alpha_e/\Delta l_s$ und

Wirk-Spanwinkels $\Delta\gamma_e/\Delta l_s$) sind sowohl prozess- als auch werkzeugabhängig. Beispielsweise hängt die mittlere Spanungsdicke $h_{cu,m}$ nicht nur von der Schneidengeometrie ab, sondern auch von der Wirkrichtung. Diese wiederum ergibt sich aus der Vorschub- und Schnittbewegung der Schneide selbst. Ebenfalls aus der Wirkrichtung resultieren die Wirk-Winkel α_e und γ_e. Hierbei wird den konstruktiven Werkzeugwinkeln (α und γ) die Wirkrichtung überlagert.

3 Studie 1: Verschleißanalyse unterschiedlicher Werkzeugkonzepte

In der ersten Fallstudie werden reale Verschleißbilder mit der berechneten Kenngröße K_G verglichen. Ziel ist es die Korrelation der Verschleißkenngröße K_G mit dem real aufgetretenen Werkzeugverschleiß aufzuzeigen. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Werkzeugkonzepte exemplarisch analysiert. Es sollte festgestellt werden, welches der beiden Werkzeugkonzepte eine höhere Standzeit, aufgrund der berechneten Kenngröße K_G, zu erwarten hat, Bild 3. Das Konzept 1 besteht aus einem so genannten Vollprofilwerkzeug, d.h. pro Schnitt beziehungsweise pro Spanabnahme wird ein Dreiflankenspan erzeugt, der entlang des gesamten Lückenprofils verläuft.

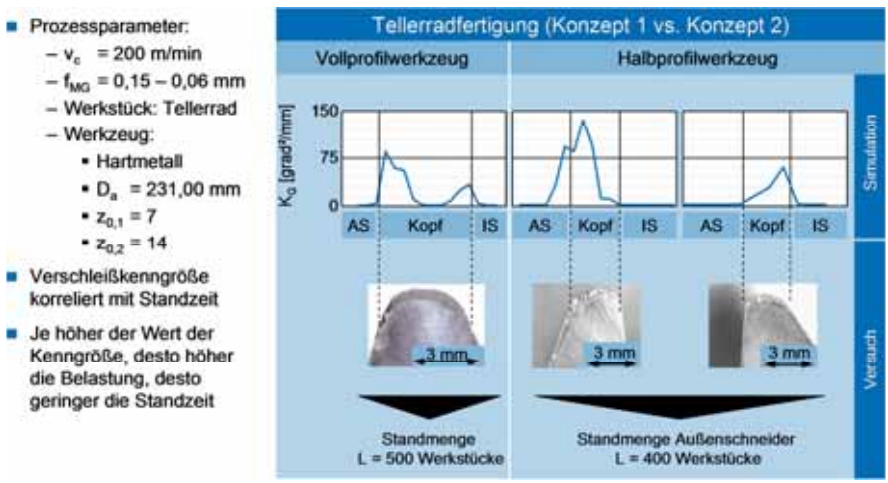


Bild 3: Vergleich zweier exemplarischer Werkzeugkonzepte zur Tellerradfertigung

Beim Konzept 2 der Halbprofilwerkzeuge existieren ein Außenschneider (AS) und ein Innenschneider (IS), die in Summe das komplette Lückenprofil schneiden. Wird nun bei

Konzept 1 die Anzahl der Messergruppen zu $z_{0,1}$ = 7 gesetzt, bestehend aus Vollprofilwerkzeugen, und bei Konzept 2 die Anzahl der Messergruppen mit $z_{0,2}$ = 14 ausgewählt, so besitzen diese beiden Konzepte eine identische Produktivität bei konstanter Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit. Der relative Vergleich zeigt deutlich, dass anhand der Kenngröße K_G ein höherer Verschleiß bzw. eine geringere Standzeit beim Konzept 2 der Halbprofilwerkzeuge im Vergleich zum Konzept der Vollprofilwerkzeuge zu erwarten ist. Beim Konzept der Halbprofilwerkzeuge liegt der Maximalwert der Verschleißkenngröße beim Außenschneider (AS) um etwa 150 % höher als beim Vollprofilschneider. Die Standmenge beim Vollprofilwerkzeug beträgt L = 500 Werkstücke, wohingegen beim Halbprofilwerkzeug (Außenschneider) lediglich eine Standmenge von L = 400 Werkstücken erreicht wird. Je höher der Wert von K_G, desto höher sollte der Verschleiß bzw. desto geringer sollte die Standzeit des jeweiligen Werkzeugs sein. Dieser Zusammenhang wird mit den dargestellten Ergebnissen bestätigt.

4 Studie 2: Wirtschaftlichkeitssteigerung durch Standzeitoptimierung

In Fallstudie 1 wurde gezeigt, dass die Kenngröße K_G geeignet ist den real aufgetretenen Werkzeugverschleiß nachzuvollziehen. In einem nächsten Schritt wird gezeigt, wie mit Hilfe der Kenngröße eine Standzeitoptimierung durchgeführt werden kann. Am Beispiel eines Wälzprozesses zur Ritzelfertigung soll dies nachfolgend demonstriert werden, Bild 4. Ziel ist die Bestimmung der optimalen Prozessparameter in Form einer optimalen Vorschubstrategie hinsichtlich des Verschleißverhaltens. Es werden 3 Vorschubstrategien (Referenz, Variante V1, Variante V2) simuliert und die Kenngröße K_G berechnet. In einem ersten Schritt wird das Verschleißverhalten mittels der Kenngröße analysiert. Hierbei werden die Berechnungsergebnisse mit dem realen Verschleißbild verglichen. Das Ergebnis zeigt die sehr gute Korrelation der Kenngröße mit dem Verschleißverhalten der Werkzeuge. D.h. je höher der Wert der Kenngröße, desto höher der Verschleiß. In einem zweiten Schritt wird das Standzeitverhalten analysiert. Hierbei konnte der Verschleiß durch die Wahl der Variante V2 reduziert werden. Der Verschleiß korreliert sehr gut mit den Simulationsergebnissen der Kenngröße. Am Außenschneider (AS) konnte der Verschleiß um 50 %, am Innenschneider (IS) um 14 % reduziert werden.

Zukünftig gilt es im Rahmen des DFG-Projektes „Methodik zur Vorhersage der Werkzeugstandzeit bei Fertigungsprozessen mit Mehrflankenspänen am Beispiel des

Kegelradfräsens“ ein Standzeitmodell mit der vorgestellten Verschleißkenngröße aufzubauen, welches eine quantitative Vorhersage des Werkzeugverschleißes beim Kegelradfräsen erstmals ermöglicht.

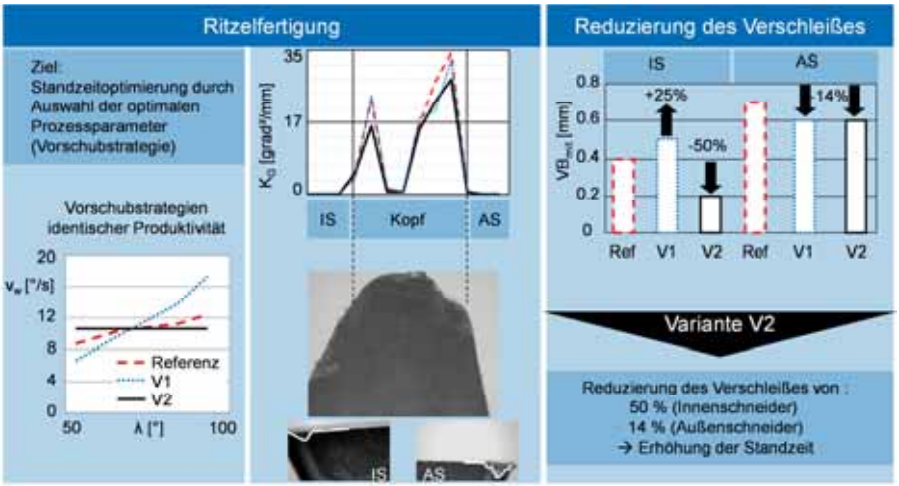


Bild 4: Bestimmung der optimalen Prozessparameter zur Verschleiß- und Standzeitoptimierung

Literatur

[1] Rütjes, U.: Entwicklung eines Simulationssystems zur Analyse des Kegelradfräsens. Dissertation, RWTH Aachen, 2010

[2] Brecher, C.; Gorgels, C.; Hardjosuwito, A.: *Modellierung und Simulationen zum Kegelradfräsen – Analyse der Werkzeugbelastung.* 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Bayreuth, 2009

[3] Klein, A.: Spiral Bevel and Hypoid Gear Tooth Cutting with Coated Carbide Tools. Dissertation, RWTH Aachen, 2007

[4] N.N.: DIN 6581: Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges. . Beuth – Verlag, Berlin, 1985

[5] N. N.: DIN 6580: *Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorgangs*. Beuth – Verlag, Berlin, 1985

Neuartige Werkstoffe für innovative Konstruktionen explosionsgeschützter Produkte

Julia Hornig, Uwe Klausmeyer, Karl-Heinrich Grote*

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
Email: julia.hornig@ptb.de; Internet: http://www.ptb.de

*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: karl.grote@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/

Inhalt: *Sollen Geräte in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, müssen sie insbesondere eine Bedingung erfüllen: Sie müssen so konstruiert sein, dass unter keinen Umständen die sie umgebende Atmosphäre entzündet werden kann. Eine mögliche Schutzmaßnahme ist die Konstruktion dieser Geräte gemäß der Anforderungen der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“. Hierbei darf im Inneren des Gehäuses eine Explosion stattfinden, sie darf jedoch weder nach außen dringen noch das Gehäuse zerstören. Für wirtschaftlichere Konstruktionen druckfest gekapselter Gehäuse wurde ein neuartiges Konzept der Druckentlastung entwickelt. Hierbei werden die infolge einer im Gehäuse stattfindenden Explosion entstehenden Explosionsdrücke durch die Integration von hochpermeablen Materialien in die Gehäusewände so reduziert, dass es möglich wird, die Gehäuse schlanker zu konstruieren.*

Abstract: *Electrical equipment for use in surroundings with explosion hazards can be constructed in the type of protection “flameproof enclosure”. In the case of failure, these enclosures have to withstand the emerging explosion pressure and must therefore be constructed with an enormous material effort. To implement more efficient enclosure constructions, it is planned to integrate new, permeable materials as part of the enclosure to reduce the maximum explosion pressures. In this work the ability of different permeable materials to relieve explosion-incurred pressure and some general engineering guidelines for this new concept of venting will be presented.*

Stichwörter: *Explosionsschutz, Druckfeste Kapselung, Druckentlastung, Gehäusekonstruktion, Werkstoff*

Keywords: *explosion protection, flameproof enclosure, flameless venting, engineering, construction material*

1 Einleitung

In vielen Bereichen der Industrie können durch den Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten und Gasen explosionsfähige Atmosphären entstehen, die durch in diesen Bereichen

eingesetzte Geräte entzündet werden können. Die Aufgabe der Sicherheitstechnik besteht in diesen Fällen darin, geeignete konstruktive Maßnahmen zu ergreifen, um eine Entzündung und damit die Explosion dieser Atmosphären zu vermeiden. Beispielsweise kann durch die Konstruktion solcher Geräte verhindert werden, dass sich entweder zündfähige Funken im Innern überhaupt bilden können, oder aber die potentiellen Zündquellen sind so von der zündfähigen Atmosphäre abgeschirmt, dass eine Explosion unmöglich ist. Bei vielen Geräten, etwa bei Motoren, Schaltgeräten oder Leuchten, ist jedoch beides nicht auszuschließen. Im Inneren der Gehäuse können durchaus zündfähige elektrische Funken oder heiße Bauteile auftreten und zugleich können explosionsfähige Atmosphären durch konstruktionsbedingte Spalte in das Gehäuse eindringen. In diesen Fällen wird die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ [1], angewendet. Entzündet sich das Gasgemisch im Inneren des Gehäuses, so sorgt die Konstruktion nach dieser Zündschutzart dafür, dass sich die Explosion nicht nach außen fortsetzen kann – ein Zünddurchschlag wird vermieden und das Gehäuse wird weder zerstört noch dauerhaft deformiert. Um diese Anforderungen zu erfüllen, sind druckfest gekapselte Gehäuse mit entsprechend hohen Wandstärken auszulegen und insbesondere hinsichtlich ihrer Gehäusespalte sehr aufwendig zu konstruieren. Um zukünftig druckfest gekapselte Gehäuse wirtschaftlicher konstruieren und herstellen zu können, sollen neuartige hochpermeable Werkstoffe in die Gehäusewände integriert werden, um den entstehenden Explosionsdruck zu reduzieren, ohne die Zünddurchschlagssicherheit zu gefährden. Im Folgenden wird ein Überblick über bisherige Formen der Druckentlastung gegeben und darauf aufbauend einige mögliche Werkstoffe und grundsätzliche Konstruktionsrichtlinien für diese neue Art der Druckentlastung vorgestellt.

2 Explosionsdruckentlastung – Ein Überblick

Grundsätzlich ist der Gedanke der Druckentlastung im Explosionsschutz nicht neu. Vor dem Hintergrund der Begrenzung möglicher Explosionsauswirkungen gehören Bauteile wie Berstscheiben und andere Entlastungseinrichtungen, die die ablaufende Explosion an festgelegter Stelle nach außen leiten, im Staubexplosionsschutz seit langem zum Stand der Technik. Die im Normalbetrieb verschlossenen Druckentlastungsöffnungen werden im Falle einer Explosion bei Erreichen des Ansprechdrucks der Druckentlastungseinrichtung freigegeben und das vorherige abgeschlossene Volumen kann ins Freie strömen. Der so

im Innern entstehende Explosionsdruck erreicht nur noch einen Bruchteil des maximalen Druckes, der ohne Entlastung aufträte. Der Einsatz dieser Entlastungseinrichtungen dient in erster Linie dem Schutz von Behältern, Anlagen und Gebäudeteilen. Durch die beim Entlastungsvorgang entstehende Druckwelle, die austretende Explosionsflamme sowie möglicherweise herausgeschleuderte Verbrennungsrückstände kann bei dieser Art der Druckentlastung eine Gefährdung der Umgebung nicht ausgeschlossen werden [2]. Bei druckfest gekapselten Gehäusen ist jedoch davon auszugehen, dass am Austritt einer in das Gehäuse integrierten Druckentlastungsöffnung eine explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann (vgl. Bild 1), so dass diese herkömmliche Art der Druckentlastung im Rahmen der Druckfesten Kapselung nicht möglich ist. Um die Technologie der Druckentlastung dennoch direkt auf druckfest gekapselte Geräte anwenden zu können, muss also die Entlastung flammenlos erfolgen. Eine solche Sonderform der Druckentlastung, das sogenannte *flameless venting*, wird ebenfalls seit einiger Zeit im Bereich des Staubexplosionsschutzes zur Druckentlastung in geschlossenen Räumen, beispielsweise in Rohrleitungen [3], eingesetzt. Hierbei wird in die Entlastungseinrichtung hinter die Entlastungsöffnung zusätzlich eine Flammensperre integriert, in deren engen Spalten die Explosionsflamme verlöscht.

Flammensperren werden in unterschiedlichen Anwendungen verwendet, um eine eventuell auftretende Verbrennung an der Ausbreitung in einen zu schützenden Bereich hinein zu hindern. Unabhängig von der genauen Art der Anwendung müssen sie immer drei Basisanforderungen erfüllen [4]: Jede Flammensperre muss einen Flammendurchschlag sicher verhindern, mechanisch, thermisch und chemisch beständig gegenüber den zu erwarteten Belastungen sein sowie eine möglichst gute Durchströmbarkeit aufweisen. Soll eine Flammensperre nun zur Druckentlastung verwendet werden und als Druckentlastungselement direkt in ein druckfest gekapseltes Gehäuse eingesetzt und damit also dessen integraler Bestandteil werden, ergibt sich neben diesen drei Basisanforderungen noch eine zusätzliche sicherheitstechnisch zu gewährleistende Bedingung. Ein Druckentlastungselement als Gehäuse-Konstruktionselement darf sich infolge ausströmender heißer Gase nicht so stark erhitzen, dass es seinerseits zu einer potentiellen Zündquelle für die äußere explosionsfähige Atmosphäre wird. Die unterschiedlichen Einflussgrößen innerhalb des zu betrachtenden Systems zur Druckentlastung eines druckfest gekapselten Gehäuses sind im folgenden Bild 1 noch einmal schematisch zusammengefasst.

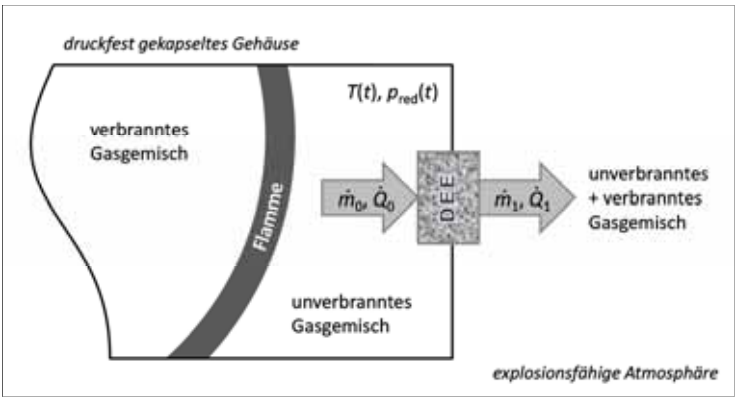
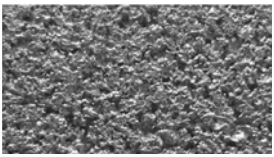


Bild 1: Systemanalyse Druckentlastungselement (DEE)

3 Neuartige Werkstoffe zur Explosionsdruckentlastung

Zur Qualifizierung von Werkstoffen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als Druckentlastungselement wurde ein handelsübliches druckfest gekapseltes Leergehäuse mit einem Volumen von knapp 2 l so präpariert, dass maximal 12 größengleiche Druckentlastungselemente in die Gehäusewände integriert werden können. Auf Basis vorangegangener Untersuchungen [5] wurde eine Werkstoffauswahl für erste Qualifizierungsuntersuchungen getroffen. Die drei ausgewählten Werkstoffe sind mit der ihren Strömungswiderstand maßgeblich charakterisierenden Größe sowie der jeweils verwendeten Elementdicke in Tabelle 1 zusammengefasst. Neben herkömmlichen statischen Flammensperren aus Bandwickeln (Bandsicherung) [6] wurde ein Werkstoff aus einer gesinterten Partikelschüttung (Sinterwerkstoff) [7], ein gängiges industrielles Filtermaterial, sowie ein noch recht neuer Werkstoff aus gesinterten Kurzfasern (Faserwerkstoff) [8] in Explosionsversuchen auf ihr Druckentlastungspotential und ihre Zünddurchschlagssicherheit hin untersucht. Im Rahmen dieser Versuchsreihen wurden in dem beschriebenen Gehäuse mit den einzelnen Werkstoffen Explosionsversuche mit verschieden vielen Druckentlastungselementen durchgeführt, um den für die jeweilige Konfiguration maximalen Explosionsdruck zu ermitteln. Darüber hinaus wurden die jeweiligen Konfigurationen begleitend auf ihre Zünddurchschlagssicherheit überprüft. Die hierfür verwendeten Gasgemische waren jeweils Wasserstoff bzw. Acetylen in Luft [1].

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Werkstoffe

Bandsicherung [6]	**Sinterwerkstoff** [7]	**Faserwerkstoff** [8]
		
• Spaltweite 0,15 mm (IIC), Dicke 10 mm	• Porosität ca. 50 %, Dicke 5 mm	• Porosität 60 %, Dicke 5 mm • Porosität 70 %, Dicke 5 mm • Porosität 80 %, Dicke 5 mm • Porosität 70 %, Dicke 10 mm

Aufgeteilt nach dem jeweiligen Gasgemisch zeigt Bild 2 die ermittelten maximalen Explosionsdrücke für die eingesetzten Werkstoffe in Abhängigkeit der Größe der Entlastungsfläche. Um deutlich zu machen, dass es sich um reduzierte Explosionsdrücke durch Entlastung handelt und die angegebenen Werte Überdrücke sind, werden diese als reduzierter Explosionsüberdruck Δp_{red} bezeichnet. Die Entlastungsfläche A_E wurde auf die innere Oberfläche des Gehäuses A_I normiert und als A_{rel} bezeichnet. Der Explosionsdruck im vollständig geschlossenen, also nicht entlasteten Gehäuse (A_{rel} = 0 mm^2/mm^2) als Ausgangspunkt aller Messreihen ist ebenfalls aufgetragen, um Aussagen über relative Druckreduzierungen zu ermöglichen.

Grundsätzlich zeigt sich anhand dieser Versuchsergebnisse sowohl für Acetylen (Bild 2a) als auch für Wasserstoff (Bild 2b), dass mit zunehmender Größe der Entlastungsfläche die Druckentlastung erwartungsgemäß zunimmt. Es ist allerdings auch ersichtlich, dass es sich hierbei nicht um einen linearen Verlauf handelt. Weiterhin ist ebenfalls bei beiden Gasgemischen die Abhängigkeit der Druckentlastungsfähigkeit von der Porosität der Werkstoffe sehr deutlich. Mit steigender Porosität und damit geringer werdendem Strömungswiderstand nimmt die Fähigkeit Druck zu entlasten zu. Bemerkenswert ist jedoch, dass wie die Ergebnisse des Faserwerkstoffes der Porosität 70 % zeigen, die Dicke des Entlastungselementes (5 mm oder 10 mm) nahezu keinen Einfluss auf die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffes hat.

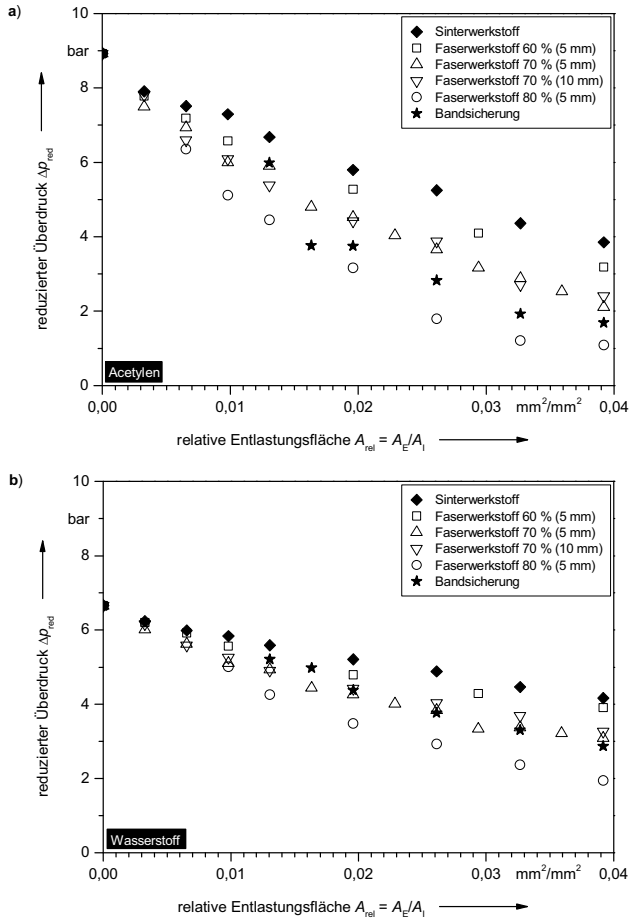


Bild 2: Reduzierter Überdruck Δp_{red} für unterschiedliche permeable Werkstoffe bezogen auf die relative Entlastungsfläche A_{rel} der Versuche mit a) Acetylen/Luft-Gemisch und b) Wasserstoff/Luft-Gemisch

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Gasgemische miteinander ist auffällig, dass sich bei allen Werkstoffen bei maximal möglicher Druckentlastung (A_{rel} = 0,039 mm²/mm²) das Wasserstoff-Gemisch weniger stark entlasten lässt als das Acetylen-Gemisch, während im geschlossenen Gehäuse das Acetylen-Gemisch den höheren Explosionsdruck verursacht. Einen Überblick über die ermittelten Werte bei geschlossenem und maximal entlastetem Gehäuse bietet die Tabelle 2. Stellvertretend für

diese Charakteristik sei hier der Faserwerkstoff der Porosität 80 % genannt, bei dem für das Acetylen-Gemisch (s.Bild 2a) der Explosionsüberdruck von 8,9 bar im geschlossenen Gehäuse auf 1,1 bar bei maximal möglicher Druckentlastung sinkt. Im Gegensatz dazu sinkt der Druck bei Verwendung des Wasserstoff-Gemisches (s. Bild 2b) von 6,7 bar im geschlossenen Gehäuse auf 1,9 bar bei maximaler Entlastung. Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf die unterschiedlichen Verbrennungstemperaturen und -geschwindigkeiten der Gasgemische. In einem geschlossenen Gehäuse hängt der maximale Explosionsdruck im Wesentlichen von der Flammentemperatur ab. Aufgrund seiner höheren Flammentemperatur [9] liefert das Acetylen-Gemisch daher den höheren Druck. Da jedoch die Verbrennungsgeschwindigkeit des Acetylen-Gemisches nur etwa halb so groß ist wie die des Wasserstoff-Gemisches [2], erfolgt dessen Druckanstieg langsamer. Bei der Verwendung von Druckentlastungselementen kommt es unmittelbar nach Zündung des Gasgemisches zu einem Ausströmvorgang, so dass die zeitliche Entwicklung des Druckes berücksichtigt werden muss. Das ausgeströmte unverbrannte Gas steht der Explosion nicht mehr zur Verfügung (vgl. Bild 1), so dass es für den maximalen Explosionsdruck entscheidend ist, wie viel Gasgemisch im Verhältnis zur ausgeströmten Gasmenge verbrennt

Tabelle 2: Explosionsdrücke bei geschlossenem und maximal entlastetem Gehäuse

	geschl. Gehäuse (A_{rel} = 0)	maximal entlastetes Gehäuse (A_{rel} = 0,039)					
		Sinterw. ca. 50 %	Faserw. 60 % (5 mm)	Faserw. 70 % (10 mm)	Faserw. 70 % (5 mm)	Band-sicherung	Faserw. 80 % (5 mm)
C_2H_2: Δp_{red}/bar	8,9	3,9	3,2	2,4	2,1	1,7	1,1
H_2: Δp_{red}/bar	6,7	4,2	3,9	3,2	3,1	2,9	1,9

Neben der Druckentlastungsfähigkeit stellt wie in Abschnitt 2 erläutert die Zünddurchschlagssicherheit ein zwingend zu erfüllendes Sicherheits- und somit Qualifizierungsmerkmal für die Werkstoffe dar. Bei den begleitend durchgeführten Versuchen zur Überprüfung der Zünddurchschlagssicherheit stellte sich heraus, dass alle Werkstoffe bis auf den Sinterwerkstoff spätestens bei nur einem eingesetzten Entlastungselement, also der für diesen Versuchsaufbau minimal möglichen Entlastungsfläche (A_{rel} = 0,003 mm^2/mm^2) einen Zünddurchschlag nicht mehr verhindern können. Insbesondere die beiden am besten entlastenden Werkstoffe, der Faserwerkstoff der Porosität 80 % und die Bandsicherung, versagten hierbei schon bei vergleichsweise

großen Entlastungsflächen. Besonders hervorzuheben ist, dass der Faserwerkstoff mit der Porosität 80 % nur in der Konfiguration der maximal möglichen Entlastung einen Zünddurchschlag verhindern konnte. Zu der Art der aufgetretenen Zünddurchschlage lässt sich festhalten, dass es sich in allen Fällen um keine direkten Flammendurchtritte oder eine Entzündung durch das ausströmende heiße Gase handelte, sondern um zur Zündung im Gehäuse leicht verzögerte Explosionen infolge der Entzündung der äußeren Atmosphäre an der heißen Elementaußenoberfläche.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich ließ sich zeigen, dass es unter gewissen Randbedingungen möglich ist, unterschiedliche permeable Werkstoffe zur Explosionsdruckentlastung in die Wände druckfest gekapselter Gehäuse zu integrieren, ohne deren Zünddurchschlagssicherheit zu gefährden. Insbesondere mit den Faserwerkstoffen hoher Porosität sowie den Bandsicherungen lässt sich der Explosionsdruck signifikant reduzieren, so dass schlankere Gehäuse realisiert werden können. Für zukünftige Gehäusekonstruktionen nach diesem neuartigen Konzept ist jedoch zwingend zu beachten, dass mit zunehmender Entlastungsfähigkeit der Werkstoffe auch deren Neigung zum Zünddurchschlag stark zunimmt. Ursächlich hierfür ist die stärkere Erwärmung dieser Werkstoffe infolge ihrer geringeren Masse. Eine wirksame Maßnahme zur Begrenzung der Elementtemperaturen wäre somit die Verwendung entsprechend dickerer Elemente, zumal die Elementdicke nur einen geringen Einfluss auf die Druckentlastungsfähigkeit des Werkstoffes zu haben scheint.

Es wird erwartet, dass sich die beschriebenen Tendenzen bei anderen Gehäusegrößen ebenfalls zeigen. Dieses gilt es jedoch in weiteren Versuchsreihen zu bestätigen. Darüber hinaus sind Versuche zu den Einflüssen von Ausströmbehinderungen auf das Entlastungsverhalten und zur mechanischen Stabilität unterschiedlicher Größen einzelner Entlastungselemente (bei gleich großer Gesamtentlastungsfläche) geplant. Führen diese Versuche zu belastbaren Aussagen, so wird das hier vorgestellte und in der Folge weiter verifizierte Konzept einer neuartigen Druckentlastung die Konstruktionen explosionsgeschützter Produkte erheblich verbessern.

Literatur

[1] Norm DIN EN 60079-1:2008. Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung „d“ (IEC 60079-1:2007); Deutsche Fassung EN 60079-1:2007

[2] Steen, Henrikus (Hrsg.): *Handbuch des Explosionsschutzes*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000

[3] REMBE® GmbH SAFETY + CONTROL: *Explosionsdruckentlastung in geschlossenen Räumen mit Q-Rohr®-3 (Pat.-Nr. DE 38 22 012)*. URL: http://www.rembe-safety-control.de/products/explosion-protection/indoor-explosion-venting/q-rohrsupRsup.html. Abrufdatum: 23.05.2011

[4] Norm DIN EN ISO 16852:2010. Flammendurchschlagsicherungen – Leistungsanforderungen, Prüfverfahren und Einsatzgrenzen (ISO 16852:2008, einschließlich Cor 1:2008 und Cor 2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 16852:2010

[5] Mecke, Stefan: *Gestaltung und Dimensionierung von Flammensperren*. Dissertation, Universität Magdeburg, Magdeburg, 2009

[6] Braunschweiger Flammenfilter GmbH: *Produkte : Technische Grundlagen, Flammendurchschlagsicherungen*. URL: http://www.protego.de/de/produkte/technische-grundlagen/flammendurchschlagsicherung/index.html. Abrufdatum: 23.05.2011

[7] Tridelta Siperm GmbH: *Lieferübersicht : Siperm R*. URL: http://www.siperm.com/html/de/topic_04/lieferuebersicht_01.php. Abrufdatum: 23.05.2011

[8] Fraunhofer IFAM: *Fibre Metallurgy*. URL: http://www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/ifam_dd/EN/gebiete/faser/index.jsp. Abrufdatum: 23.05.2011

[9] Warnatz, Jürgen; Maas, Ulrich; Dibble, Robert W.: Verbrennung: Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. 3. aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2001

Entwicklung und Erprobung eines neuen Prozessablaufs für den Feinguss

Kevin Kuhlmann, Fabian Klink

Institut für Maschinenkonstruktion, OvGU Magdeburg
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
Email: kevin.kuhlmann@ovgu.de, fabian.klink@ovgu.de
Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/

Inhalt: *Der Druck auf die Industrie, in kürzester Zeit neue, qualitativ hochwertige Produkte auf den Markt zu bringen, wächst stetig. Der Feinguss (Wachsausschmelzverfahren) ist ein bekanntes und etabliertes Verfahren zur Herstellung von funktionsfähigen Prototypen oder Kleinst- und Kleinserien aus Aluminiumlegierungen. Es überzeugt mit hoher Maßgenauigkeit und Oberflächengüte. Jedoch ist die Prozesskette, vom CAD-Modell bis zum fertigen Gussteil, mit 16 Prozessschritten aufwendig und die Produktionszeit lang, da viel in Handarbeit erfolgt. Des Weiteren werden Gussfehler oft erst am Ende der Prozesskette bei der mechanischen Nachbearbeitung erkannt. Entwicklungsziel ist eine verkürzte Prozesskette zur Herstellung des Ausschmelzmodells auf Basis der generativen Fertigungsverfahren (3D-Printing). Aufgrund der geforderten guten Oberflächeneigenschaften und der hohen Maßhaltigkeit der Bauteile wird dazu das Polyjet-Verfahren genutzt. Außerdem sollen durch den Einsatz des Kompaktformverfahrens an Stelle des Schalenformverfahrens zusätzlich Zeit und Kosten, besonders bei geringen Stückzahlen, eingespart werden.*

Abstract: *The pressure on the industry bringing new high quality products on the market in very short time is growing steadily. The investment casting is a well-known and established method for the production of functional prototypes or small series of aluminumalloys. This convinces with high dimensional accuracy and surface quality. However, the process chain, from the CAD model to a finished component, is a complicated process with 16 steps, a long production time and related to a lot of manual work. Furthermore casting defects are often detected only at the end of the process chain at the mechanical finishing. Development target is a shortened process chain for the production of the lost models based on the generative manufacturing method (3D printing). The Polyjet process is used because of the required good surface properties and high dimensional accuracy of components. In addition to save time and costs, particularly in small numbers, the compactformprocedure instead of the shellmolding process is used.*

Stichwörter:*Feinguss, Rapid Prototyping, Prozesskette, Prozessoptimierung, Kostenreduktion*

Keywords:*Investment Casting, Rapid Prototyping, Processchain, process improvement, cost reduction*

1 Einleitung

Die Produktlebenszyklen werden durch den zunehmenden Konkurrenzdruck in allen Industriebereichen – auch auf internationalem Niveau – enorm verkürzt. Außerdem werden viele Unternehmen durch knappe Ressourcen in ihrer Entwicklungsarbeit gebremst. Daher müssen neue Möglichkeiten entdeckt werden, um die Produktentwicklungszeiten und die Kosten dafür zu verringern. Gleichzeitig soll die Qualität der Produkte steigen. Einen Beitrag hierzu kann die effiziente Anwendung des Feingusses zur Herstellung von funktionsfähigen Prototypen sein. Mit Hilfe dieser Funktionsmodelle können verschiedenste Fehlerquellen des späteren Serienprodukts frühzeitig erkannt und behoben werden [1].
Der Herstellungsprozess dieser Modelle ist jedoch mit einer aufwendigen, langwierigen und damit kostenintensiven Prozesskette verbunden. Dieser Beitrag zeigt die Vor- und Nachteile des gegenwärtigen Feingussprozesses und stellt einen neuen angestrebten Prozessweg vor. Das Hauptaugenmerk liegt auf einem generativ gefertigten ausschmelzbaren Urmodell mit hervorragender Maßgenauigkeit und Oberflächengüte.

2 Feinguss

Der Feinguss, welcher auch als Wachsausschmelzverfahren bekannt ist, gestattet die Herstellung von Gussteilen mit hoher Maßgenauigkeit und Oberflächengüte. Eine anschließende Nachbearbeitung ist nur selten erforderlich. Der minimale Nachbearbeitungsaufwand wird dadurch begünstigt, dass die Feingussstücke keine Formteilung besitzen und somit gratfrei sind. Dem Konstrukteur ist beim Feinguss ein Höchstmaß an gestalterischer Freiheit gegeben. Komplexe Konturen, geringe Wandstärken und Hinterschneidungen lassen sich darstellen. Das Feingussverfahren lässt sich von der Prototypenfertigung bis hin zur automatisieren Großserienfertigung effizient einsetzen. Stückmassen zwischen 2 g und 9 kg sind möglich. Die Technologie findet in sämtlichen Industriezweigen, beispielsweise in der Automobilindustrie, der Medizintechnik, der Lebensmitteltechnik sowie der Schmuckindustrie Anwendung. Dem steht die langwierige, mehrere Tage dauernde und aufwendige Prozesskette zur Herstellung der Teile gegenüber. Gerade bei geringen Stückzahlen ist sie mit viel Handarbeit verbunden und Gussfehler werden erst am Ende erkannt [2].

3 Verfahrensablauf

In der Literatur, beispielsweise [2], wird vorwiegend von 10 Prozessschritten geschrieben, die zur Feingussherstellung notwendig sind. Wird jedoch der Herstellungsprozess von der CAD-Erstellung an betrachtet und die Formherstellung mit einbezogen, sind 16 Prozessschritte bis zum fertigen Gussteil nötig. Der Ablauf bis zum ersten Wachsteil aus der Form wird im Bild 1 verdeutlicht.

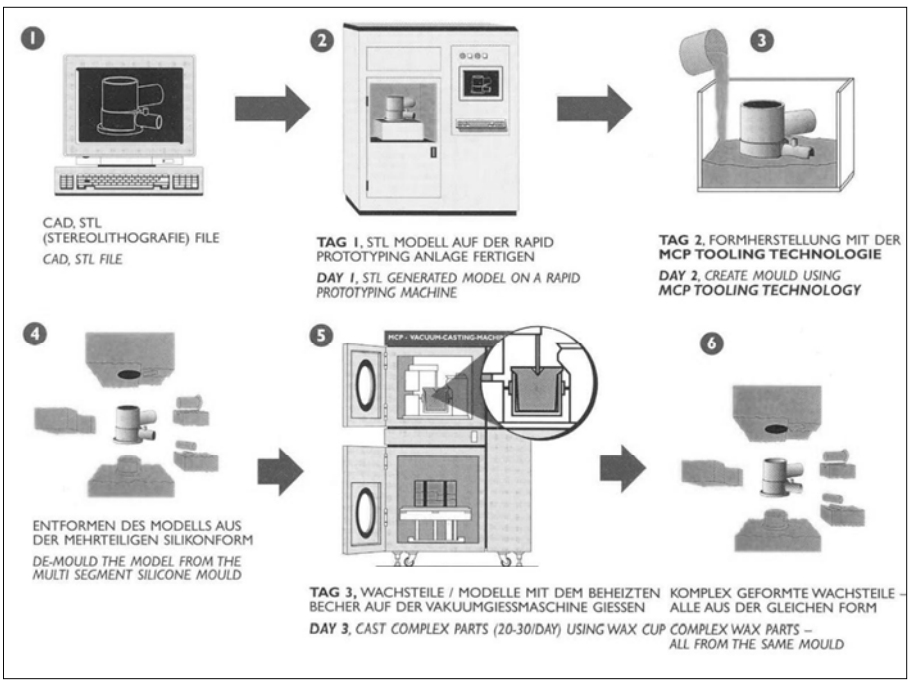


Bild 1: Herstellung der Wachsteile [3]

Beginnend mit der Erstellung eines CAD-Modells am Computer werden entsprechende Daten zur Fertigung eines ersten Urmodells generiert. Dieses durch generative Fertigungsverfahren hergestellte Modell ist ein Abbild des zu produzierenden Feingussteils. Im anschließenden Prozessschritt „Formherstellung“ wird das Urmodell in Silikon abgegossen und so eine Spritzmatrize hergestellt. Diese muss dann

aufgeschnitten werden, um das Urmodell entnehmen zu können und so Platz für die Wachslinge zu schaffen. Für die Großserienfertigung ist es mitunter wirtschaftlicher die Spritzmatrize (Kokille) aus Metall spanend zu fertigen. In die entstandene Matrize wird drauffolgend flüssiges Wachs gegossen. Nach dem Abkühlen und Erstarren kann der Wachsling der Form entnommen werden [3].
Anschließend werden die Wachslinge an einen Gießbaum fixiert Die so entstandene Gießtraube wird nun mit einem keramischen Überzug versehen, der die spätere Gussform der Feingussteile darstellt. Dazu wird sie in eine Bindersuspension (Schlicker) getaucht und anschließend mit Quarzsand bestreut und danach mehrere Stunden getrocknet. Dieser Vorgang wird 5 bis 8 Mal wiederholt. Erst danach ist eine ausreichende Schalendicke erreicht und das Wachs kann in einem speziellen Ofen bei 150 °C ausgeschmolzen werden. Im Anschluss wird die Keramikschale bei 1200 °C gebrannt. Sie erhält ihre endgültige Festigkeit und etwaige Wachsreste verbrennen. Der anschließende Gießvorgang erfolgt in die noch heiße Keramikform. Durch die erhöhte Temperatur wird ein zu schnelles Erstarren der Schmelze verhindert und damit eine gute Formfüllung gewährleistet. Nachdem die Schmelze erstarrt ist, wird sie durch Abschlagen von der Keramikschale befreit. Es folgt lediglich das Abtrennen der einzelnen Gussstücke von den Versorgungskanälen sowie eine eventuell erforderliche Nachbearbeitung. Da sowohl die Wachsmodelle als auch die Gussstücke beim Erkalten schrumpfen, müssen die Urmodelle größer sein als das zu fertigende Teil. Dies wird meist anhand mehrerer Probeabgüsse ermittelt, was zu einem zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwand führt. [4].

4 Kosten des Feingusses

Wie bereits einleitend erwähnt, sind die Kosten für Feingussteile maßgeblich vom Herstellungsprozess abhängig. Die viele Handarbeit und die langen Pausen zwischen den einzelnen Schritten, die z. B. zur Abkühlung, Trocknung und Aushärtung nötig sind, sind dabei die Hauptkostentreiber. Ein Großteil entfällt auf die komplizierte Herstellung der Wachsmodelle, der Gießtraube und der Gießform. Der Kostenvergleich zwischen Wachsmodellen, die in verschiedenartig hergestellten Werkzeugen produziert werden, und einem generativ gefertigtem Ausschmelzmodell ist im folgenden Bild 2 dargestellt.

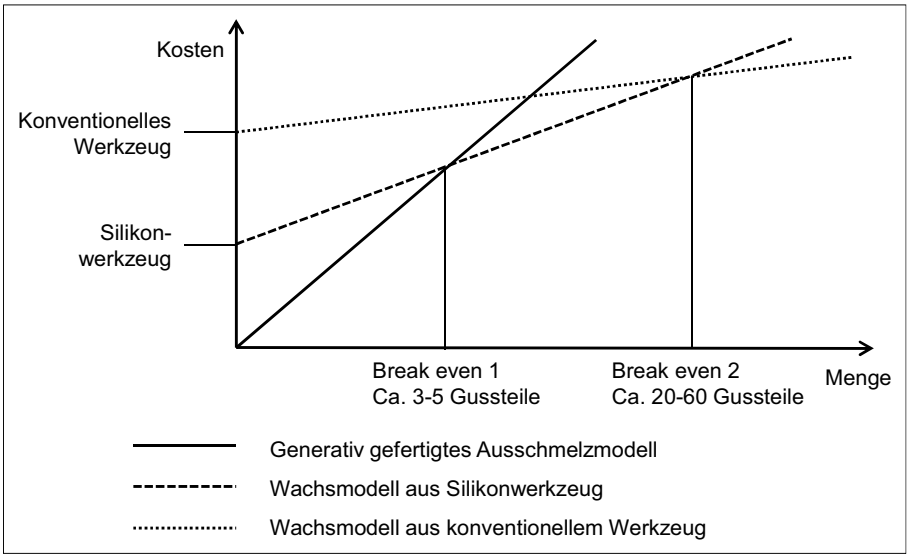


Bild 2: Kostenvergleich Rapid-Prototyping/Serie [5]

Unter der Voraussetzung, dass die entsprechenden Maschinen nicht extra angeschafft werden müssen, besitzt das generativ gefertigte Ausschmelzmodell keine Fixkosten, der Preis je Stück ist hingegen hoch, was zu einem steilen Anstieg der Kostenfunktion führt. Aufgrund der Fixkosten, die durch die Herstellung des Silikonwerkzeugs entstehen, ist es erst ab einer Menge von 3 - 5 Gussteilen wirtschaftlicher die Ausschmelzmodelle aus Wachs mit einer Silikonform herzustellen. Die Fertigung der Wachsmodelle mit einem konventionell spanend gefertigten und somit teuren Werkzeug (Kokille) rentiert sich erst ab einer Stückzahl von etwa 20 - 60 Gussteilen [5].

5 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Forschungsvorhabens, welches durch das zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM, Förderkennzeichen KF2399903LL0) gefördert wird, ist es, die Prozesskette zur Herstellung von Feingussteilen zu optimieren, ggf. zu verkürzen und so die Material- als auch die Personalkosten zu senken. Außerdem sollen die Teile in kürzerer Zeit herzustellen sein. Mit diesen Maßnahmen soll eine wirtschaftliche Eignung auch für geringe Stückzahlen realisiert werden.

Die Umsetzung dieser Ziele erfolgt zum einen durch den Wegfall der kostenintensiven Wachsteilherstellung und der damit einhergehenden Eliminierung der Fixkosten. Die Ausschmelzmodelle sollen direkt mit Hilfe von generativen Fertigungsverfahren erstellt werden und so einen alternativen Prozessverlauf ermöglichen. Durch die Implementierung einer Wabenstruktur in das Ausschmelzmodell soll Modellmaterial gespart werden. So sinken die Materialkosten und die Ausbrennmasse deutlich. Gleichzeitig sollen mit der Nutzung des Vakuum-Differenz-Druck-Gießverfahrens weitere Zeit- und Kostenersparnisse realisiert werden. Mit diesen Maßnahmen ist eine Verkürzung der Prozesskette vom CAD-Modell zum fertigen Gussteil von 16 auf 12 Schritte möglich.

6 Umsetzung

Die neue Prozesskette sieht nach der CAD-Konstruktion des Bauteils einen weiteren Schritt im CAD-Programm vor. Das zu fertigende Teil wird entsprechend einer FEM Berechnung mit einer ausreichenden Wandstärke und ggf. einer Verrippung/ Wabenstruktur im Inneren ausgesteift. Anschließend erfolgt der „Druck“ mit dem Polyjet-Verfahren.

Das Polyjet-Verfahren (auch 3D-Printing genannt) wurde ausgewählt, weil es mit ihm möglich ist, Bauteile mit extrem hoher Auflösung und Oberflächengüte herzustellen. Die Schichtstärke beträgt lediglich ca. 0,016 mm, die Präzisionsmodelle weisen daher nahezu keine „Treppenstufen“ auf. Die Polyjet-Technologie zählt zu den Polymerisationsverfahren. Bei diesem Verfahren wird schichtweise ein Acyrl-Photopolymer über einen Druckkopf entsprechend der Bauteilgeometrie auf die Bauplattform aufgesprüht. Direkt nach dem Auftragen erfolgt die Aushärtung des Photopolymers mit UV-Licht. Anschließend senkt sich die Bauplattform ab und der Prozess wiederholt sich. Zur Abstützung von Überhängen wird Supportmaterial genutzt, welches ebenfalls über die Drückköpfe aufgesprüht wird. Dieses geleeartige Supportmaterial ist wasserlöslich und wird nach Beendigung des Druckes mit Hilfe einer Wasserstrahlanlage entfernt [6].

Das fertige Bauteil wird anschließend an den Wachsbaum gefügt. Daraufhin erfolgt unter Zuhilfenahme einer Küvette die Einbettung in ein Gips-Keramikgemisch. Die erstarrte Form kommt danach zum Ausschmelzen und Brennen in einen Ofen. Im Anschluss folgt der Guss unter Vakuum in die noch heiße Form. Nach dem Abkühlen wird das Bauteil analog zum ursprünglichen Prozess geputzt und nachbearbeitet [3].

7 Erste Versuche

Als erstes Versuchsobjekt wurde ein Zylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von jeweils 60 mm gewählt. Mit Hilfe eines CAD-Programms entstanden am PC drei Varianten, zum einen ein Vollzylinder welcher als Referenzobjekt dient und zum anderen zwei Hohlzylinder, einer mit einer Wandstärke von 2 mm sowie 3 Rippen, einer mit dicker Wandung von 4 mm und 7 Rippen. Technologiebedingt ist es nicht möglich „in die Luft zu drucken“ bzw. analog zu einer Brücke eine tiefere Ebene zu überdrucken. Für die Fertigung der Oberseite muss die geplante Hohlstruktur mit Supportmaterial gefüllt sein. Weil die Entfernung des Supportmaterials aufgrund der geschlossenen Form nicht möglich ist, wurden die Zylinder im CAD-Programm mittig halbiert, so dass für einen Zylinder zwei baugleiche Hälften zu fertigen sind. Dies bringt zwei Vorteile mit sich, zum einen wird Material gespart, weil kein Supportmaterial für die Hohlstruktur benötigt wird und zum anderen reduziert sich durch die Halbierung der der Bauhöhe die Bauzeit um nahezu 50 %. Für einen weiteren Vergleich wurden zusätzlich zwei massive Zylinderhälften gedruckt. Durch einen eingearbeiteten Formschluss lassen sich die jeweiligen Hälften nach dem Druck einfach zusammenfügen. Für einen sicheren Zusammenhalt erfolgt die Verklebung der Hälften mit handelsüblichem Sekundenkleber. Die fertigen Zylinder sind in Bild 3 dargestellt. Von links nach rechts: Vollzylinder, geteilter Vollzylinder, Hohlzylinder dicke Wandung, Hohlzylinder dünne Wandung.

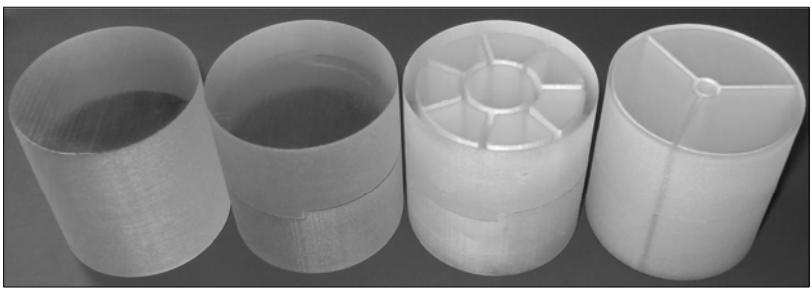


Bild 3: Vollzylinder und Hohlzylinder im Vergleich

Anschließend werden die Zylinder an einem Wachsbaum angebracht. Der nächste Schritt ist die Einbettung des Gießbaums in ein Gips-Keramikgemisch. Nach der Trocknung folgt das Ausschmelzen des Urmodells und Brennen der Form. Für die Untersuchung der

Formbeständigkeit und des Ausbrennverhaltens wird die gebrannte Form anschließend zersägt.

8 Ausblick

Die ersten Versuche haben gezeigt, dass es zu Schwierigkeiten kommt die RP-Modelle mit dem Wachsbaum zu verknüpfen. Es wird untersucht das Angusssystem ebenfalls teilweise oder vollständig generativ zu fertigen, um diesem Problem entgegen zu wirken. Weiterhin hat ein erster Ausbrennversuch ergeben, dass es zu Restasche beim Ausbrennen der RP-Modelle kommen kann. Weder die Ursache noch eine mögliche Abhilfe wurden weiter untersucht. Ein möglicher Ansatz ist die Absaugung der Asche. Diese Untersuchungen und die Ermittlung der Maßgenauigkeit der Form mit Hilfe geeigneter Messtechnik stellen die nächsten Arbeitspakete des Forschungsvorhabens dar.

Literatur

[1] Grote, Karl-Heinrich; et al.: *Optimierungspotenzial von RP gefertigten Urmodellen*. Dresden: Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 2007. S. 189-198.

[2] Fritz, Alfred Herbert; Schulze, Günter: *Fertigungstechnik* 9. Aufl. Berlin: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-12878-3

[3] MCP HEK GmbH, Broschüre, MCP Metal Part Casting – Der Prozessablauf, Lübeck

[4] Aue, A.; Blank, W.; et al.: *Feingießen: Herstellung, Eigenschaften, Anwendung.* Düsseldorf: ZGV – Zentrale für Gussverwendung im Deutschen Gießereiverband, 2008

[5] Tital GmbH, *Technologien – Rapid Prototyping*. http://www.tital.de/de/technologien/rapid-prototyping/[Stand: Mai 2010. Zugriff 18.05.2011, 10:50 MESZ]

[6] Gebhardt, Andreas: Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 3. Aufl. München: Hanser, 2007. ISBN 978-3-446-22666-1

Auswahl und Bewertung zukünftiger Entwicklungspartnerschaften

Susanne Nass, Reiner Anderl

Technische Universität Darmstadt; Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion
Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt
Email: {nass | anderl}@dik.tu-darmstadt.de; Internet: http://www.dik.tu-darmstadt.de

Inhalt: *Zwischenbetriebliche Kooperationen im Bereich der Produktentwicklung gewinnen aufgrund der steigenden Komplexität innovativer Produkte immer mehr an Bedeutung. Diese Art der Zusammenarbeit, die als Entwicklungspartnerschaft definiert wird, stellt die Unternehmen vor neue Herausforderungen. Oft entscheidet daher bereits die Auswahl des Partners über den Erfolg der Kooperation. Der Beitrag stellt den Entwicklungspartner als Form der gemeinsamen Produktentwicklung im Kontext der gängigen Kooperationsmodelle sowie Ansätze zur Auswahl zukünftiger Entwicklungspartner vor.*

Abstract: *Inter-firm cooperation in product development gain in importance because of increasing complexity of innovative products. But such a collaboration, hereinafter referred to as a „development partnership“, issues a new challenge to these companies. Because of that the recruiting of the partners can often determine the prospective success of cooperation. This paper presents the development partners as a form of joint product development in the context of current models of cooperation. Afterwards an approach for recruiting future development partner will be presented.*

Stichwörter: *Entwicklungspartner (auswählen), Kooperationsplanung, Produktentwicklung*

Keywords: *development partner (recruiting), strategy of cooperation, product development*

1 Kooperationen in der Produktentwicklung

Die Erschließung neuer Märkte im Zuge der Globalisierung sowie die steigende Komplexität der Produkte unter anderem durch den verstärkten Anteil von Elektronik und Software (vgl. [1]) sowie durch die Integration mehrerer Funktionen in ein Produkt lassen sich mit Hilfe der Kernkompetenzen und dem Know-how eines einzelnen Unternehmens nicht realisieren. Unternehmensübergreifende Kooperationen gewinnen daher belegbar in nahezu allen Branchen an Bedeutung (siehe [2]). Bezüglich der Gestaltung von Kooperationen ist zudem ein Trend weg vom reinen Teilelieferanten hin zur Einbindung externer Unternehmen in die Produktentwicklung mit langfristigem Charakter zu beobachten. Zahlreiche Unternehmensbefragungen zeigen auf, dass externe

Unternehmen bereits in Vorentwicklungsprojekte integriert werden und Kooperationen innerhalb des Bereichs Forschung und Entwicklung sich häufen [3, 4, 5, 6].
Zwischenbetriebliche Kooperationen in der Produktentwicklung stellen für das betroffene Unternehmen eine oft sehr weitreichende Veränderung dar, unter anderem weil den externen Unternehmen als Kooperationspartnern oft umfangreiche Einblicke bezüglich der eigenen Produkte und Prozesse gewährt werden müssen. Für Kooperationen mit derartig großer Beziehungsintensität wird der Begriff „Partnerschaft“ [7], in diesem Spezialfall der Begriff „Entwicklungspartnerschaft“ verwendet. Entwicklungspartnerschaften sind durch eine frühe, gemeinsame und parallele Zusammenarbeit in der Produktentwicklung charakterisiert.
Dieser Begriff wurde in der Literatur bereits in einer Form verwendet, die einer solch weitreichenden Art der Zusammenarbeit nicht in allen Fällen gerecht wird. Im folgenden Kapitel wird daher zunächst der Begriff des Entwicklungspartners nach dem Verständnis in dieser Veröffentlichung vorgestellt. Anschließend wird auf die bisherigen Quellen zum Begriff „Entwicklungspartnerschaft“ eingegangen und aufgezeigt, wo Unterschiede oder Unbestimmtheiten zu finden sind.

2 Charakteristika eines Entwicklungspartners

Unter Entwicklungspartnerschaft wird ein langfristig ausgelegter zwischenbetrieblicher horizontaler oder vertikaler Zusammenschluss von Unternehmen im Bereich der Produktentwicklung mit komplementären oder identischen Zielen verstanden, der sowohl bilateral als auch in Unternehmensnetzwerken realisiert sein kann. Der Fokus der Betrachtung einer Entwicklungspartnerschaft liegt nicht auf den dadurch entwickelten Komponenten, Systemen oder Modulen, sondern auf der Form der gemeinsamen engen Verbindung innerhalb der Produktentwicklung. Die Zusammenarbeit bezieht sich dabei auf eine gemeinsame parallele Produkt- und Prozessentwicklung mit anschließender Produktion.
Somit erweitern sich die Auswirkungen einer Entwicklungspartnerschaft auf den gesamten Produktlebenszyklus. Durch die Einführung von Entwicklungspartnern wird das Simultaneous Engineering auf alle Teilnehmer innerhalb des Verbundes übertragen [8]. Es geht hierbei um eine gemeinschaftliche Einbringung von Personal- Produkt- und Prozess-Know-how sowie von finanziellen Mitteln [9]. Damit soll ein innovatives Produkt von

Anfang an gemeinsam und eng vernetzt entwickelt werden, wodurch Entwicklungstiefe beim ursprünglichen Hersteller reduziert wird [8].

Der Begriff Entwicklungspartnerschaft wurde in der Vergangenheit bereits an einigen Stellen verwendet. Eine wichtige Quelle stellt dabei *VDA-Empfehlung 4961/2* dar, in der Kooperationsmodelle für die Automobilindustrie spezifiziert werden [10]. Ohne detaillierte Definition erfolgt hier unter anderem eine Einteilung der Entwicklungspartner in Entwicklungsdienstleister, Teile-, Komponenten-, Modul- und Systemlieferanten/-entwickler. Für Kooperationen in diesen Fällen gilt, dass als Teil von Make-or-buy-Entscheidungen der Bezug von externen Leistungen als vorteilhafter als die eigene Fertigung erachtet wurde [9]. Die dort vorgestellten Kooperationsmodelle werden zwar als Entwicklungspartner bezeichnet, können jedoch nach Beurteilung der hier gültigen Definition nicht gänzlich als solcher eingestuft werden. Entwicklungspartnerschaften zeichnen sich dadurch aus, dass jeder Beteiligte für die Entwicklung in seinem speziellen Produktbereich die Verantwortung trägt. Ebenso ist er für die Planung und Durchführung von Produktion und Fertigung zuständig. Besonders an einer Entwicklungspartnerschaft ist jedoch die eng vernetzte und parallele Zusammenarbeit bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung. In Tabelle 1 erfolgt ein Vergleich der Kooperationsmodelle aus *VDA-Empfehlung 4961/2* mit einem Entwicklungspartner bezüglich der genannten Kriterien.

Tabelle 1: Merkmale und Ausprägungen von Kooperationsmodellen

	Entwicklungs-verantwortung für Produkt(bereich)	Planung und Durchführung von Produktion/Fertigung	Parallele Zusammenarbeit in der Produktentwicklung
Entwicklungspartner	●	●	●
Entwicklungsdienstleister	◔	○	○
Teilelieferant	○	●	○
Komponentenlieferant	●	●	◔
Modullieferant	●	●	◑
Systemlieferant	●	●	◑

○ gering/schwach

● hoch/stark

◑ Zwischenstufen

◔

Entwicklungsdienstleister übernehmen kleine Tätigkeiten innerhalb der Produktentwicklung wie etwa die Zeichnungsableitung, FEM-Berechnungen oder die Erstellung von Varianten [9]. Sie „liefern Entwicklungsdienstleistungen und keine Produkte“ [10] und handeln somit nur nach Vorgaben des Auftraggebers. Ihre Verantwortung ist rein auf die von ihnen geleistete Dienstleistung beschränkt. Entwicklungsdienstleister verfügen über keine Produktion. Teilelieferanten fertigen Standardteile (Normteile, Katalogteile) nach Vorgabe des Auftraggebers; sie erbringen keine Entwicklungsleistungen für den Auftraggeber [9, 10]. Komponentenlieferanten sind für die Entwicklung und Produktion einer Komponente verantwortlich, sind aber nur gering in die Prozesse des Auftraggebers involviert [10]. Eine parallelisierte Zusammenarbeit in der Produktentwicklung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer bezieht sich nur auf Schnittstellen (wie etwa die Passgenauigkeit). Eine Weiterentwicklung dieser Form der Zusammenarbeit zu einer Entwicklungspartnerschaft scheint sehr schwer. Dies unterscheidet sich stark von Modul- sowie Systemlieferanten. Diese Gruppen sind verantwortlich für die Entwicklung, Integration und/oder Produktion von komplexen Baugruppen beziehungsweise von funktional zusammenhängenden Systembausteinen [10].

Wie weitreichend die Zusammenarbeit innerhalb der Produktentwicklung tatsächlich ist, hängt sehr von der vertraglichen Ausgestaltung der Kooperation ab. In einigen Fällen kann es sich somit bei Kooperationen mit Modul- sowie Systemlieferanten um Entwicklungspartnerschaften handeln, in jedem Fall aber können diese sich zu Entwicklungspartnern weiterentwickeln. Im Zuge immer komplexer werdender Produkte sowie der zunehmenden Anzahl von Funktionen eines Produktes wird in Zukunft die Zahl der Modul- und Systemlieferanten weiterhin zunehmen [11]. Um die Komplexität zu handhaben, ist damit zu rechnen, dass im Zuge des erhöhten Abstimmungsbedarfs auch die Anzahl der Entwicklungspartnerschaften zunimmt und Modul- sowie Systemlieferanten als Entwicklungspartner agieren.

Doch die Einteilung nach *VDA-Empfehlung 4961/2* deckt nicht alle denkbaren Entwicklungspartnerschaften ab; horizontale Kooperationen als mögliche Entwicklungspartnerschaft werden nicht betrachtet. Auch *Wildemann* [8], der den Begriff des Entwicklungspartners in großem Umfang verwendete, nimmt sich der Meinung an, dass es sich bei Entwicklungspartnerschaften lediglich um vertikale Kooperationen handeln kann [8]. Dennoch haben praktische Erfahrungen aus der Vergangenheit gezeigt,

dass Kooperationen in der Produktentstehung auf horizontaler Ebene, also zwischen Unternehmen der gleichen Wertschöpfungsstufe, durchaus üblich sind. Gerade auch in der Automobilbranche existieren eng verflochtene Netzwerke zwischen den OEMs, gerade auch in der Produktentwicklung [1]. Diese horizontalen Entwicklungspartnerschaften erfolgen in zahlreichen Ausprägungen vom reinen Erfahrungsaustausch über Arbeitsgemeinschaften und Allianzen bis hin zur Form des Joint Ventures [9]. Stellvertretend dafür seien der „prince engine project“ als zwischenbetriebliche Kooperation ohne Kapitalbeteiligung von PCA und BMW oder aber das Joint Venture Toyota Peugeot Citroën Automobile (TPCA) genannt. Durch diese enge Verzahnung wird klar, dass auch horizontale Kooperationen bei der Betrachtung von Entwicklungspartnerschaften nicht vernachlässigt werden dürfen.

Viele Forschungsarbeiten befassen sich mit den späteren Phasen von Kooperationen, teilweise auch bezüglich der Zusammenarbeit in der Produktentwicklung. Dazu wurden Leitfäden zur Vertragsgestaltung derartiger Kooperationen vorgestellt; die Steuerung und das Controlling bestehender Entwicklungspartnerschaften wurden betrachtet (siehe etwa [9, 12, 13, 14, 15, 2, 16, 17]). Auch die bereits genannte VDA-Empfehlung enthält für Planer einer Kooperation eine Checkliste, mit der unterschiedliche Stufen der Kooperation beginnend mit den ersten Vereinbarungen gestaltet werden können [10]. Jedoch ergibt sich ein Forschungsbedarf in der Anbahnung zukünftiger Partnerschaften in der Produktentwicklung.

Bereits bei der Auswahl eines Entwicklungspartners stellt sich die zentrale Frage, wer in der Lage sein wird, mit dem auswählenden Auftraggeber gemeinsam das Produkt der Zukunft zu entwickeln und zu fertigen. Die ausgewählten Entwicklungspartner bekommen nicht nur Einblicke in das eigene Produktspektrum sowie die Prozesse des Auftraggebers; ebenso gibt der Auftraggeber Teilbereiche des Know-hows über Produkt und Prozess an seinen Partner ab [9]. Zudem können sich Fehler des Partners später negativ auf das Image des Auftraggebers auswirken. Aus den genannten Gründen sind Entwicklungspartner zu pflegen und können nicht leicht ausgetauscht werden. Dies begründet die hohe Beziehungsintensität sowie die Langfristigkeit der Zusammenarbeit mit einmal ausgewählten Entwicklungspartnern. Bisher findet sich in der Auswahl potentieller Partner keine Systematik, viele Entscheidungen fallen beruhend auf subjektiven Entscheidungskriterien oder aufgrund zufälliger Bekanntschaften [4]. Das garantiert nicht, dass aus zahlreichen Alternativen das bestmögliche Unternehmen für die gemeinsame

Entwicklung ausgewählt wurde. Es mangelt an messbaren, zusammenhängenden Kriterien, die eine objektive Auswahl ermöglichen und auch die Weiter- und Wiederverwendung der bereits gesammelten Ausprägungen berücksichtigt. Ein erster Ansatz für ein systematischeres Vorgehen wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

3 Konzept zur Auswahl eines Entwicklungspartners

Eine Entscheidung für eine notwendige Entwicklungspartnerschaft muss in den frühen Phasen der Produktentwicklung gefällt werden. Dazu müssen die Ziele der Partnerschaft bereits intern geklärt worden sein. Um unter allen möglichen Unternehmen den am besten geeigneten Entwicklungspartner auszuwählen, wurden vier große Kategorien identifiziert, um damit den Suchraum sukzessive einzugrenzen. Bild 1 zeigt den Prozess zur Eingrenzung des Suchraums und zur letztendlich bewussten Entscheidung für einen Entwicklungspartner. Die vier Hauptkategorien bezeichnen in Einzelnen:

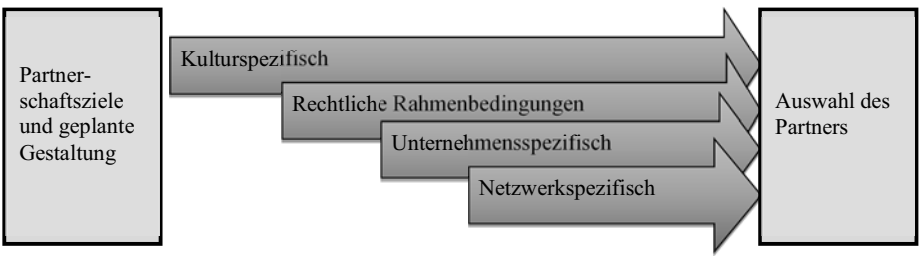


Bild 1: Konzept zur Auswahl zukünftiger Entwicklungskooperationen

- kulturspezifische Kriterien
  Jeder Kulturkreis bringt spezifische Kriterien mit sich, die an die Region des Partners gekoppelt sind und unter dieser Kategorie erfasst und zugeordnet werden müssen. Kennzahlen dieser Kategorie müssen etwa Aussagen zur Kultur, zum Rechtsverständnis oder zur Stabilität des Landes operationalisieren.
- rechtliche Rahmenbedingungen
  Kriterien dieser Kategorie stellen Einschränkungen aufgrund von gesetzlichen Regelungen dar. Da diese stark an involvierte Länder gekoppelt sind, muss die Sammlung der Kriterien zu rechtlichen Rahmenbedingungen nach der Eingrenzung

des Kulturkreises erfolgen. Ein Beispiel für derartig beeinflusste Kriterien sind etwa Ex- und Importbeschränkungen zwischen verschiedenen Ländern.

- unternehmensspezifische Kriterien
  Hierzu gehören alle Kriterien, die das andere Unternehmen selbst beschreiben und beurteilen. Aufgaben in diesem Bereich sind Bewertung der Kernkompetenzen und Know-Hows des potentiellen Partners wie auch dessen finanzielle Situation.
- netzwerkspezifische Kriterien
  Diese Kriterien sind nur aufgrund der Kooperation vorhanden und bewerten ein Zustandekommen des Netzwerkes an sich. Mögliche netzwerkspezifische Kriterien sind etwa das Risiko innerhalb der Kooperation oder auch die Zuverlässigkeit des potentiellen Partners bezüglich des festgelegten Rahmens. Aber auch die Bewertung des Partners durch das eigene ursprüngliche Kooperationsnetzwerk zählt hierzu.

Durch ein schrittweises Eingrenzen des Suchraums kann die Wahl eines Entwicklungspartners deutlich erleichtert werden. Allerdings müssen für eine objektive Entscheidung die vier genannten Kategorien näher spezifiziert werden. Es müssen für jeden Bereich Merkmale und Kennzahlen wie auch mögliche Ausprägungen und deren Bewertung festgelegt werden. Nur so kann ein geeigneter Partnern nach objektiven Kriterien ausgewählt werden.

4 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

In dieser Forschungsarbeit wurde gezeigt, dass sowohl die steigende Anzahl als auch der Bedarf an unternehmensexternen Kooperationen belegt werden kann. Dabei bezieht sich ein großer Teil der Kooperationen auf Partnerschaften in der Forschung und Entwicklung, weil komplexe Produkte, Wettbewerbsdruck, Globalisierung und daraus resultierende geringe Fertigungstiefe und Konzentration auf Kerngeschäfte die Unternehmen dahingehend verändern. Daher wurde ausgearbeitet, welche Merkmale Entwicklungspartnerschaften charakterisieren und wie diese Definition gegenüber dem derzeit vorherrschenden Verständnis von Entwicklungspartnern eingeordnet werden kann. Darauf aufbauend wurden Kategorien aufgezeigt, die bei der Planung und Auswahl zukünftiger Entwicklungspartner berücksichtigt werden müssen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in einem Detaillierung des Konzeptes, um

systematische Auswahl von Partnern in der Produktentwicklung zu gewährleisten. Einmal gesammelte Daten und Fakten über Unternehmen müssen dafür sinnvoll verwaltet werden, um eine Wiederverwendung zu ermöglichen. Entscheidend ist dabei, dass in Zukunft eine Kooperationsfähigkeit für die Produktentwicklung ohne Doppelarbeit messbar gemacht werden kann, um die Auswahl des am besten geeigneten Entwicklungspartners schnellstmöglich und zuverlässig zu gewährleisten.

Literatur

[1] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg 2009.

[2] Luczak, H. (Hrsg.): Unternehmenskooperation in Theorie und Praxis. Projekt Parko ; ganzheitliche und partizipative Gestaltung von Zulieferkooperationen in der Automobilindustrie. Düsseldorf 2002.

[3] Enkel, E.; Gassmann, O.: Hase gegen Igel? Management von Innovationen. In: VentureCapital Magazin "Tech-Guide 2006" (2006), S. 42–43.

[4] DG Bank: Mittelstand im Mittelpunkt Herbst/Winter 2000. Sonderthema: Kooperationen im Mittelstand. Frankfurt am Main 2001.

[5] Hausschild, W.; Wallacher, L.: Ad-hoc-Befragungen über Unternehmenskooperationen. Ergebnisse für das Jahr 2003. In: Statistisches Bundesamt - Wirtschaft und Statistik (2004) 9.

[6] Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (Hrsg.): Kooperationen planen und durchführen. Ein Leitfaden für kleine und mittlere Unternehmen. Berlin (o. J.).

[7] Wagner, S. M.: Lieferantenmanagement. In: Masing, W. ; Pfeifer, T.; Schmitt, R. (Hrsg.): Masing - Handbuch Qualitätsmanagement. München 2007.

[8] Wildemann, H.: Entwicklungsstrategien für Zuliererunternehmen. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 62 (1992) 4, S. 391–412.

[9] Eder, T.: Konzept für das operative Management von Entwicklungskooperationen zwischen Automobilherstellern. Aachen 2007, zugleich Techn. Univ. Darmstadt, Dissertation, 2007.

[10] VDA-Empfehlung 4961/2: Kooperationsmodelle und SE-Checkliste zur Abstimmung der Datenlogistik in SE-Projekten, Frankfurt 2001.

[11] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) (Hrsg.): Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015. - die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie, eine Studie von Mercer Management Consulting. Materialien zur Automobilindustrie 32. Frankfurt 2004.

[12] Franke, H.-J.: Kooperationsorientiertes Innovationsmanagement. Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes GINA "Ganzheitliche Innovationsprozesse in modularen Unternehmensnetzwerken". Berlin 2005.

[13] Kern, E.-M.: Verteilte Produktentwicklung - Rahmenkonzept und Vorgehensweise zur organisatorischen Gestaltung, Techn. Univ., Habil.-Schr. Berlin 2005.

[14] Killich, S.; Luczak, H.: Aufbau erfolgreicher Unternehmenskooperationen. Ein Leitfaden für mittelständische Automobilzulieferer. RWTH Aachen 2000.

[15] Petersen, K. J.; Handfield, R. B.; Ragatz, G. L.: Supplier integration into new product development: coordinating product, process and supply chain design. In: Journal of Operations Management 23 (2005) 3-4, S. 371–88.

[16] Sydow, J. (Hrsg.): Management von Netzwerkorganisationen. Beiträge aus der „Managementforschung“. Wiesbaden 2010.

[17] Wagner, K.: Systematik zur Gestaltung und Optimierung von wissensintensiven, kooperativen Problemlösungsprozessen in der Produktentwicklung. Heimsheim 2008.

Entwicklung von Robotersystemen zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Abwasserkanälen durch Inspektion und Wartung im laufenden Betrieb

Sven Kutzner[#], Norbert Elkmann, Heiko Althoff*, Josè Saenz, Thomas Stürze, Christoph Walter, Erik Schulenburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF
Geschäftsfeld Robotersysteme RS
Sandtorstrasse 21, 39106 Magdeburg
[#] Email: Sven.Kutzner@iff.fraunhofer.de; Internet: http://www.iff.fraunhofer.de

*Lippeverband
Geschäftsbereich Betrieb / Östliche Lippe
Kronprinzenstr. 24, 45128 Essen

Inhalt: *Im Rahmen des Umbaus des Emscher-Abwassersystems wird bis 2017 ein Schmutzwassersammler geplant und gebaut. Der Kanal hat eine Länge von ca. 51km bei Rohrdurchmessern von DN1600 bis DN2800 und eine Tiefenlage von 5,0m bis 40,0 m. In dem Kanal werden auch bei Trockenwetter permanent hohe Wassermengen abgeleitet. Die maximalen Haltungslängen betragen ca. 600 m. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit hat die Emschergenossenschaft für den Bau des Abwasserkanals Emscher beschlossen, über weite Strecken eine einzügige Freispiegelleitung zu realisieren. Aufgrund der permanenten Teilfüllung kann der Abwasserkanal Emscher nicht mit herkömmlichen Inspektionsmethoden wie Begehung bzw. TV-Inspektion untersucht werden. Mit den im Rahmen des Projektes entwickelten Inspektions- und Reinigungsrobotern kann auf eine Begehung des Kanals grundsätzlich verzichtet sowie eine objektive Bewertung des Kanalzustandes und eine hochauflösende Vermessung von Schadensbildern garantiert werden. Die neu entwickelten Roboter zur Inspektion und Reinigung für den Abwasserkanal Emscher erreichen eine weltweit einmalige hohe Qualität in der Inspektion und Reinigung. Mechatronische Positioniersysteme stellen die Basis für die Datenaufnahme dar. Zur Vorinspektion kommt dabei ein schwimmendes Trägersystem zum Einsatz, für die hochgenaue Vermessung und Reinigung werden radgetriebene Systeme mit robusten Kinematiken zur Führung der Sensoren und Werkzeugen durch den Kanal verwendet.*

Abstract: *In the course of the Emscher sewer system reconstruction process, a system for collecting wastewater is planned and built until 2017. With a length of about 51 km, the sewer will have pipe diameters between 1600 and 2800 mm at depths of 5 to 40 m. Even during dry weather, it will permanently drain off large amounts of water. The maximum distance between the shafts is about 600 m. For economic reasons, the Emschergenossenschaft decided to realize the Emscher sewer system for long distances as a single-duct gravity pipeline. Due to its permanent filling level, the Emscher sewer system cannot be inspected using*

conventional methods such as walk-through or TV inspection. The inspection and cleaning robots developed in the course of the project generally render a walk-through inspection unnecessary and guarantee an objective evaluation of the sewer condition as well as a highly resolved measurement of damage. The newly developed robots for inspecting and cleaning the Emscher sewer system achieve a high quality that is worldwide unparalleled for damage detection and cleaning. Mechatronic positioning systems represent the basis for data acquisition. Pre-inspection is realized by a floating carrier system, and wheel-driven systems with resistant kinematics for guiding sensors and tools through the pipe are employed for a highly precise measurement and cleaning.

Stichwörter: *Kanalinspektion, Abwasserkanal, Roboter, Trägersysteme, Kanalreinigung,*

Keywords: *sewer inspection, sewer, robot, carrier system,*

1 Einleitung

Die Inspektion von Abwasserkanälen mit kleinen Durchmessern wird heute in der Regel mit radgeführten Systemen durchgeführt, die mit einer Schwenk-Neige-Zoom TV- Kamera ausgestattet sind. Neuere Systeme verfügen über zwei Digitalkameras mit Fischaugen-Objektiven.

Neu ist die Entwicklung von Systemen für die Inspektion von größeren Kanalrohren (Durchmesser: 1,6 bis 2,8 Meter), die auch im laufenden Abwasserbetrieb zum Einsatz kommen. Im Auftrag der Emschergenossenschaft entwickelt das Fraunhofer IFF Inspektions- und Reinigungssysteme, um eine Inspektion großer Abwasserkanäle durchzuführen, die aus technischen Gründen nicht außer Betrieb genommen werden können [1]. Eine Kombination aus digitalen Kameras und modernsten Bildverarbeitungstechnologien verbunden mit der Messung des Unterwasserprofils mittels Ultraschallscanner ermöglicht eine neue Qualität der Kanalinspektion und Zustandserfassung.

Seit 1990 baut die Emschergenossenschaft im Ruhrgebiet das existierende oberirdische Abwasserableitungssystem um. Unterirdische Kanäle werden zukünftig das Abwasser ableiten, und der Fluss Emscher wird wieder sauberes Wasser führen. Die Emscher kann dann umgestaltet werden und vollzieht so den Wandel vom Meide- zum Erholungsraum [2]. Der Abwasserkanal Emscher bildet das zentrale Herzstück der zukünftigen Abwasserentsorgung von rd. 2 Mio. Einwohnern und einer Einzugsgebietsfläche von rd. 430 km². In weiten Teilen wird der Kanal als Einrohrsystem gebaut. Aufgrund der großen Tiefenlage des Kanals (5m – 40m), seiner Größe und seiner Bedeutung für die

Entwässerungssicherheit der Region wurden strenge Inspektionsstandards von den Aufsichtsbehörden eingefordert.

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen einer Generalauftragnehmerschaft wurde das Fraunhofer IFF in Magdeburg mit der Entwicklung und Realisierung eines vollständigen Inspektions- und Reinigungskonzeptes für die Genehmigung und den späteren Betrieb des Abwasserkanals Emscher beauftragt.

Dies beinhaltete in den Jahren 2003 bis 2008 die Recherche und Entwicklung neuartiger Sensor- und Reinigungsverfahren sowie Positioniersysteme zur Erfüllung der abwassertechnischen Anforderungen. Der Nachweis einer Machbarkeit war durch den Aufbau von Prototypen und Tests unter realen Bedingungen im Abwasserkanal zu erbringen.

Mit den Projektergebnissen konnte das Planfeststellungsverfahren bezüglich der Inspektion und Reinigung erfolgreich abgeschlossen und der Bau des Abwasserkanals begonnen werden. Durch den Wegfall einer Paralleltrasse können nun erhebliche Bau- und Betriebskosten eingespart werden.

Die Inspektions- und Reinigungssysteme als fester Bestandteil des Abwasserbetriebskonzeptes sind nun als Serienprodukte zu konstruieren und aufzubauen.

1.2 Anforderungen an die Inspektion und Reinigung

An die Inspektion und Reinigung des Abwasserkanals Emscher werden vielfältige Anforderungen gestellt. Der Betreiber muss in die Lage versetzt werden, durch den Einsatz der Geräte den Verpflichtungen einer regelmäßigen Inspektion des Kanals nachzukommen. Die planmäßige, regelmäßige und systematische Erfassung des baulichen und betrieblichen Zustandes der Kanalisation wird durch die Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen SüwVKan, den Runderlass „Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen“ sowie die ATV-Richtlinien gefordert. Bezüglich der zu detektierenden bzw. zu erfassenden Schadensbilder wurden die Schadensbilder und die Anforderungen an die Zustandserfassung gemäß Schadensklasse ZK 3 (langfristiger Handlungsbedarf) der DWA-M 149 und die für die

Zustandserfassung relevanten Undichtigkeiten gemäß ZK 1 bzw. ZK 0 herangezogen [3]. In Gesprächen zwischen den Behörden, der Emschergenossenschaft und dem Fraunhofer IFF wurden die besonderen Anforderungen an die Inspektion des Abwasserkanal Emscher im Jahr 2005 präzisiert und notwendige Erfassungsgenauigkeiten festgelegt, so dass eine größtmögliche Sicherheit beim Betrieb des Abwasserkanals Emscher gewährleistet ist.

Folgende technische und betriebliche Randbedingungen an die Inspektions- und Reinigungssysteme ergeben sich aus dem späteren Betrieb des Kanals:

- keine Begehung des Kanals möglich
- Detektion der Schadensbilder im Wasser- und Gasraum erforderlich
- Einhaltung der technischen Normen, Vorschriften und Richtlinien
- hohe Zuverlässigkeit und Bergungssicherheit der Inspektions- und Reinigungssysteme bei allen Betriebszuständen im Kanal
- hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- Die Komponenten der Inspektions- und Reinigungssysteme müssen derart gekapselt sein, dass sie unanfällig gegen die chemisch aggressive Atmosphäre des Kanals sind.

2 Lösungen – Inspektions- und Reinigungssysteme SEK und SVM-RS

2.1 Gesamtkonzept Inspektion & Reinigung

Für die Inspektion und Reinigung des Abwasserkanals Emscher wurde eine 3-Stufen-Strategie entwickelt. In der ersten Stufe wird der Abwasserkanal mit einem kleinen, schwimmenden System zur Vorinspektion, dem Schadenerkennungssystem (SEK) befahren. Die Vorinspektion mit dem SEK umfasst eine optische Inspektion des Gasraumes auf Risse, Korrosion und Lageabweichungen im Fugenbereich. Unterhalb des Abwasserspiegels erkennt das SEK mittels Ultraschallscanner, ob mechanischer Verschleiß, Ablagerungen und/oder Hindernisse vorhanden sind. In der zweiten Stufe wird bei Bedarf das radgeführte SVM-RS als Reinigungssystem eingesetzt, um jegliche Ablagerungen oder Hindernisse zu beseitigen und die Kanalwand im Gasraum zu reinigen. Eine detaillierte, vollumfassende Inspektion wird in der dritten Stufe mit den Sensorsystemen des SVM-RS durchgeführt. Das SVM-RS untersucht den Kanal auf

sämtliche nach DWA-M 149 bekannte Schäden in einem sehr hohen Detaillierungsgrad (Tabelle 1).

Tabelle 1 Zu detektierende Schadensarten und Genauigkeiten des SEK [Fraunhofer IFF]

Zustandsart	Zustandsspezifikation	Mindestgenauigkeit	
		Gasraum	Wasserraum
Korrosion	Innenkorrosion, Korrosion in der Rohrverbindung	Mehrkamerasystem: optische Erkennung	-
mechanischer Verschleiß	mechanischer Verschleiß allgemein	-	Ultraschallscanner: ± 13 mm
Abflusshindernisse	Hindernisse, Ablagerungen	Videosystem: optische Erkennung	Ultraschallscanner: ± 13 mm
Lageabweichungen	horizontal/vertikal	Mehrkamerasystem: ± 10 mm	-
	Axialverschiebung	Mehrkamerasystem: ± 8 mm	-
Risse	Längsriss, Radialriss	Mehrkamerasystem: ≥ 0,7 mm	-
Undichtigkeiten	sichtbar,starke Wasserinfiltration	Mehrkamerasystem: optische Erkennung	-

2.2 Vorinspektion mit SEK

Das SEK schwimmt vom Schachtbauwerk aus mit dem Abwasserstrom in den Kanal und ist über ein schwimmendes Versorgungskabel mit dem Bedienstand außerhalb des Schachtes verbunden. Das Versorgungskabel steuert die Bewegungsgeschwindigkeit des Systems im Kanal und gewährleistet in jeder Situation eine sichere Bergung. Die mittige Systemposition wird kontinuierlich sensorisch erfasst und nachgeregelt. Das SEK kann selbst in einem gekrümmten Kanalrohr eine mittige Position im Kanal halten und arbeitet komplett autonom. Vor der Inspektion legt der Bediener z. B. die Länge des zu inspizierenden Abschnitts und die Inspektionsgeschwindigkeit fest. Danach überwacht er lediglich den Inspektionsablauf und analysiert die Inspektionsdaten auf Schäden. Eine automatische Generierung von Hinweisen auf Schadensbilder unterstützt den Bediener bzw. Inspekteur in heute einzigartiger Weise. Die Belastung des Inspekteurs wird dadurch reduziert und die Zuverlässigkeit der Schadenserkennung stark erhöht. Ein Prototyp des SEK im Kanal ist in Bild 1 dargestellt.

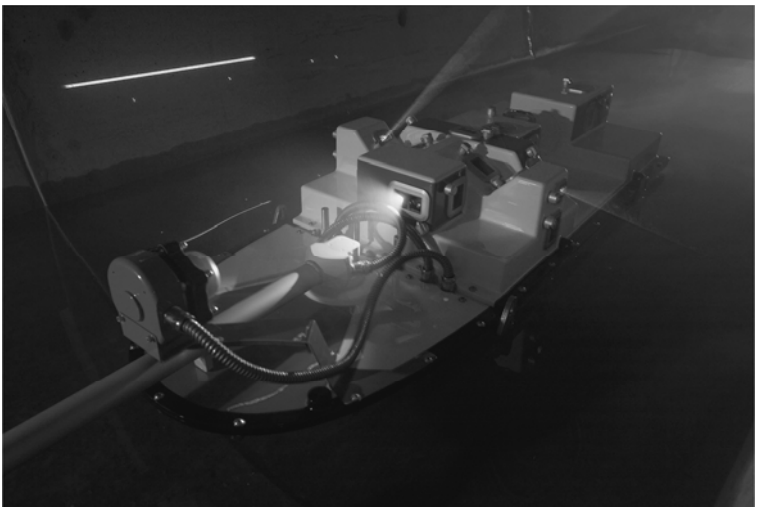


Bild 1 Prototyp Schadenerkennungssystem SEK im Kanal [Fraunhofer IFF]

2.3 Detailinspektion und Reinigung mit SVM-RS

Das Inspektions- und Reinigungssystem SVM-RS besteht aus einem radgetriebenen Trägersystem, welches die Bewegung durch den Kanal realisiert, der Vermessungstechnik zur Aufnahme des Kanalzustandes und der Reinigungstechnik zur Reinigung des Kanals. Das Trägersystem ist mit vier Antriebsmodulen ausgestattet. Jedes Rad kann unabhängig angetrieben und angesteuert werden. Die wesentlichen Baugruppen des Trägersystems sind Rumpf, Überdruckanlage, Radantriebsmodul, Elektrotechnik, Hydraulik und Medienanschlusstechnik (Bild 2).

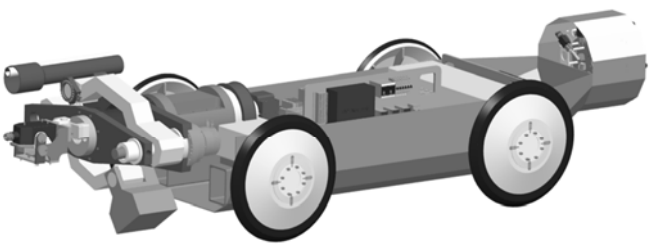


Bild 2 Trägersystem Inspektions- und Reinigungssystem Entwicklungsstand 2010 [Fraunhofer IFF]

Vermessungstechnik und die Reinigungstechnik sind oberhalb des Trägersystems angeordnet. Tragrahmen und Rumpf dienen der Aufnahme aller Baugruppen von Trägersystem, Vermessungs- und Reinigungstechnik. In Richtung Zielschacht ist das Mehrkamerasystem zur Erfassung des Gasraumes angebracht. Der Aufbau des Mehrkamerasystems besteht aus einer Anordnung von zwölf optischen Digitalkameras und zwölf Kreuzlinienlasern.

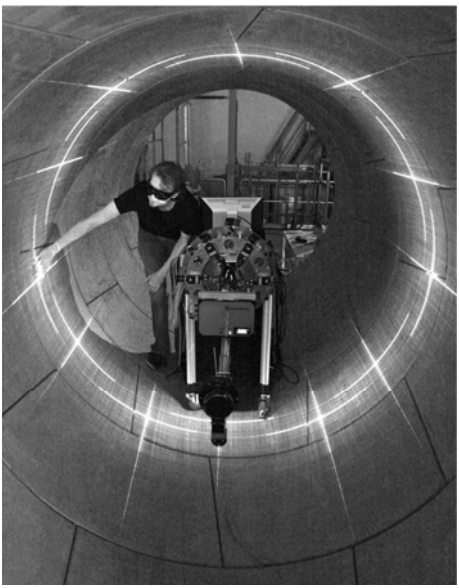


Bild 3 Prototyp des Mehrkamerasystems in einem Versuchsrohr

Am Heck des Systems, in Richtung Startschacht, ist eine Kinematik als universeller Werkzeug- und Sensorträger angebracht. Die Kinematik stellt jeweils zwei Freiheitsgrade für zwei gegenüberliegende Werkzeugeinheiten zur Verfügung. Drehbewegungen um die Kanalrohrachse sind stufenlos in Drehzahl und Drehwinkel einstellbar. Ein Teleskopmodul dient der stufenlosen Linearzustellung zur Kanalwand. Gleichzeitig werden Hochdruckwasser und Kabel durch das Teleskopmodul geführt. Alle relevanten Sicherheitsfunktionen wie das automatische Einfahren im Fehlerfall werden vom Teleskopmodul erfüllt (Bild 4).

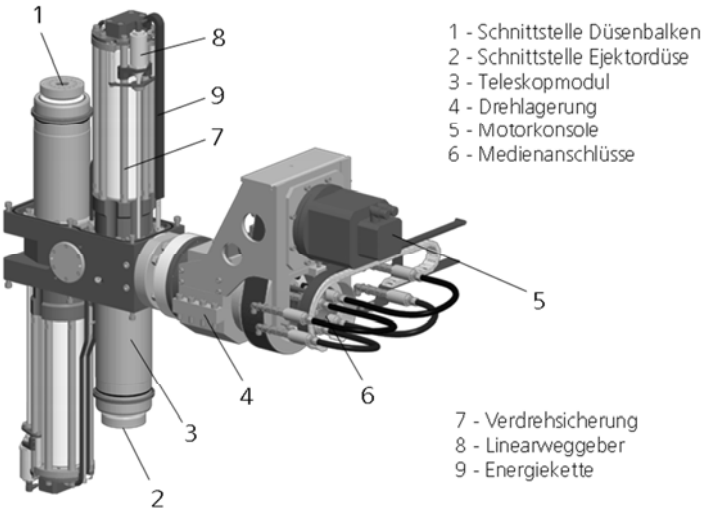


Bild 4 Prototyp einer Kinematik mit schlauchloser Wasserzuführung [Fraunhofer IFF]

Bei einer Erkennung von Schäden im Gasraum erfolgt die lokale Unterwasserinspektion mit einem Kombinationssensor zur Unterwasserinspektion. Dieser schwenkbar auf der Teleskopeinheit gelagerte Sensor untersucht im trüben Abwasser die Kanalwand optisch mit einem Kameraverbund und einer Linienlaserbeleuchtung auf Risse. Ein vom Fraunhofer IFF patentiertes Temperaturdifferenzmessverfahren erfasst dabei Infiltrationen durch Grundwasser.

Infrastruktur

Eine wichtige Komponente der Inspektions- und Reinigungssysteme ist die mobile Infrastruktur, die die Systemversorgung am jeweiligen Einsatzort erst ermöglicht. Dazu wurde ein Transportfahrzeug mit einem Bedienstand und der Datenverarbeitungstechnik ausgestattet. Die Datenverarbeitungstechnik dient zur Verarbeitung und Archivierung der Datensätze, die einen Umfang von bis zu 140 GB für eine Rohrlänge von 600 m erreichen. Auf einem Anhänger befinden sich das angetriebene Kabeltrommelsystem mit schwimmfähigem Hybridkabel, ein Inspektionssystem und ein Stromgenerator. Bild 5 zeigt die fertiggestellte Infrastruktur zum Betrieb eines Schadenerkennungssystems.

Bild 5 Infrastruktur zum Betrieb des Schadenerkennungssystems SEK in 600 m Haltungen [Fraunhofer IFF]

Literatur

[1] N. Elkmann, S. Kutzner, J. Saenz, B. Reimann, Fully Automatically Inspection Systems for Large Underground Concrete Pipes partially filled with Waste Water, in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, Oct. 9-15, 2006, pp. 4234-4238.

[2] www.emscherzukunft.de, Website der Emschergenossenschaft zum Emscherumbau

[3] Merkblatt DWA-M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, 1999.

Integriertes Oil-Condition Monitoring für Produktionsmaschinen im globalen Weltmarkt

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Beyer

Institut für Konstruktion und Produktentwicklung
HAW Hamburg, Department Maschinenbau und Produktion,
Berliner Tor 21, 20535 Hamburg
Email: hans-joachim.beyer@haw-hamburg.de; Internet: http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Beyer/

Inhalt: *Heute werden große Produktionsmaschinen mit komplexen Überwachungssystemen ausgestattet, um die Serviceintervalle zu verlängern, die lokale Servicequalität sicherzustellen und um einen Schadensbeginn rechtzeitig zu melden. Meist sind diese Maschinen mit einem automatischen Ölumlaufschmiersystem ausgestattet. Die Kenntnis über den aktuellen Ölzustand ist funktionsnotwendig. In diesem Beitrag wird über den Stand der Technik berichtet, welche Online-Sensoren heute verfügbar sind, um kontinuierlich den Schmierölzustand zu messen. Die Online-Sensoren für die Messung von Fremdpartikeln und dem Wassergehalt im Umlauföl werden ausführlicher vorgestellt. Die Versuche im industriellen Einsatz zeigen deutlich, dass sich derzeit die Verschmutzung und der Wassergehalt im Öl noch nicht in labormäßig exakten Größenordnungen, jedoch zuverlässig als Trend messen lassen, welches für die Überwachung der hochwertigen Maschinen ausreicht und zum Auslösen von Service-Alarmen geeignet ist.*

Abstract: *Today all big production machines are equipped with complex online conditioning monitoring systems to enlarge the service intervals and to detect a coming damage ahead of the fatal exit. In most of the times these machines own an automatic oil lubrication system. The knowledge about the actual oil condition is essential. This paper informs about the state of the art of commercial oil monitoring sensors. The sensors detecting solid particles and water content in the circulating oil are discussed in more detail. The tests in a production facility proofed that up to now the pollution of the oil cannot be measured in absolute correct numbers but can be monitored as a precise trend which is correct enough to set off service alarms.*

Stichwörter: *Maschinenzustandsüberwachung, Produktionsmaschinen, Serviceintervall, Ölumlaufschmierung, Online-Sensoren, Wassergehalt im Öl, Wassersättigung, Partikelkonzentration*

Keywords: *online condition monitoring, oil circulating system, online sensors, water content in oil, particle concentration*

1 Online Zustandsanalysen von Ölumlaufsystemen

Die Automatisierung, Rationalisierung und die Auslieferung in globale Märkte beschleunigt die Ausstattung von großen Produktionsmaschinen mit komplexen

Überwachungssystemen [1], um die Produktionsleistung zu steigern, die Serviceintervalle zu verlängern und um potentielle Schadensauslöser rechtzeitig zu melden.

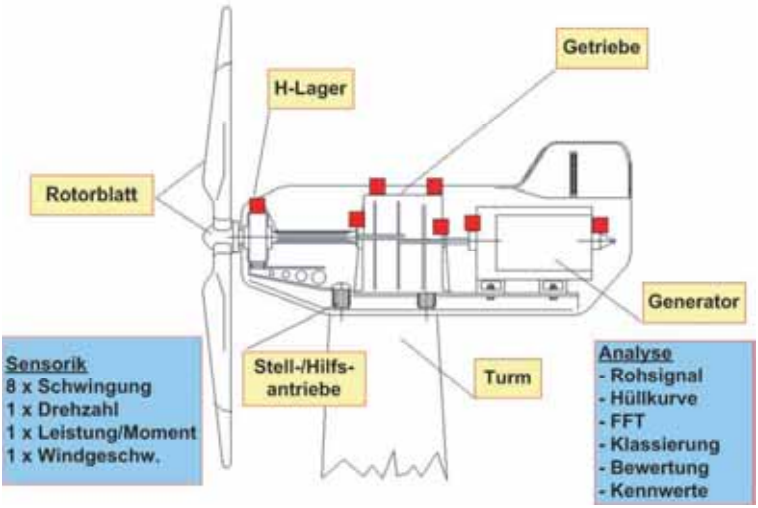


Bild 1: Überwachungswürdige Komponenten einer Windenergieanlage (WEA) [2]

Bisher werden Online-Sensoren für die Überwachung der Ölqualität selten eingesetzt. Es werden meist nur die folgenden „klassischen“ Parameter überwacht [2], [3]:

Drehzahl, Stromaufnahme, Drehmoment
Öltemperatur und Öldruck oder Ölvolumenstrom
Schwingungen incl. FFT-Analysen
lokale Prozessparameter wie Volumenstrom oder z.B. Windgeschwindigkeit

Heute sind alle hochwertigen Maschinensysteme mit schnell bewegenden Teilen mit einem automatischen Ölumlaufschmiersystem ausgestattet. [4], [5]. Arbeiten am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen zeigen, dass die Überwachung der Feststoffpartikelkonzentration im Umlauföl einen beginnenden Wälzlagerschaden noch vor dem Anstieg des Schwingungssignals ankündigt. [6]
Auch ohne Schäden ist das klassische Vorgehen, die Feststoffverunreinigungen aus dem Öl zu filtern und das Öl in festen Intervallen auszutauschen, bei vielen hochwertigen

Anlagen wie z.B. mannlos betriebenen Produktionsanlagen [7] und Offshore Windparks unwirtschaftlich. Üblicherweise wird in festen Abständen das Öl untersucht und ein Ölzustandsbericht zur Art und Menge der Verunreinigungen, der Öl-Reinheitsklasse nach ISO 4406, der Viskositätsänderung, der Ölalterung, des Wassergehalts und dem Additivabbau erstellt. Durch den Zeitverzug zwischen Probenentnahme und Probenauswertung ist dieses Vorgehen nur für die Detektierung einer langsamen Ölverschlechterung geeignet und unfähig, auf kurzfristig auftretende Probleme wie z.B. Wassereinbruch ins Ölumlaufsystem zu reagieren. Bei Offshore Windparks ist infolge der aufwendigen Probenentnahme dieses Vorgehen mit hohen Kosten verbunden. [8]

2 Industrielle Sensoren für die Online Ölzustandsanalyse

In diesem Beitrag wird über den Stand der Technik berichtet, welche Sensoren heute verfügbar sind, die in den Ölkreislauf eingeschleust werden können, um kontinuierlich die wesentlichen Eigenschaften des Schmiermediums zu messen. Der aktuelle Ölzustand kann grundsätzlich mit der Viskosität, Ölalterung/ Öloxidation, Partikelanzahl/ Reinheitsklasse, Wassergehalt/ Sättigungsgrad, Säurezahl, Leitfähigkeit und Dielektrizitätsänderung charakterisiert werden.

Es werden 16 Online-Sensoren von 7 Anbietern betrachtet. Wegen der hohen Bedeutung werden zuerst 2 industriell einsetzbare Sensorsysteme zum Monitoring der Öl-Reinheitsklasse nach ISO 4406 und des Sättigungsgrades des im Öl gelösten Wassers erprobt.

Wasser kann die Oxidation des Schmierstoffes bis zum Zehnfachen beschleunigen. Die potenzielle Wälzlagerlebensdauer kann um 75% verkürzt sein, noch weit bevor das Schmieröl eine Trübung zeigt. Auch im gelösten Zustand greift Wasser das Basisöl, die Additive und die Stahlteile (z.B. Wälzlager) an.

Die Sättigung des Wassers im Öl wird Online mit Hilfe kapazitiver Sensoren gemessen [9], deren Funktionsweise spezielles Firmen-Knowhow ist.

Bild 2 zeigt die Reinheitsklassen ISO4406 und die Empfehlung für Ölumlaufschmiersysteme.

Reinheitsklasse nach ISO 4406	Anzahl der Partikel in 100 ml Flüssigkeit					
	≥ 4 µm		≥ 6 µm		≥ 14 µm	
	mehr als	bis zu	mehr als	bis zu	mehr als	bis zu
24 / 21 / 19	8.000.000	16.000.000	1.000.000	2.000.000	250.000	500.000
23 / 20 / 17	4.000.000	8.000.000	500.000	1.000.000	64.000	130.000
22 / 19 / 16	2.000.000	4.000.000	250.000	500.000	32.000	64.000
21 / 18 / 15	1.000.000	2.000.000	130.000	250.000	16.000	32.000
20 / 17 / 14	500.000	1.000.000	64.000	130.000	8.000	16.000
19 / 16 / 13	250.000	500.000	32.000	64.000	4.000	8.000
18 / 15 / 12	130.000	250.000	16.000	32.000	2.000	4.000
17 / 14 / 11	64.000	130.000	8.000	16.000	1.000	2.000
16 / 13 / 10	32.000	64.000	4.000	8.000	500	1.000
15 / 12 / 9	16.000	32.000	2.000	4.000	250	500
14 / 11 / 8	8.000	16.000	1.000	2.000	130	250
13 / 10 / 7	4.000	8.000	500	1.000	64	130
12 / 9 / 6	2.000	4.000	250	500	32	64
11 / 8 / 5	1.000	2.000	130	250	16	32
10 / 7 / 4	500	1.000	64	130	8	16
9 / 6 / 3	250	500	32	64	4	8
8 / 5 / 2	130	250	16	32	2	4
7 / 4 / 1	64	130	8	16	1	2

Systemart und Anwendungs-bereich	Empfohlene Reinheitsklasse
Servohydraulik	15 / 13 / 10
Schmieröltechnik	16 / 14 / 11
	17 / 15 / 12
Industriehydraulik Hochdruck-systeme	17 / 15 / 12
Elektromagnet. Steuerventile Mittel- und Nieder-drucksysteme	19 / 17 / 14
Frischöl (Ölfässer)	21 / 19 / 16
	22 / 20 / 17
	23 / 21 / 18

Bild 2: Öl-Reinheitsklasse nach ISO 4406 und industrieller Alltag [10],[11]

Die Partikelkonzentration wird im optischen Durchlichtverfahren gemessen [6].

3 Versuchsergebnisse

Die Online-Sensoren für die Messung von Fremdpartikeln und dem Wassergehalt im Umlauföl werden ausführlicher untersucht. Mit diesen Sensorsystemen werden mit zwei industriellen Partnern Laborversuche und eine industrielle Außenerprobung durchgeführt [12]. Die Sensoren sind in den Ölkreislauf von Ölumlaufschmiersystemen integriert. Zum Einsatz kommt das vollsynthetische EP-Getriebeöl Degol ESG 100, das auf Poly-Alpha-Olefin basiert. Es hat die Viskosität 100 mm²/s bei 40 °C. Dieses Öl bietet hohen Verschleißschutz, Sicherheit gegen Fressen und hat ein besonders günstiges Reibverhalten.

Im Dauerbetrieb wird dem Öl dosiert Teststaub ISO MTD (Medium Test Dust) zugegeben und die Reaktion der Sensoren untersucht. Die gleiche Versuchsreihe erfolgt auch mit Wasser statt des Staubs. Es folgt ein Vergleich zwischen den Werten der Online-Sensoren und den zeitgleich gezogenen Ölproben.

Tabelle 1: Ergebnisse des Versuchs Nr. 3 (beispielhaft) [12]

Ölprobe	Reinheitsklasse nach ISO 4406 und *Wassersättigungsgrad [%]*		
	Anzeige der Online-Sensoren		Labor-Ergebnisse
	Hersteller 1	Hersteller 2	(Mittelwerte)
1	**20 /18 /13** *70 % bei 30 °C*	**19 / 17 / 13** *78 % bei 25 °C*	**20 / 18 / 14** *149 ppm*
2	**16 / 14 / 8** *63 % bei 34 °C*	**15 / 13 / 7** *71 % bei 31 °C*	**17 / 14 /10** *161 ppm*
3	**20 / 18 / 11** *59% bei 35 °C*	**18 / 16 /10** *67 % bei 31 °C*	**19 / 17 /12** *150 ppm*

Die mit dem Sensor des Herstellers 1 gemessenen Reinheitsklassen korrelieren mit den im Labor ermittelten Ergebnissen, da die zulässige Abweichung schon im Kalibrierbereich ½ bis 1 ISO-Klasse beträgt. Der Sensor des Herstellers 2 zeigt bei den Proben 1 und 3 korrekte Reinheitsklassen an, während sie für Probe 2 zu weit von den Laborwerten abweichen. Da der Sättigungsgrad der Probe 1 bei einer niedrigeren Temperatur (30°C bzw. 25°C) als bei den Proben 2 und 3 (35 °C bzw. 31°C) gemessen wurde, ist der Wassergehalt der Probe 1 in diesem Fall nicht vergleichbar mit dem der Proben 2 und 3. Es ist sinnvoll, die Daten der Proben 2 und 3 zu vergleichen, da sie bei annähernd gleichen Temperaturen gemessen wurden. Die Veränderung des Sättigungsgrads ist näherungsweise linear zum Wassergehalt. Damit sind die Anzeigen der Sensoren hinreichend genau.

Die Versuche zeigen deutlich, dass sich heute im industriellen Alltag die Verschmutzung und der Wassergehalt im Öl noch nicht in labormäßig exakten Größenordnungen, jedoch zuverlässig als Trend messen lassen, welches für die Überwachung der Maschinen ausreicht und zum Auslösen von Service-Alarmen geeignet ist.

4 Zusammenfassung

Von heute üblichen 16 industriellen Sensoren zur Online-Zustandsüberwachung wurden 4 für den globalen Einsatz beschafft und untersucht.

Die Sensoren werden vom Schmieröl durchströmt und messen im Öl kontinuierlich:

-Feststoffpartikelkonzentration

-Öltemperatur

- Sättigungsgrad im gelösten Wasser

Die Sensoren arbeiten nach demselben Prinzip (Abschattungsprinzip und kapazitive Änderung). In Versuchen im Prüffeld und beim Kunden zeigen die untersuchten Sensorsysteme eine vergleichbare Genauigkeit, Sensitivität und industrielle Einsetzbarkeit.

Danksagung

Ganz besonders danke ich Herrn Dipl.-Ing. D.C. Nguyen für die erfolgreiche Durchführung der Versuche. Außerdem gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. J. Mackel, Herrn L. Horstkötter und besonders Herrn Ing. H. Brörmann, die das Projekt bei der GEA Westfalia Separator Group unterstützt haben. Herrn Dipl.-Ing. H. Ginthör und H. Dipl.-Ing. O. Schröder wird für die Unterstützung durch die Firma Hydac gedankt.

Literatur

[1] 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.

[2] Höring, B.: Condition Monitoring für Offshore-Windparks, VGB Power Tech 6/2003

[3] Brüel & Kjær Vibro GmbH, Darmstadt: Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, 2011

[4] Prüftechnik Condition Monitoring GmbH, Ismaning: Online Condition Monitoring an Dekantern,2006

[5] Krähling, R.C.: Neue Wartungs- und Instandhaltungskonzepte durch Condition Monitoring, VDMA MDA Forum der Hannover Messe 2011

[6] Ginthör, H: Mit Condition Monitoring und Ölpflege zu geringeren Life Cycle Costs, Vortrag an der HAW Hamburg, 2011

[7] Beyer, H.-J., Fleuter, M.: Intelligente Mess- und Regelungstechnik zur optimierten Prozessführung bei der Abwasserbehandlung. Chem. Technik 51 (1999) 5, 256-257

[8] Dalhoff, P., Wöbbeking, Muuß: Windenergie, wie fließen Schadensanalysen in die Normung ein? Paper VDI Schadenstagung, Hamburg (2007)

[9] MpFiltri UK Ltd., England: ICM Inline Contamination Monitor User Guide, 2011

[10] Nes, U.: Einfluss der Ölreinheitsklasse auf die Fahreigenschaften von Hydraulikaufzugsanlagen, Vortrag auf dem Schwelmer Symposium, 2008

[11] C.C. Jensen A/S, Denmark: Clean Oil Guide, Forth Edition 2009

[12] Nguyen, D. C.: Online Condition Monitoring von Maschinen mit Ölumlaufschmierung, Diplomarbeit am Institut für Konstruktion und Produktentwicklung, HAW Hamburg. (2011)

Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen bei der Auslegung von Beveloidzahnrädern

Christian Brecher, Christof Gorgels, Tobias Röthlingshöfer, Jannik Henser

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Steinbachstr. 19, 52074 Aachen
Email: J.Henser@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *Beveloidräder, auch konische Stirnräder oder Beveloids genannt, gewinnen in der industriellen Praxis immer mehr an Bedeutung. Sie werden bereits seit Jahren im Schiffsgetriebebau verwendet und finden augenblicklich auch Einzug in den Automobilbau. Beveloidverzahnungen können bei parallelen, sich kreuzenden oder sich schneidenden Achsen eingesetzt werden. Bei der Auslegung von Beveloidverzahnungen existiert derzeit kaum Erfahrung in den Bereichen der Auslegung und Fertigung. In vielen Fällen führt das Fehlen von gesicherten Kennwerten und Berechnungsverfahren zu Fehlern in der Auslegung oder zu Missverständnissen zwischen der Konstruktions- und der Fertigungsabteilung und somit zu einem ungewünschten Einsatzverhalten des Beveloidzahnrades im Getriebe. Deshalb werden am WZL die vorhandenen Werkzeuge zur Beurteilung des Einsatzverhaltens von Beveloids durch eine Simulation des Wälzschleifens von Beveloids und eine allgemeine Zahnkontaktanalyse ergänzt. Mit der Schleifsimulation werden die resultierenden Geometrien, respektive verfahrensbedingter Fertigungsabweichungen errechnet und deren Einsatzverhalten anschließend in der Zahnkontaktanalyse ermittelt. Somit werden die verfahrensbedingten Fertigungsabweichungen bereits im Auslegungsprozess berücksichtigt, wodurch das Risiko von Missverständnissen zwischen der Konstruktionsabteilung und der Fertigungsabteilung verringert wird. In diesem Bericht werden die Fertigungssimulation GearGenerator und die Zahnkontaktanalysesoftware ZaKo3D exemplarisch an einer Beveloidverzahnung angewandt. Dabei wird der Fokus auf die Berücksichtigung fertigungsbedingter Abweichungen sowie die Gefahr der fehlerhaften Auslegung und Montage von Beveloidverzahnungen gelegt. Es wird gezeigt, wie diese Fehlerquellen mit den vorgestellten Berechnungswerkzeugen vermieden werden.*

Abstract: *A particular gear type which becomes more and more important is the beveloid gear, also known as conical gear. For example it is used in marine applications since many years. In the last years the use of beveloids in the automotive sector has been increased. Beveloid gears can be mounted with intersecting, parallel and skew shafts. The experience in designing and manufacturing of beveloid gears is not as extensive as for spur or helical gears. In many cases missing guide lines and analysis tools lead to mistakes during the gear desing process and to misunderstandings between the design and manufacturing department. This results in an unwanted running behaviour. Therefore at the WZL the existing tools for the evaluation of beveloid gear behaviour are supplemented by a continuous grinding simulation of beveloid gears and a general tooth contact analysis. The gear geometry is simulated by the generating grinding software GearGenerator, including manufacturing induced deviations. After this the gear geometry is*

analyzed by using the 3D tooth contact analysis software ZaKo3D. So the manufacturing induced deviations are already considered in the manufacturing process which reduces the risk for misunderstandings between the design and the manufacturing department. In this report the manufacturing simulation and the tooth contact analysis software are applied on a beveloid gear. The focus is on the consideration of manufacturing induced deviations and on the risk of mistakes in the design process of beveloid gears. It is shown how the software tools can be used to avoid these mistakes.

Stichwörter: *Beveloid, Auslegung, Fertigungssimulation, Zahnkontaktanalyse*

Keywords: *Beveloid, Design, Manufacturing Simulation, Tooth Contact Analysis*

1 Beveloidzahnräder

Beveloidverzahnungen, rechts in **Bild 1** dargestellt, sind Zahnräder, die bei kreuzenden, schneidenden und parallelen Achsen zur Übertragung von Rotationsbewegungen und Drehmomenten verwendet werden [1]. Sie werden bei der Realisierung kleiner Achskreuzwinkel den Kegelradverzahnungen vorgezogen, da für Letztere im Falle kleiner Achskreuzwinkel die Grenzen der wirtschaftlichen Herstellbarkeit erreicht werden [2], [3].
Die Geometrie der Zahnlücken von Beveloids wird vom Bezugsprofil für Zylinderräder abgeleitet. Bei Zylinderrädern wird das Bezugsprofil axial parallel verschoben, woraus sich die Planverzahnung ergibt. Ein Beveloid wird erzeugt, indem die Achse des zu erzeugenden Zahnrads gegenüber dem Planrad um den Konuswinkel θ gekippt wird und somit ein Zahnrad mit einer über der Zahnbreite linear veränderten Profilverschiebung erzeugt wird. [4]
Für eine hohe Tragfähigkeit von Verzahnungen ist ein Linienkontakt zwischen beiden Wälzpartnern vorteilhaft, da durch diesen die Hertzschen Pressungen und somit die Flankentragfähigkeit steigt. Bei Beveloidverzahnungen ist ein Linienkonkakt in jeder Wälzstellung jedoch nur durch komplizierte Flankengeometrien zu gewährleisten, deren Herstellung meist unwirtschaftlich ist. Gängigerweise wird daher eine Annäherung an diesen Fall durch eine leicht herstellbare, evolventische Verzahnung vorgenommen [4]. Bei der Auslegung dieser angenäherten Verzahnung führen jedoch verschiedene Effekte bei Konstruktion, Fertigung und Montage zu einem ungewünschten Zahneingriff. In diesem Bericht wird auf Fehlerquellen in Konstruktion, Fertigung und Montage eingegangen und ein Vorgehen vorgestellt, mit dem diese messbar gemacht werden können. Für dieses Vorgehen werden die Software zur Fertigungssimulation von Zahnrädern GearGenerator und die Zahnkontaktanalysesoftware ZaKo3D verwendet. Diese Softwareprogramme

werden am WZL entwickelt und sind bereits auf dem 7. gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2009 vorgestellt worden [5].

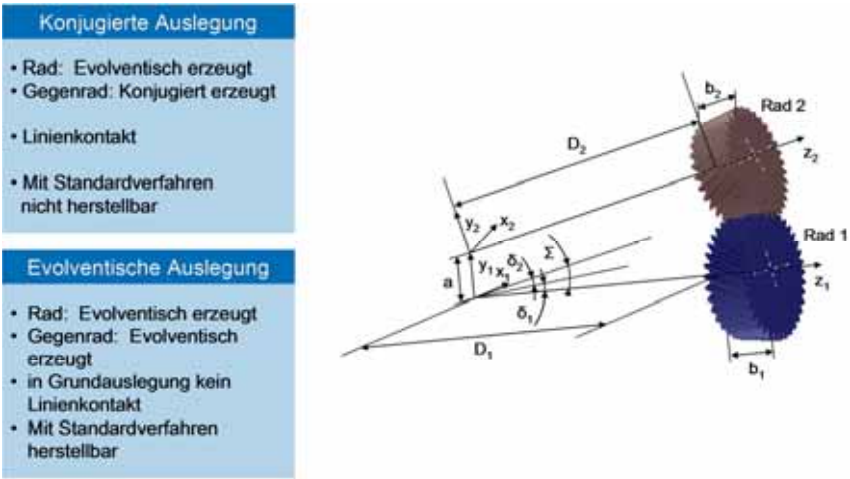


Bild 1: Gegenüberstellung geometrischer Eigenschaften von Stirn-, Beveloid-, und Kegelrädern [2]

2 Konstruktion: Einfluss des Konuswinkels

Bei der Auslegung von Beveloidverzahnungen wird in vielen Fällen eine Stirnradverzahnung als Ausgangspunkt gewählt, von der die Beveloidverzahnung abgeleitet wird. Es wird ein Achskreuzwinkel vorgegeben, der dann in die Konuswinkel der beiden Zahnräder aufgeteilt wird.

In **Bild 2** sind die Verzahnungsdaten eines Beveloidradsatzes mit einem Achskreuzwinkel von $\Sigma = 3{,}6°$ aufgelistet. Der Konuswinkel von Rad 1 wird zu $\theta_1 = 0°$ gesetzt und die Achskreuzung nur durch Aufbringen des Konuswinkels auf Rad 2 realisiert. Dieser wird im ersten Schritt gleich dem Achskreuzwinkel Σ gesetzt, sodass sich an Rad 2 der Konuswinkel $\theta_2 = 3{,}6°$ ergibt. Weitere Größen, wie die Achsabstand im Achskreuzpunkt und die Einbauabstände werden nach [2] berechnet.

Das Resultat dieser Auslegung ist eine Verzahnung, bei der sich beim lastfreien Abwälzen das Tragbild im mittleren rechten Teil von Bild 2 ergibt. Dargestellt ist die Umrandung der Zahnflanke und die farbliche Markierung der Stellen der Zahnflanke, die mit dem Gegenzahn in Kontakt treten. Das dargestellte Tragbild liegt nicht mittig auf der Zahnflanke. Bei hohen Lasten kann es so zu einem Tragen an der Kante des Zahns

führen, was in der Regel zu einer geringen Lebensdauer und häufig zu einem erhöhten Geräuschverhalten führt.

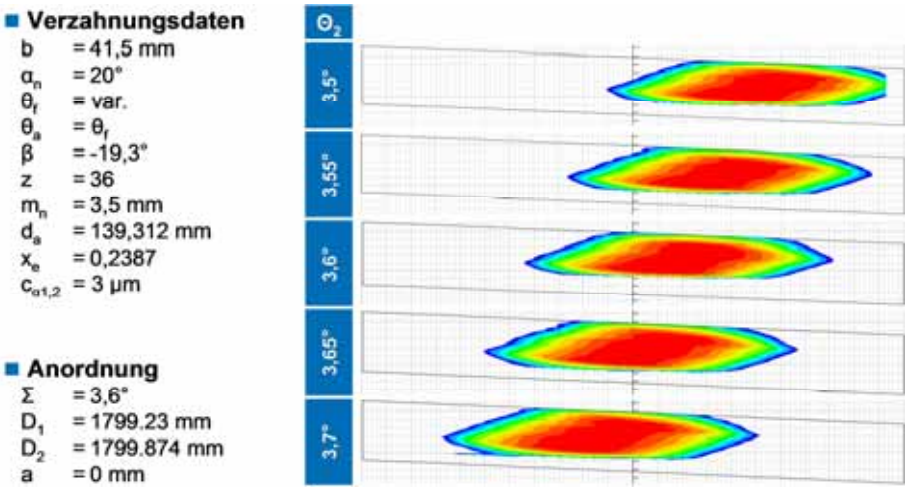


Bild 2: Einfluss des Konuswinkels θ_2 auf die Tragbildlage einer Beveloidradpaarung

Um das Tragbild in die Mitte der Zahnflanke zu verlagern existieren nach [4] verschiedene Verfahren. Eines ist eine Variation des Konuswinkels, wie sie in Bild 2 vorgenommen wurde. Es ist zu erkennen, dass mit einer Veränderung des Konuswinkels eine Verlagerung des Tragbildes einhergeht. Bei $\theta_2 = 3{,}65°$ liegt das Tragbild mittig auf der Zahnflanke. Bei einer weiteren Erhöhung wandert es in die Richtung der Ferse des Beveloidrads. Daher wird im Folgenden die Verzahnung mit dem Konuswinkel von $\theta_2 = 3{,}65°$ weiterverwendet.

3 Fertigung: Einfluss der Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$

Die Toleranzen und Abweichungen der Zahnflanken von Stirnrädern sind in DIN 3961 und DIN 3962 genormt [6], [7]. Eine Abweichung, die auch bei Beveloids gebräuchlich ist, ist die Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$. Diese entsteht bei der Herstellung beispielsweise durch Abweichungen in der Kinematik der Wälzschleifmaschine oder wird bewusst als Korrektur durch eine Zusatzdrehung des Werkstücks im Wälzschleifprozess aufgebracht.

Der Einfluss der Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$ auf die Tragbildlage der Beveloidverzahnung ist rechts in **Bild 3** dargestellt. Die Zahnflanke in der Mitte stellt die

abweichungsfreie Variante dar. In den beiden oberen Varianten wurde eine negative Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$ aufgebracht, in den unteren Varianten wurde eine positive Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$ gewählt.

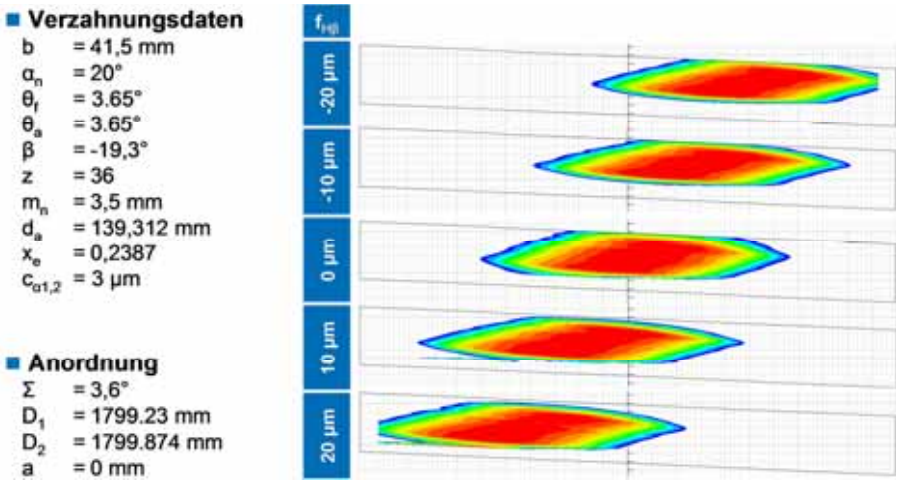


Bild 3: Einfluss der Flankenlinienwinkelabweichung $f_{h\beta}$ auf die Tragbildlage einer Beveloidradpaarung

Es ist zu beobachten, dass sich das Tragbild auch durch eine Veränderung der Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$ zur Seite der Verzahnung verlagert. Somit kann durch eine Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$ eine ähnliche Veränderung des Einsatzverhaltens wie durch die Veränderung des Konuswinkels θ entstehen.

4 Montage: Einfluss des Achskreuzwinkels Σ

Fehler in der Montage können zu einer Abweichung des Achskreuzwinkels Σ von seinem Sollwert führen. Der Einfluss der Abweichung des Achskreuzwinkels Σ auf die Tragbildlage ist rechts in **Bild 4** dargestellt. Die Tragbildlage beim vorgegebenen Achskreuzwinkel von Σ = 3,6° ist im mittleren Teil dargestellt. Ausgehend von dieser Vorgabe werden Abweichungen des Achskreuzwinkels Σ vorgenommen. Über der vorgegebenen Variante sind die Tragbilder bei einem verringerten Achskreuzwinkel Σ dargestellt. Es ist eine Verlagerung des Tragbildes zur Ferse der Beveloidverzahnung zu beobachten. Unterhalb der vorgegebenen Variante sind die Tragbilder bei einem erhöhten Achskreuzwinkel Σ dargestellt. Hier verlagert sich das Tragbild zur Ferse.

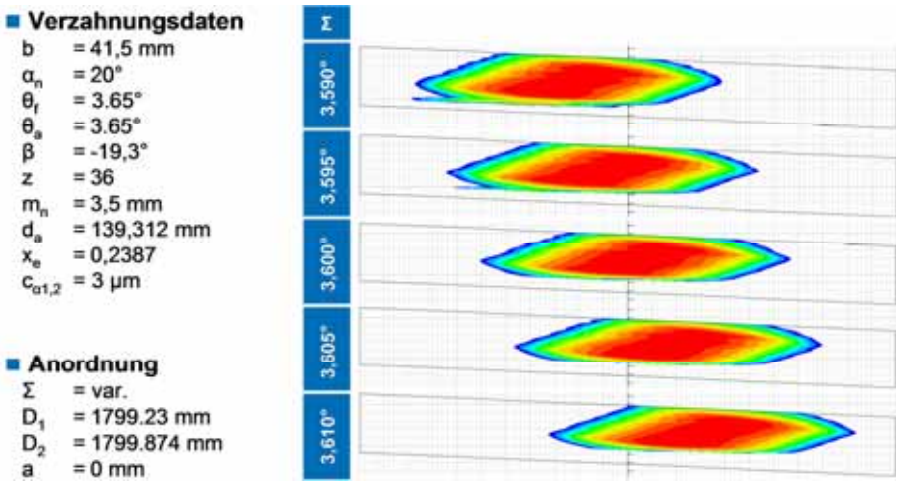


Bild 4: Einfluss des Achskreuzwinkels Σ auf die Tragbildlage einer Beveloidradpaarung

Auch für die Veränderung des Achskreuzwinkels Σ ist eine ähnliche Veränderung des Einsatzverhaltens wie für die Veränderung der Flankenlinienwinkelabweichung $f_{H\beta}$ oder durch die Veränderung des Konuswinkels θ_2 zu beobachten.

5 Konstruktion, Fertigung und Montage von Beveloids

Wie in den Kapiteln 2, 3 und 4 dargestellt ist, führen verschiedene Abweichungen in Konstruktion, Fertigung und Montage zu einer Verlagerung des Tragbildes zu einer der Seiten der Zahnflanke. Wenn keine geeigneten Überprüfungen der einzelnen Schritte vorgenommen werden, tritt dieses Phänomen erst im Einsatz des Getriebes auf. Das Auffinden und Abstellen der Ursache in dieser Phase ist sehr aufwendig und führt zu Verzögerungen und hohen Kosten.

Eine Methode, mit der diese Abweichungen schon im Entwicklungsprozess ermittelt werden können und somit schon zu einem frühen Zeitpunkt vermieden werden, ist in **Bild 5** dargestellt. Die Methode basiert auf einer Auslegung der Verzahnung unter Zuhilfenahme von Fertigungssimulation und Zahnkontaktanalyse.

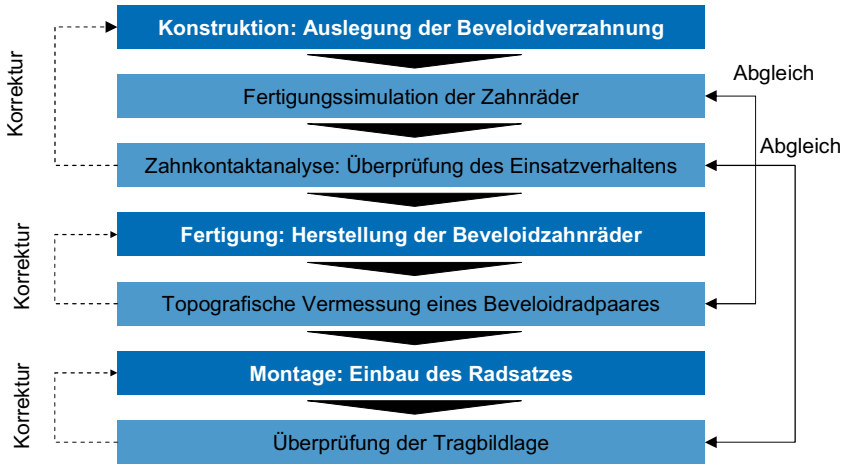


Bild 5: Vorgehen zur Konstruktion, Fertigung und Montage von Beveloids

Die Verzahnungsdaten der Beveloidradpaarung werden durch die Konstruktion vorgegeben. Mit der Fertigungssimulation werden aus den Verzahnungsdaten 3D-Modelle der Zahnflanken inklusive der Zahnfußgeometrie erstellt. Diese werden in das Zahnkontaktanalyseprogramm eingelesen und analysiert. Tritt ein nicht gewünschtes Einsatzverhalten auf, werden die Grunddaten angepasst, bis die Ergebnisse der Zahnkontaktanalyse dem gewünschten Einsatzverhalten entsprechen. Hierzu können verschiedene systematische Verfahren angewandt werden [2]. Die anschließende Auslegung der Mikrogeometrie kann durch eine Variationsrechnung geschehen. Die Variationsrechnung wurde bereits auf dem 8. gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik 2010 für Stirnräder vorgestellt [8].

Mit den aus der Konstruktion festgelegten Verzahnungsdaten werden Prototypen der Zahnräder gefertigt. Hier ist sicherzustellen, dass die gefertigten Zahnräder den 3D-Modellen der Fertigungssimulation entsprechen. Nur so kann sichergestellt werden, dass das Einsatzverhalten im Getriebe den Ergebnissen der Zahnkontaktanalyse entspricht. Dies kann durch eine Vermessung der Zahnräder gegen das in der Fertigungssimulation erstellte 3D-Modell des Zahnrades geschehen. Treten in den Vermessungen Abweichungen auf, so ist der Fertigungsprozess zu korrigieren.

Stimmen die gefertigten Zahnräder mit den 3D-Modellen der Fertigungssimulation hinreichend gut überein, können diese ins Getriebe eingebaut und getestet werden. Weicht in diesen Tests die Tragbildlage zu sehr von der in der Zahnkontaktanalyse berechneten Tragbildlage ab, ist die Einbausituation zu überprüfen und zu korrigieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht werden Auswirkungen von Fehlern und Abweichungen in Konstruktion, Fertigung und Montage von Beveloids dargestellt und dass diese Fehler und Abweichungen zu vergleichbaren Veränderungen im Einsatzverhalten führen und somit das Erkennen und Abstellen von Fehlern und Abweichungen erschwert ist. Es wird eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe diese Fehler bereits im Auslegungsprozess ausfindig gemacht und korrigiert werden können. Diese Methode basiert auf der Fertigungssimulation und Zahnkontaktanalyse von Zahnrädern mit den Programmen GearGenerator und ZaKo3D.

7 Literatur

[1] Brecher, C.; Gorgels, C.; Röthlingshöfer, T.: *Manufacturing simulation of beveloid gears for the use in a general tooth contact analysis software*, Production Engineering - Research and Development, Volume 3, Number 1, 2008, S. 103 - S. 109

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

[3] Brecher, C.; Weck, M.: *Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005

[4] Wagner, M.: Beitrag zur geometrischen Auslegung von Stirnradpaaren mit kleinen Achskreuzungswinkeln. Dissertation, Universität Stuttgart, 1993

[5] Brecher, C.; Gorgels, C.; Röthlingshöfer, T.: Simulation zur Unterstützung der Produktentwicklung von Beveloidverzahnungen. In: Vernetzte Produktentwicklung: Methoden und Werkzeugkopplung; 7. gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, 08.-09.10.2009, Universität Bayreuth, 2009

[6] DIN 3961 Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Grundlagen, Berlin, Beuth Verlag, 1978

[7] DIN 3962 *Toleranzen für Stirnradverzahnungen* Berlin, Beuth Verlag, 1978

[8] Brecher, C.; Klocke, F.; Gorgels, C.; Löpenhaus, C.; Hardjosuwito, A.: *Simulative Methode zur Optimierung der Verzahnungstolerierung nach DIN 3961/ISO 1328.* In: 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik - KT 2010 - Kolloquium Konstruktionstechnik, Barleben, Docupoint Verlag GmbH, 2010

Experimentelle Untersuchungen zum maximal übertragbaren Drehmoment von hydraulischen Spannelementen in Verwendung als reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindung

Dipl.-Ing. Enrico Kloß

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

Inhalt: *Inhalt dieses Beitrags ist die experimentelle Erprobung von hydraulischen Spannelementen. Untersucht wird das maximal übertragbare Drehmoment von Hohlmantelspannbuchsen. Hierfür wurde ein Versuchsstandkonzept umgesetzt, welches auf der Verwendung von synchronisierten Hydraulikzylindern basiert. Auf diesem Teststand wurden bereits eine Reihe von Prototypen erprobt. Ergebnisse dieser Versuchsreihen werden hier dokumentiert und bilden den Grundstein für die Weiterentwicklung von hydraulischen Spannelementen.*

Abstract: *Experimental testing of hydraulic shaft bushings is the topic of this paper. The top transmitted torque of those machine elements has been investigated. The concept of the test rig bases on the use of synchronized hydraulic cylinders. First tests with several prototypes led to results documented in this paper. They will become the foundation for further development of hydraulic clamping elements.*

Stichwörter: *Versuchsstand, Hydraulik, Hohlmantelspannbuchse, Spannelement*

Keywords: *test rig, hydraulics, shaft bushing, clamping element*

1 Einleitung

Die hier thematisierten hydraulischen Spannbuchsen lehnen sich an die Lösung der schwedischen Firma ETP Transmission an. Der ETP-Express Spannsatz (vgl.Bild 1) ist eine intelligente Hybridlösung für die kraftschlüssige Verbindung von Wellen mit Naben. Ähnlich einem mechanischen Spannsatz besticht dieses Maschinenelement durch eine gute Zentrierung und relativ hohe übertragbare Drehmomente. Diese Leistungswerte werden kombiniert mit einer einfachen Montage der Verbindung. Das hydraulische Wirkprinzip ermöglicht die Verwendung einer einzelnen Druckschraube. Kombiniert mit einer guten Wiederverwendbarkeit machen diese Eigenschaften das Maschinenelement

zur ersten Wahl in wartungsintensiven Anwendungen mit einer hohen Anzahl von Wechseln.

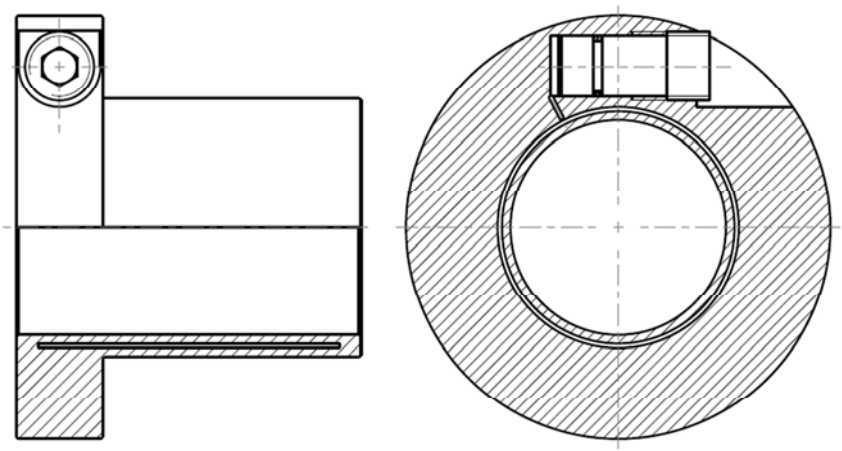


Bild 1: Skizze eines ETP-Express Spannsatzes

Die hydraulischen Spannelemente bestehen aus einer doppelwandigen Buchse mit einem minimalen Hohlraum. In diesem befindet sich ein Druckmedium, auf das über einen Kolben ein hydrostatischer Druck ausgeübt wird. Für die Berechnung der Kräfte gilt das Druckausbreitungsgesetz von Pascal [1]: „Wird auf ein vollständig umschlossenes Fluid an einer Stelle eine Pressung ausgeübt, pflanzt sich der Druck […] 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.“ Durch diesen Druckanstieg werden über das Druckmedium die Buchsenwände aufgeweitet und die Welle mit der Nabe kraftschlüssig verbunden.

Ziel eines laufenden Forschungsvorhabens ist es neuartige Welle-Nabe-Verbindungen zu erproben, welche dieses Wirkprinzip nutzen. Das übertragbare Drehmoment dieser Spannelemente experimentell zu ermitteln ist Aufgabe eines Prüfstands des Lehrstuhls Konstruktionstechnik/CAD an der Universität Rostock.

2 Konzept des Prüfstands

Für die Verwendung der Hohlmantelspannbuchsen als Welle-Nabe-Verbindung ist die relevante Kenngröße das übertragbare Drehmoment. Es muss für neue Produkte sowohl analytisch als auch experimentell ermittelt werden. Für die Validierung der rechnerisch ermittelten Werte wurde ein Prüfstand konzipiert. Er ermöglicht es das Übertragungsvermögen der Verbindungen zu ermitteln. Sowohl statische als auch dynamische Belastung kann simuliert werden. Ziel ist es eine Prüfwelle mit Hilfe des Spannelements kraftschlüssig mit einer Prüfnabe zu verbinden.

In der Konzeptphase des Prüfstands wurde diskutiert wie die Belastung auf die Verbindung aufgebracht werden kann. Der klassische Anwendungsfall ergibt sich aus der Aufgabe von Welle-Nabe-Verbindungen Drehbewegungen zu übertragen. Die erste Möglichkeit wäre es deshalb die Welle über einen Motor anzutreiben und die Nabe drehfest zu lagern. Problematisch ist im Fall der Rotation der Anschluss der Messtechnik (Dehnungsmessstreifen, …). Für die geplante Verkabelung ergibt sich eine Rotation des Prüflings als denkbar schlechteste Alternative.

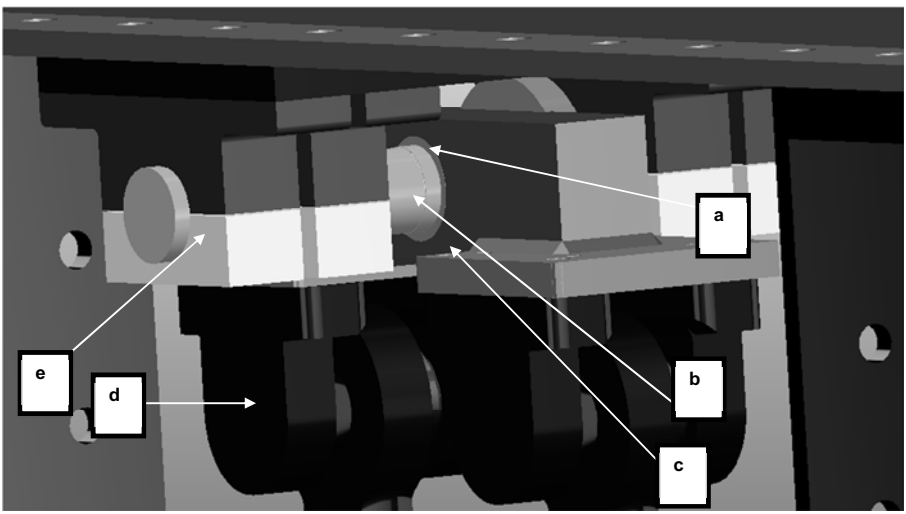


Bild 2: Versuchsaufbau als CAD-Modell; a-Prüfling(Hohlmantelspannbuchse), b-Prüfwelle, c-Schwinge als Prüfnabe, d-Hydraulikzylinder, e-Klemmverbindung

Weiterhin war es Aufgabe Störgrößen bestmöglich auszuschließen. Im Fall der Rotation handelt es sich dabei um Einflüsse aus Fliehkraft und Unwuchten. Beide Effekte führen zu ungleichmäßigen Differenzen in der Aufteilung des Fugendrucks über den Umfang der Spannhülse. Deshalb fiel die Entscheidung darauf statt der Rotation ein Schwingen um die Nulllage als Belastung zu definieren. Realisiert wurde diese Belastung durch eine bewegliche Nabe (Bild 2, c-Schwinge) und eine fest eingespannte Welle. Die Prüfwelle wurde zu diesem Zweck mit einer Klemmverbindung (Bild 2, e-Klemmverbindung) drehfest arretiert. Der Antrieb der Schwinge erfolgt über zwei synchronisierte Hydraulikzylinder der Firma MTS [Linearzylinder Modell 244.21-05 (Spezifikation siehe Tabelle 1) mit Gelenkfuß/-kopf 249.20]. Die Möglichkeit die Schwinge mit nur einem Aktor zu betreiben wurde ausgeschlossen, da bei einem einseitigen Hebelarm die resultierende Querkraftverteilung zu einer partiellen Überhöhung des Fugendrucks und damit zu einer ungenauen Messung führt. Die Steuerung der beiden Hydraulikzylinder ermöglicht eine synchrone Belastung des Versuchaufbaus während der dynamischen Versuche. Dadurch ist ein negativer Einfluss der Messergebnisse durch Biegebelastung der Schwinge ausgeschlossen. Die Hydraulikzylinder ermöglichen dynamische Versuche in einem breiten Frequenzspektrum. Die limitierende Größe ist dabei der Hubweg des Kolbens. Während bei 10 mm Kolbenweg nur eine Frequenz von 10 Hz realisierbar ist ermöglicht eine Reduzierung des Kolbenwegs auf einen Millimeter bereits eine Testfrequenz von 70-80 Hz, in Abhängigkeit von der zyklischen Kraft.

Tabelle 1: Spezifikation des verwendeten Hydraulikzylinders - MTS 244.21-05

Modellnummer	Nennkraft	Kolbenstangen-Durchmesser	Effektive Kolbenfläche	Gesamtdurchfluss (Ventil)	Förderstrom (Pumpe)
244.21	50.3 kN	69.9 mm	25.16 cm²	30.5 l/min	79.4 l/min

Ausgelegt wurde der Versuchsstand auf Spannbuchsen mit einem Innendurchmesser von 50 mm, einem Außendurchmesser von 60 mm und einer Fugenlänge von 40-70 mm. In diesem Größenbereich muss die Verbindung ein Moment von bis zu 3.000 Nm schlupffrei übertragen können.

3 Prüfzyklen für die Versuche

Für die dynamischen Versuche ist es notwendig Prüfzyklen zu definieren, welche Aussagen über die Betriebsfestigkeit der Hohlmantelspannbuchsen erlauben. Die kritischen Bereiche der einfachen Maschinenelemente sind offensichtlich die Stirnseiten des zylindrischen Wirkraums. Der Kraftfluss verläuft im Betrieb über diese Bereiche und verteilt sich ungleichmäßig auf beide Seiten. Der größte Teil des Drehmoments muss über die vom axialen Anschlag abgewandte Seite der Buchse übertragen werden (vgl. Bild 1). Gefertigt wird das hydraulische Spannelement durch konzentrisch angeordnete Rohrstücke, welche stirnseitig verschweißt werden. Diese Schweißnaht ist also der versagenskritische Bereich. Dieser Teil der Buchse wird zusätzlich durch Kerbwirkung geschwächt. Sie resultiert aus dem minimalen Hohlraum, der quasi als Nullspalt angesehen werden kann und durch den Innendruck geweitet wird.

Prüfzyklen für die handelsüblichen hydraulischen Hohlmantelspannbuchsen sind nicht in Erfahrung zu bringen. Da sie als Welle-Nabe-Verbindung verwendet werden, kann man sich an den Versuchen mit Passfedern oder Pressverbänden orientieren, um Aussagen über das Betriebsverhalten zu definieren. In der Fachliteratur sind Erfahrungswerte zu finden, auf denen für die ersten Versuchsreihen aufgebaut werden kann. Für die zu testenden Prototypen wurden, in Anlehnung an Dauerfestigkeitsversuche für Pressverbände [2], eine Prüffrequenz von $f = 10$ Hz und eine maximale Lastspielzahl von $N = 10^6$ als Versuchsrandbedingungen gewählt. Die beiden Hydraulikzylinder wurden kraftgesteuert betrieben. Die Synchronisation erfolgte über das Steuerprogramm, indem beide Zylinder über eine Rampenfunktion auf ihre maximalen Kräfte geregelt wurden ($F_1 = -F_2$) und anschließend synchron mit der definierten Sinusschwingung begannen. Das Moment, mit dem die Welle-Nabe-Verbindung belastet wurde, ergibt sich aus der Linearkraft der beiden Zylinder multipliziert mit dem Abstand der Achsen beider Kolben. Abbruchkriterium für einen Versuch ist das Überschreiten eines parametrisierten Kolbenwegs, denn diese Grenzwertüberschreitung ist Indiz für das Schlupfen der Verbindung und damit Anzeige von Materialversagen. Da die Schwinge (Prüfnabe) um die Achse der Spannbuchse schwingt, beschreiben die Enden eine Kreisbewegung und damit auch eine axiale Verschiebung. Ausgeglichen wird diese Bewegung durch die gelenkig gelagerten Köpfe der Hydraulikzylinder (vgl. Bild 3).

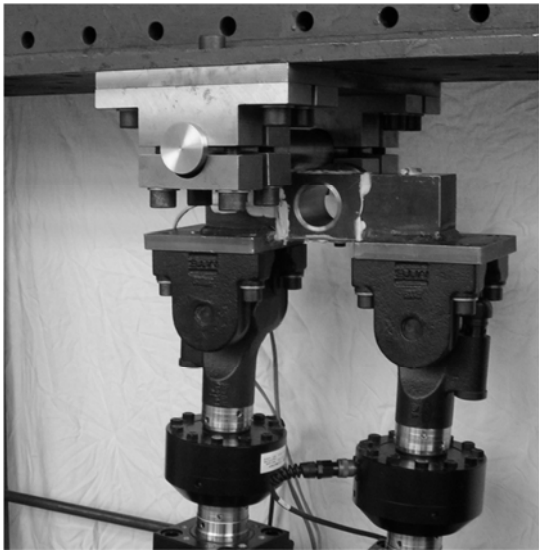


Bild 3: Versuchsaufbau - Gelenkköpfe zum Ausgleich der Axialverschiebung

4 Ergebnisse der Versuche

Für jeden Prototyp wurde mit der Ermittlung der statisch maximal übertragbaren Drehmomente begonnen. Hierfür wurden kurze Testzyklen definiert mit nur zehn Lastwechseln und einer Frequenz von zehn Hertz. Die Zylinderkräfte wurden sukzessiv erhöht bis man in den Bereich des Schlupfens gelangte. Auf diese Weise wurden Drehmomente bis 1.600 Nm übertragen. Dieser Wert konnte erhöht werden, indem das Anzugsmoment der Druckschraube an den Prototypen erhöht wurde. Für ein Anzugsmoment von 30 Nm war es möglich das statisch übertragbare Moment auf 2.000 Nm zu erhöhen.

Die dynamischen Prüfzyklen erfolgten im Anschluss an die statischen Tests. Die ersten Prototypen wurden mit dem aus der statischen Prüfung ermittelten Moment belastet. Die Frequenz wurde auf f = 10 Hz erhöht und eine zu erreichende Lastspielzahl von N = 250.000 Zyklen eingestellt. Erwartungsgemäß versagte der erste Prototyp vorzeitig. Nach bereits 55.000 Lastwechseln stellte sich an der versagenskritischen Stelle ein Materialschaden ein an dem das Druckmedium austrat (vgl. Bild 4, eingekreist).

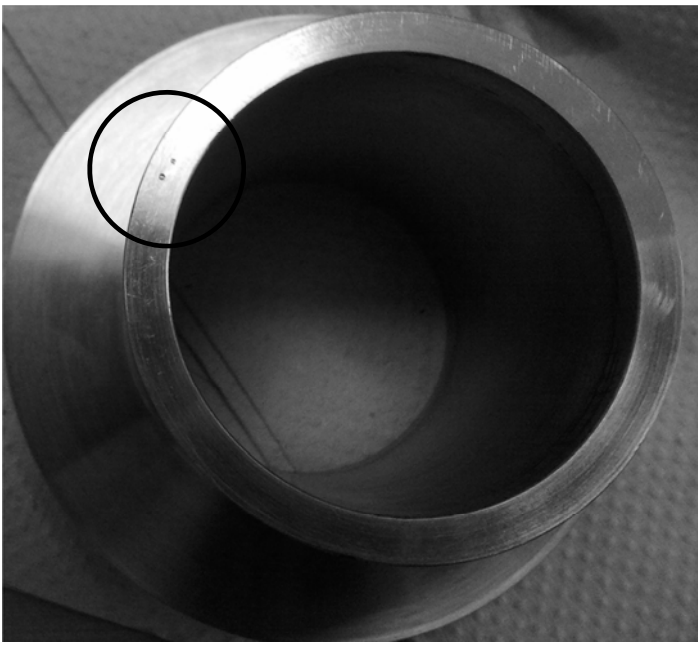


Bild 4: Schadensfall an einer Spannbuchse nach etwa 55.000 Lastwechseln

Deshalb wurden die Zylinderkräfte auf Werte festgelegt, die geringeren Drehmomenten entsprachen als bei den statischen Tests. Nach [3] wurde für wechselnde Belastung folgende Formel verwendet:

$$M_{dyn} = 0.5 \cdot M_{stat}$$

Die Anzahl der Lastwechsel wurde schrittweise erhöht und bis zum Zeitpunkt dieser Dokumentation wurden bereits Lastwechselzahlen von 250.000 Zyklen bei M_{dyn} = 1.000 Nm erreicht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es ist gelungen einen Versuchsstand zur Untersuchung des maximal übertragbaren Drehmoments von hydraulischen Spannelementen in Verwendung als reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindung aufzubauen und erfolgreich zu betreiben. Derzeit werden Versuchsreihen durchgeführt, in denen eine Gegenüberstellung des

Übertragungsvermögens von handelsüblichen Spannelementen und den Prototypen aus dem Forschungsvorhaben erfolgt. Diese dienen dazu die bisherigen Ergebnisse besser bewerten zu können und einen Einblick in das Leistungspotential der Neuentwicklungen erhalten zu können. Die Anpassung des Prüfstands an Baureihenversuche ist ein nächster, wichtiger Arbeitsschritt als Einstieg für eine spätere Markteinführung. Dabei ist die Adaption der Versuchsperipherie momentan nur über Neufertigung von Prüfwelle und Prüfnabe erreichbar. Wünschenswert wäre eine Komplettlösung, mit der verschiedene Spannelemente mit unterschiedlichem Innen- und Außendurchmesser prüfbar sind. Bemühungen zur Lösung dieser Anforderung erfolgen derzeit im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten.

Literatur

[1] Sigloch, Herbert: *Technische Fluidmechanik.* 7. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2009. – ISBN 978-3-642-03089-5

[2] Nowack: Dauer-, *Zeit- und Betriebsfestigkeit von Welle-Nabe-Verbindungen.* 12.Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, DVM (Deutscher Verband für Materialprüfung e.V., 1986

[3] Genoma GmbH: *ETP-Produktkatalog*, Hameln, 2011

Isolation der Verformungseffekte in Ritzelwellen: Durchbiegung, Torsion und Zahndeformation

Martin Neidnicht, Florian Nützel, Frank Rieg

Universität Bayreuth, Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften
Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth
Email: martin.neidnicht@uni-bayreuth.de; Internet: http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de

Inhalt: *In der Praxis sind technische Bauteile häufig komplexen Belastungsszenarien mit überlagerten Beanspruchungen ausgesetzt, die sich in einer superponierten Bauteilreaktion niederschlagen. Am Beispiel von Ritzelwellen, die insbesondere im Windenergieumfeld enormen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, wird im vorliegenden Beitrag ein Verfahren hergeleitet, welches zur Auflösung der resultierenden Einzeleffekte Durchbiegung, Torsion und Zahndeformation dient. Diese Synthese der Deformationsanteile wird durch sukzessive aufeinander aufbauende Modellierungen von Finite-Elemente-Analysen (FEA) sowie durch konsequente Anwendung des Superpositionsprinzips erreicht. Sie kann in der Folge beispielsweise zu einer Zahnkontaktdefinition mit verbesserter Genauigkeit genutzt werden. Die vorgestellte Vorgehensweise wurde mit dem FEA-Programm Z88 Aurora durchgeführt und soll im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) systematisch zur Anwendung gebracht werden.*

Abstract: *In practice, often technical components are exposed to complex stress scenarios with superimposed loads, which are reflected by combined reactions, too. Using the example of the pinion shaft, which is charged especially in the wind energy environment with enormous mechanical stresses, in this paper a method is derived, which is used to resolve the resulting individual effects deflection, torsion and tooth deformation. This synthesis of the deformation components is achieved by successively modeling of finite element analysis (FEA) and rigorous application of the superposition principle. The results can then be used for example to define a tooth contact with improved accuracy. The presented procedure was performed using the FEA program and Z88 Aurora and will be systematically applied as a part of a research project of the German Research Association for Drive technology (FVA).*

Stichwörter: *Ritzelwelle, Windkraftgetriebe, Finite-Elemente-Analyse, komplexe Belastung, Zahnkontakt,*

Keywords: *Pinion shaft, wind power transmission, finite element analysis, complex loading, tooth contact*

1 Einleitung

Aufgrund der kombinierten Funktion von Ritzelwellen zur Drehmomentübertragung und -Wandlung, ergibt sich eine ebenfalls überlagerte und im Vergleich zu einfacheren Verzahnungen komplexere Belastungsreaktion. Infolge des Zahneingriffs sowie der Lagerung kommt es zu einer Superposition der elastischen Wellenverformungen mit Deformationen im Zahnkontaktbereich. Insbesondere bei Bauteilen mit großen Abmessungen, wie sie beispielsweise im Windenergieanlagen [3,4] zum Einsatz kommen, sind Effekte wie Durchbiegung und Torsion signifikant im oder über dem Einflussbereich der Zahnverformung zu erwarten und somit nicht vernachlässigbar.

Diese Tatsache macht eine Analyse mit immanenter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen notwendig. Die prinzipielle Unabhängigkeit der Verformungsergebisse von Art und Herkunft des hervorrufenden Effektes macht die Finite-Elemente-Analyse (FEA) zu einem geeigneten Werkzeug hierfür. Um trotz der überlagerten Gesamtverformung, eine Aussage darüber treffen zu können, welche konstruktiven Maßnahmen zur Weiterentwicklung ergriffen werden müssen, ist eine detaillierte Kenntnis der Einzelreaktionen wie Wellendurchbiegung, -torsion bzw. den lokalen Verformungen im Zahnkontaktbereich nötig. So wird beispielsweise die Kontaktdefinition im Verzahnungsbereich erst durch zuverlässige Kenntnis von Verlagerung und Deformation der Zahnflanken möglich. Auch gegebenenfalls zu berücksichtigende Schiefstellungen der Lager können erst durch Isolation der Verkippung des Wellenquerschnitts an den Lagerstellen zur Auslegung verwendet werden.

Im vorgelegten Beitrag wird aufgezeigt, wie sich durch Kombination geeigneter FEA-Modellierungen die zunächst überlagerten Effekte voneinander trennen lassen. Mit Hilfe der vorgestellten Vorgehensweise können die Deformationen jedes Punktes der Ritzelwellengeometrie bzgl. Herkunft zugeordnet werden.

Bild 1 zeigt ein Beispielbauteil, das einer Planetenritzelwelle eines Windanlagen-getriebes [3] nachempfunden wurde. Das antreibende Drehmoment wirkt auf die mittige, breite Verzahnung; der Abtrieb erfolgt am zweiten Zahnrad um 180° bzgl. Drehachse versetzt. Die unter Last zu erwartende starke Lageänderung der Verzahnungsbereiche infolge der Wellendurchbiegung und -Torsion (vgl. Bild 5) macht deutlich, dass diese elastischen Deformationen des Verzahnungsumfeldes bei der Auslegung quantifiziert und berücksichtigt werden müssen.

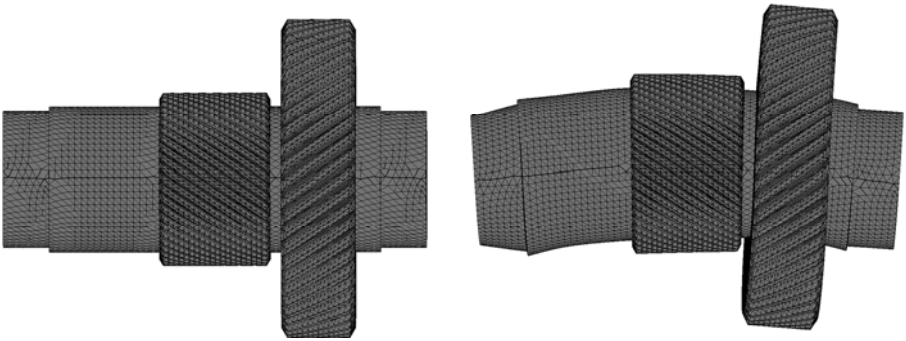


Bild 1: FE-Netz einer Planetenritzelwelle im Originalzustand (links) und infolge der Belastung elastisch verformt und überzeichnet (rechts); Festlager links, Loslager rechts.

2 Theoretische Grundlagen

Eine grundlegende Annahme von Berechnungsverfahren Hooke'scher Elastizität in der technischen Mechanik ist das sogenannte Superpositionsprinzip. Hierauf basierende Rechenvorschriften bilden gleichermaßen die Grundlage von analytischer Balkentheorie [6] sowie auch der linearen, strukturmechanischen FEA. So lässt sich im Falle linearer Elastizität die Suche nach einer energieminimierenden Lösung der FE-Variationsrechnung auf ein lineares Gleichungssystem der Form (1) zurückführen [1,2].

$$K \cdot u_{ges} = F_{ges} \Leftrightarrow K \cdot \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{1}$$

Hierbei seien mit $\boldsymbol{F_i}$ Einzellasten (insbes. Zahneingriffskräfte) gekennzeichnet, die auf die Ritzelwelle mit Bauteilsteifigkeit $\boldsymbol{K}$ wirken. Aufgrund der Linearität lässt sich analog auch die Deformation $\boldsymbol{u_{ges}}$ als Summe der von Einzelverformungen $\boldsymbol{u_i}$ darstellen. Definitionsgemäß ist wie in (2) sichergestellt, dass die Vektoren $\boldsymbol{u_i}$ die jeweiligen Lösungsvektoren der Einzel-Gleichungssysteme mit rechter Seite $\boldsymbol{F_i}$ sind.

$$\sum_{i=1}^{n} u_i = K^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} F_i \Rightarrow u_{ges} = \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} K_i^{-1} \cdot F_i \tag{2}$$

Doch nicht nur äußere Kräfte $\boldsymbol{F_i}$ haben einen Einfluss auf die Gestalt des deformierten Bauteils; auch Fixierungen durch Lagerungen müssen berücksichtigt werden und finden sich innerhalb der Steifigkeitsmatrix wieder. Die somit potentiell je Lastfall unterschiedlichen Matrizen $\boldsymbol{K_i}$ müssen demnach ebenfalls in die Superposition einbezogen werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise ist es folglich möglich, die FE-

Knotentransformationen unter Last bzgl. vordefinierter Lastfälle aufzuspalten. Im nächsten Schritt sollen die muss dafür Sorge getragen werden, dass die Teildeformationen tatsächlich eine technische Repräsentation widerspiegeln. Hierzu werden ausgehend von Bauteileigenschaften und Belastungsszenario verschiedene Modellierungen der Randbedingungen formuliert, die im Falle der Ritzelwelle eine Trennung zwischen Biegungs-, Torsions- und Zahneingriffsdeformationen erlauben.

3 Randbedingungs-Formulierung zur Isolation der Verformungseffekte

Ausgangsbasis jeder Modellierung des betrachteten Lastfalls ist eine möglichst realitätsnahe Widergabe der Lagerstellen und Krafteingriffe aus dem Belastungsszenario. Für das Beispiel aus Bild 1 wurden etwa die Lagerungen an den beiden Wellenenden durch Multi-Point-Contraints (MPC's, vgl. [2]) modelliert, die eine axiale Rotation bei gleichzeitiger Fixierung radialer Deformationen erlauben. Zugunsten der statischen Bestimmtheit wurde die Verzahnung des Stirnrades im Eingriffsbereich radial fixiert, die gesamte Drehmomentdifferenz wirkt dann im Eingriffsfeld der breiten Verzahnung. Diese Randbedingungen charakterisieren gemeinsam die Modellierungsvariante 1, welche Torsion (T), Biegung (B) und Zahndeformationen (Z) erlaubt.

Randbedingung	FE-Repräsentation	Variante 1 (**T + B + Z**)	Variante 2 (**T + Z**)	Variante 3 (**Z**)
Lager links	Einzel-MPC zur Drehachse	X	X	X
Lager rechts	Einzel-MPC zur Drehachse	X	X	X
Fixierung der Torsion: Abtrieb	Radialfixierung im Zahneingriff	X	X	X
Momenteinleitung: Antrieb	Normalkraft im Zahneingriff	X	X	X
Keine Durchbiegung der Welle	Mehrere MPC's zur Drehachse		X	X
Keine Torsion der Welle	Radiale Fixierung des Innendurchmessers			X

Bild 2: Übersicht der verwendeten Randbedingungen für die Varianten 1 - 3

3.1 Erweiterungen des ursprünglichen Szenarios

Zur nachträglichen Verwertung des in (2) beschriebenen Zusammenhangs werden nun zwei weitere Modellierungen formuliert, deren resultierende FE-Knotenverschiebungen durch wechselseitige Subtraktion die Synthese der Einzeleffekte (T, B, Z) ermöglichen. Für Variante 2 werden zusätzlich alle Innendurchmesser in ihrer Lage sowie ihrer konzentrischen Form fixiert, um den Effekt der Biegung von Wellenquerschnitt und Drehachse (B) zu eliminieren. Dies wird durch quasi-starre MPC's zwischen jedem der FE-Knoten auf der Welleninnenseite und Punkten auf der Drehachse erreicht.

Bei Variante 3 werden alle vorgenannten Randbedingungen schließlich um eine vollständige Fixierung des Innendurchmessers erweitert, welche zusätzlich Drehungen der Querschnitte (T) ausschließt. Alle verbleibenden Deformationen werden sämtlich als Zahnverformung (Z) deklariert, auch wenn sie abseits vom Verzahnungsbereich auftreten können. Diese erweiterte Definition erlaubt folglich eine Rückführung von Verformungen im Auslauf- und Anschlussbereich von Verzahnungen auf die hervorrufenden Eingriffskräfte.

3.2 Überlagerung und Synthese der Einzelverformungsanteile

Sobald die aus den beschrieben Modellierungen resultierenden FE-Knotenverschiebungen $\boldsymbol{u}^{BTZ}$, $\boldsymbol{u}^{TZ}$ und $\boldsymbol{u}^{Z}$ ermittelt sind, können durch deren Kombination auch die verbleibenden Einzeleffekte Torsion $\boldsymbol{u}^{T}$ und Biegung $\boldsymbol{u}^{B}$ ermittelt werden. So gilt für jeden Knoten *i* in den drei Freiheitsgraden *j* = 1, 2, 3:

$$u_{i,j}^{B} = u_{i,j}^{BTZ} - u_{i,j}^{TZ} \quad \text{sowie} \quad u_{i,j}^{T} = u_{i,j}^{TZ} - u_{i,j}^{Z} \quad . \tag{3}$$

Bild 3 zeigt den Deformationsbetrag von FE-Knoten entlang einer Messlinie, die sich über die komplette Wellenlänge erstreckt. Diese befindet sich an jeder z-Koordinate am äußersten Bauteilradius, was sich insbesondere im Bereich des Stirnrades (75 ≤ z ≤ 150) in einer vergleichsweise starken Biegungskomponente niederschlägt. Infolge des größeren Radius hat dort die berechnete Verkippung des Stirnschnittes eine dominante Verschiebung in Achsrichtung zufolge. Die ebenfalls in diesem Intervall wirksame Fixierung in Radialrichtung spiegelt sich in einem lokalen Torsionsverlauf nahe null wieder. Die Zahnverformung im Eingriffsfeld der mittigen Verzahnung (-60 ≤ z ≤ 60) kann ebenfalls beobachtet werden.

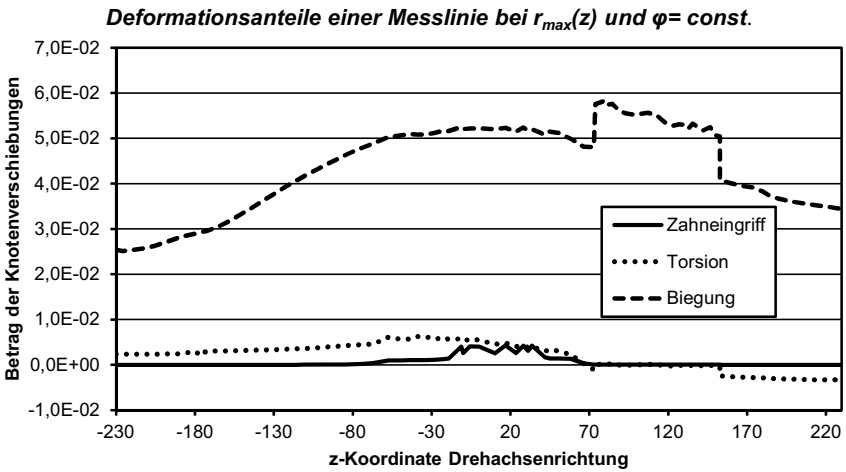


Bild 3: Anteile der Deformationseffekte entlang einer FE-Knotenkette am Wellenaußenrand

Generell trägt in dem betrachteten Beispiel die Verkippung und Ovalisierung der Wellenquerschnitte am deutlichsten zur Verformung durch Biegung bei. Bild 4 illustriert, wie stark die Abweichungen zur ursprünglich kreisförmigen Gestalt sind.

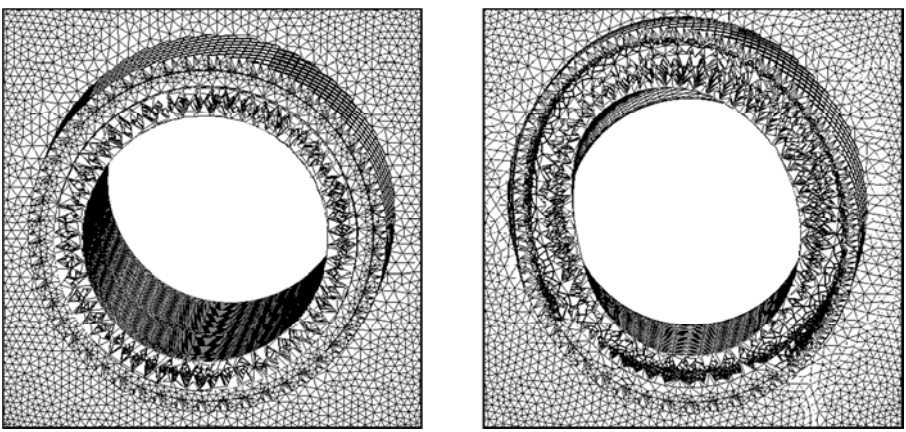


Bild 4: Ovalisierung und Verkippung (rechts) der Beispielritzelwelle
am vormals konzentrischen (links) Innendurchmesser

Da auch die Wellenquerschnitte an den Lagerungen eine Schrägstellung erfahren und die Biegungsverformung an den Messpunkten auf dem Außendurchmesser dargestellt ist, schneidet der Biegungsverlauf nicht bei null. Dennoch kann das Festlager (links, -230 ≤ z ≤ -180) anhand der kleineren Deformation vom Loslager unterschieden werden.

4 Praktische Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens

Von besonderer technischer Bedeutung ist wiederum die Überlagerung $\boldsymbol{u}^{BT}$ von Torsions- und Biegungsdeformationen. So kann diese lastabhängige Verlagerung der Gesamtwelle als Grundlage für eine exakte Kontaktdefinition im Verzahnungsbereich genutzt werden und die Abbildungsgenauigkeit – der in der Praxis häufig verwendeten – lastfreien Berührdefinition strak verbessern. Ein FVA-Forschungsvorhaben der Institute von Prof. Brecher (RWTH Aachen) und Prof. Rieg (Universität Bayreuth) behandelt diese Fragestellung in Verbindung mit dem Getriebe-Auslegungsprogramm STIRAK [5].

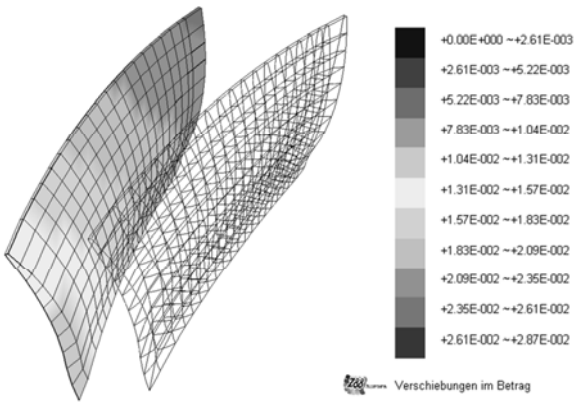


Bild 5: Lageabweichung einer Zahnflanke infolge von Durchbiegung und Torsion der Welle

Auch andere Methoden der Zahnkontaktanalyse verwenden im Interesse geringer Rechenzeit häufig lediglich lokal sehr begrenzte Bauteilausschnitte im Verzahnungsbereich. Für diese Methoden kann die Elastizität des Umfeldes ebenfalls als feste Verlagerung der vormals fixierten Schnittflächen berücksichtigt werden. So ist es möglich, den Simulationsumfang signifikant zu erweitern und die zur Auslegung bedeutsame Wälzsimulation erheblich praxisnäher zu gestalten.

Literatur

[1] Rieg, F.; Hackenschmidt, Reinhard; Finite-Elemente-Analyse für Ingenieure. 3. Aufl. München: Hanser 2009.

[2] Bathe, K.-J.; Finite-Elemente-Methoden. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 2002.

[3] Schutzrecht EP 1 318 329 A2 (11.06.2003). Winergy AG. Pr.: DE 10159973.

[4] Boiger, P.: Renk Aerogear – Planetengetriebe für wirtschaftliche Windenergie. Sonderdruck aus Wind Kraft Journal, 2009.

[5] Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) (Hrsg.): Programm FE-Stirnradkette 3.0. Frankfurt / Main: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA), 2003. – Benutzeranleitung

[6] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.; Technische Mechanik 2. Elastostatik. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1998.

3D-Verstärkung von Schiffspropellern in Carbon-Faser-Verbundbauweise durch Z-Pins

Steffen Bartke, Christian Kliewe

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Konstruktionstechnik / Leichtbau
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
Email: steffen.bartke@uni-rostock.de; Internet: http://www.leichtbau.uni-rostock.de

Inhalt: *Dieser Beitrag befasst sich mit der 3D-Verstärkung von FKV-Schiffspropellern mit stiftförmigen Elementen in Dickenrichtung (Z-Pins). Die Auswirkungen dieser Verstärkungsart auf die In-plane-Eigenschaften wie auch auf die interlaminare Festigkeit werden dargestellt. Für unterschiedliche Pinkonfigurationen (Durchmesser, Abstand) wurden die mechanischen Eigenschaften von Z-Pin verstärkten Laminaten untersucht. Die für die Auslegung des Propellers relevante Biege- und Schubsteifigkeit ist im Dreipunkt-Biegeversuch bzw. Plate-Twist-Versuch bestimmt worden. Der Einfluss der Pinverstärkung auf das Risswachstum nach Erstschaden wurde für Mode I (Rissöffnung) und Mode II (Risslängsscherung) ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Z-Pin-Verstärkung eine vielversprechende Technologie zur Verbesserung der Schadenstoleranz von CFK-Propellern darstellt.*

Abstract: *3D reinforcement of ship propellers in carbon-fiber composite construction by Z-pins*

This article deals with the 3D-FRP reinforcement of ship propellers with pin-like elements in the thickness direction (Z-pins). The effects of this kind of reinforcement on the in-plane-properties as well as on the interlaminar strength are shown. The mechanical properties of Z-pin reinforced laminates were investigated for different pin configurations (diameter, distance). The bending- and shear-modulus, which are relevant for the design of the propeller, were determined in three-point-bending- and plate-twist-test. The influence of Z-pin-reinforcement on crack growth after first loss was determined for mode I (crack opening) and Mode II (shear). The results show, that Z-pin-reinforcement is a promising technology to improve the damage tolerance of carbon fiber propellers.

Stichwörter: *Propeller, FKV, Z-Pin, Schadenstoleranz*

Keywords: *propeller, FRP, Z-pin, damage tolerance*

1 Einleitung

Die Verwendung von FKV (Faser-Kunststoff-Verbund) stellt eine Möglichkeit des Leichtbaus dar, weil die spezifische Festigkeit und Steifigkeit höher sind als bei

metallischen Werkstoffen. Die mechanischen Eigenschaften des Verbundes werden dabei maßgeblich durch die Faserorientierung bestimmt, wodurch die Möglichkeit besteht, die mechanischen Eigenschaften des Bauteils durch den Laminataufbau gezielt zu beeinflussen. Damit ist eine optimale Materialausnutzung möglich und darüber hinaus kann die Elastizität des Bauteils richtungsabhängig definiert werden.

Die genannten positiven Eigenschaften der FKV eröffnen immer weitere Anwendungsgebiete. Seit einigen Jahren werden auch Schiffspropeller in Faser-Verbund-Bauweise gefertigt. Neben verbesserten Schwingungs- und Dämpfungseigenschaften besteht der Hauptvorteil darin, über den Laminataufbau die Steifigkeit des Propellerblattes einzustellen. Durch eine lastabhängige Verformung kann somit gezielt die Propellerkennlinie und damit auch der Wirkungsgrad beeinflusst werden [1].

Am Propeller treten neben den hydrodynamischen Lasten auch Schlagbelastungen bei Kollisionen mit Treibgut oder Grundberührung auf. Diese Schlagbelastungen sind lokal begrenzt und beanspruchen das Material überwiegend quer zur Faserrichtung. Bedingt durch den schichtweisen Aufbau von FKV-Bauteilen ergibt sich eine flächige Faseranordnung ohne Fasern in Dickenrichtung. Daher werden die mechanischen Eigenschaften des Laminates in dieser Richtung im Wesentlichen vom Harz bestimmt und sind somit deutlich schlechter. Schon geringe Schlagbelastungen führen bereits zu Schäden im Laminat wie Faserbruch und Delaminationen.

Aus diesem Grund wurden verschiedene Konzepte zur Verbesserung der interlaminaren Eigenschaften entwickelt wie das Vernähen oder das Vernadeln von Laminaten. Beim Vernadeln werden stiftförmige Elemente in das noch nicht ausgehärtete Laminat eingebracht und sorgen dadurch für einen zusätzlichen Stoffschluss in Dickenrichtung (Z-Richtung). Für die mit Z-Pins vernadelten Bauteile konnte nachgewiesen werden, dass der Risswiderstand erhöht und die Delaminationsneigung reduziert ist. Deswegen wird die Technologie des Vernadelns bei crashgefährdeten Bauteilen von Kampf-Jets und Formel 1-Fahrzeugen eingesetzt [2]. Es ist zu erwarten, dass der Verstärkungseffekt durch den Einsatz von Z-Pins auch für CFK-Schiffspropeller die Schadenstoleranz verbessert.

2 Material und Methoden

Die Z-Pin-Technologie wurde für Laminate, die im Prepregverfahren hergestellt werden, entwickelt. Das Verfahren nutzt einen verlorenen Pinträger aus Schaum, welcher beim

Eindrücken der Pins zusammengepresst wird und ist auf Pindurchmesser bis 1 mm begrenzt. Die untersuchten CFK- Propeller werden im Formpressverfahren gefertigt. Speziell hierfür sind zwei neue Vernadelungsverfahren entwickelt worden. Im Gegensatz zu dem bekannten Prepreg/ Preform-Verfahren werden die Z-Pins mit einem Durchmesser bis zu 2 mm hierbei ohne einen Schaumträger gesetzt. Für die Propellerfertigung wird ein Setzwerkzeug eingesetzt, welches die Pins einzeln verarbeitet. Die Probekörperfertigung erfolgte mit wiederverwendbaren Matrizen im Harzüberschussverfahren, wobei die Pins in einem definierten Raster eingebracht werden (Bild). Unterschiedliche Pinkonfigurationen (Pindurchmesser und Pinabstand) sind mit verschiedenen Matrizen realisiert worden. Es wurden pinverstärkte Probekörper gefertigt mit Pindurchmesser 1 mm, 1,5 mm und 2 mm. Die Pindichte wurde variiert mit 0,35 %, 0,79 %, 1,4 % und 3,14 %. Für alle Konfigurationen wurden 6 Probekörper mit unidirektionalem Laminataufbau (Kohlefasergelege L(X) 440-C10 von Devold AMT, Harzsystem EP 2150 / EH 2294 von WELA) gefertigt, die einen rechnerischen Faservolumengehalt von 55-60 % aufweisen.

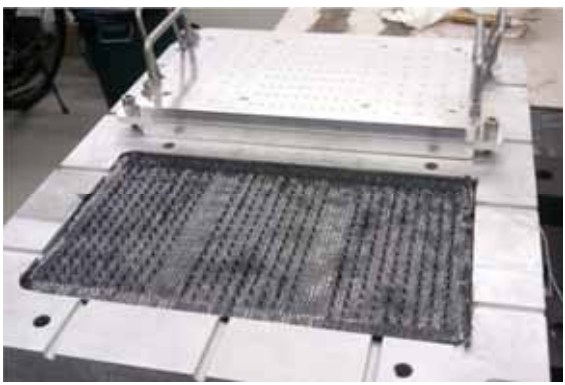


Bild 1: Vernadelungsverfahren mit wiederverwendbaren Matrizen

Die Bestimmung des E-Moduls in Faserrichtung erfolgte im 3-Punkt-Biegeversuch nach EN ISO 14125. Die Breite der Prüfkörper wurde auf 40 mm festgelegt, damit mindestens 2 Pinreihen im Prüfkörper enthalten sind. Das Verhältnis von Prüfkörperlänge zu dessen Dicke ist so gewählt worden, dass die Schubverformung bei dieser Prüfanordnung vernachlässigt werden kann. Die Berechnung des Biegemoduls erfolgt nach Formel (1).

$$E_1 = \frac{L^3}{4bh^3 * (\frac{\Delta F}{\Delta s})} \quad (1)$$

Der Schubmodul ist im Plate-Twist-Test nach EN ISO 15310 bestimmt worden. Dabei wird eine quadratische dünne Platte in einer diagonalen Auflager- und Lasteinleitungsanordnung verformt, wobei im Laminat ein reiner Schubspannungszustand über einen großen Plattenbereich erzeugt wird (Bild 2).

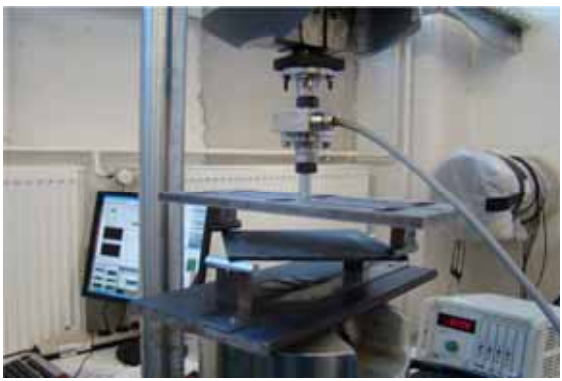


Bild 2: Plate-Twist-Versuch nach EN ISO 15310

Die Berechnung des Schubmoduls G_{12} erfolgt nach Formel (2).

$$G_{12} = \frac{3}{4} * \frac{m * l` * l`` * 0,822}{h^3} \quad \text{mit} \quad m = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} \quad (2)$$

Um den Einfluss der Z-Pins auf das Verhalten des Laminates bei Anriss und bei Rissfortschreitung beurteilen zu können, wurden Prüfkörper zur Bestimmung der Rissenergiefreisetzungsraten nach Mode I (ASD-STAN-5509) und nach Mode II (ASD-STAN 5510) untersucht. Im Mode I-Versuch wird das Fortschreiten des Risses infolge senkrecht zur Rissebene aufgebrachter Zugkräfte erfasst (Bild 3). Die Rissenergiefreisetzungsrate G_{IC} entspricht der Arbeit für das Aufreißen der Probe. Sie kann somit aus der eingeschlossenen Fläche A im Kraft-Weg-Diagramm sowie der Probenbreite b und der Rissfortschrittslänge a_f gemäß Formel (3) berechnet werden.

$$\mathbf{G_{IC}} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{a_f} * \mathbf{b}} \tag{3}$$

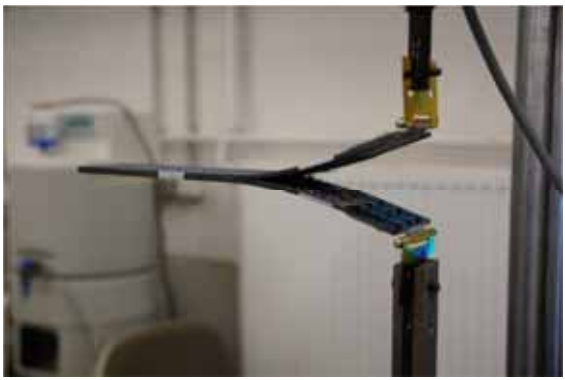


Bild 3: Ermittlung der Rissenergie G_{IC} nach ASD-STAN-5509

Im Mode II-Versuch (Bild 4) wird mittels Dreipunktbiegung diejenige Kraft ermittelt, bei der das Risswachstum infolge von Schubkräften an der Rissspitze einsetzt. Die interlaminare Energiefreisetzungsrate G_{IIC} wird berechnet nach Formel (4).

$$\boldsymbol{G_{IIC}} = \frac{\mathbf{9} * \boldsymbol{F} * \boldsymbol{a}^{\mathbf{2}} * \boldsymbol{h}}{\mathbf{2} * \boldsymbol{b} * (\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{4}} * \boldsymbol{L}^{\mathbf{3}} + \mathbf{3} * \boldsymbol{a}^{\mathbf{3}})} \tag{4}$$

Bild 4: Ermittlung der Rissenergie G_{IIC} nach ASD-STAN-5510

3 Ergebnisse

Mit zunehmender Pindichte sowie zunehmendem Pindurchmesser ist der E-Modul in Faserrichtung nachweisbar reduziert. Ausgehend von der unverstärkten Referenzprobe mit einem E-Modul von 110,5 GPa fällt der E-Modul für das Laminat mit Pins im Durchmesser 2 mm und einer Pindichte von 1,4% bereits auf 100 GPa ab. Bei einer Pindichte von 3,14% wurde ein Abfall um 22% auf 90,7 GPa ermittelt. Bei einer Pindichte von 1,4 % beträgt der Unterschied von 1 mm zu 2 mm Pindurchmesser ca. 3,7 GPa (Bild 5).

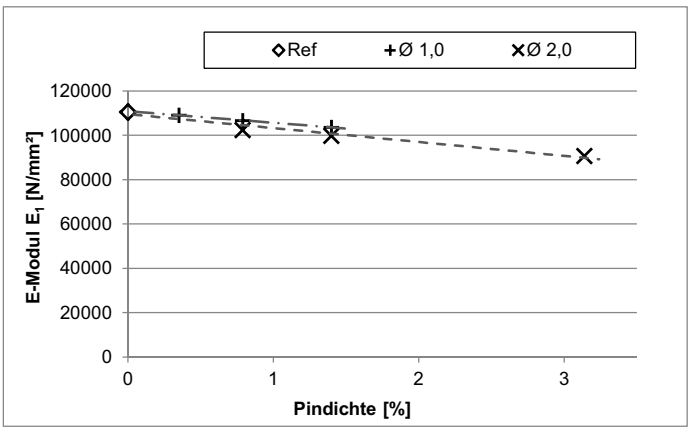


Bild 5: Einfluss der Z-Pins auf den E-Modul E_1

Der Mittelwert des Schubmoduls G_{12} der Referenzproben liegt bei 4873 MPa. Alle gemessenen Werte der pinverstärkten Probekörper liegen im 95%-Konfidenzintervall der Referenzprobe von 4698 MPa bis 5050 MPa und unterscheiden sich somit nicht signifikant (Bild 6).

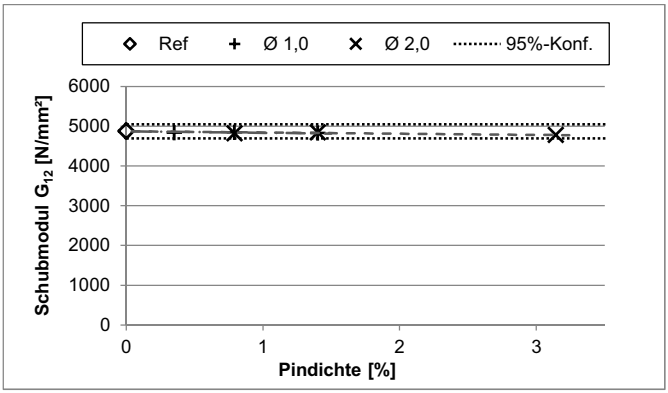


Bild 6: Einfluss der Z-Pins auf den Schub-Modul G_{xy}

Bild 7 zeigt an ausgewählten Probekörpern den typischen Kraft-Weg-Verlauf für den Mode I-Versuch. Zunächst steigt die Zugkraft nahezu linear mit dem Verfahrweg an. Nach Erreichen der Maximalkraft fällt die Kraft stufenförmig ab. Mit zunehmender Pindichte steigt die kritische Kraft für den Rissfortschritt an. Bei der hier betrachteten maximalen Pindichte von 1,4 % ist die kritische Kraft für das Weiterreißen der Probe um 26 % gegenüber der unverstärkten Probe gesteigert. Auch die Rissenergie steigt mit der Pindichte. Bei einer Pindichte von 1,4 % ist die Rissenergie G_{IC} im Vergleich zur Referenzprobe um 76 % erhöht.

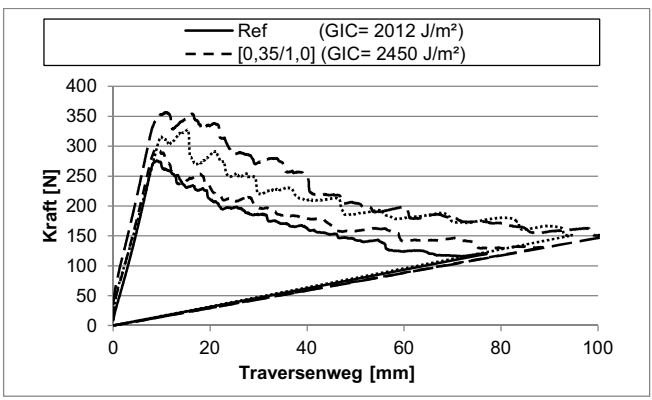


Bild 7: Kraft-Weg-Verläufe für ausgewählte Mode I Versuche

Bei den ModeII-Versuchen zeigt sich, dass die Z-Pins den interlaminaren Schub an der Rissspitze behindern, was sich in einer erhöhten Rissenergie G_{IIC} zeigt. Darüber hinaus ist aus den Kraft-Weg-Verläufen ersichtlich, dass für Proben gleicher Biegesteifigkeit die kritische Kraft für das Weiterreißen der Probe mit der Pindichte ansteigt. Die verstärkten Proben weisen eine Erhöhung der Rissenergie von maximal 32 % bei einer um 13 % gesteigerten kritischen Risskraft auf (Bild 8).

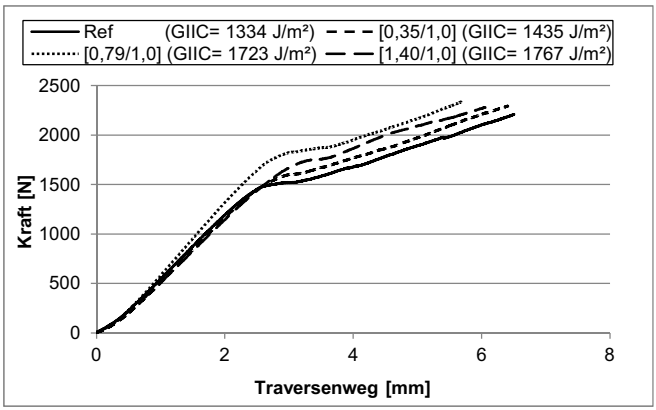


Bild 8: Kraft-Weg-Verläufe für ausgewählte Mode II Versuche

4 Diskussion

Die in theoretischen Betrachtungen [3] und experimentellen Versuchsreihen [4] bestimmte lineare Abhängigkeit des E-Moduls von der Pindichte und dem Pindurchmesser konnte für große Durchmesser bis 2 mm noch deutlicher nachgewiesen werden. Die Reduzierung des E-Moduls ist durch eine gesteigerte Inhomogenität des Laminataufbaus zu erklären, die aus einer erhöhten Faserwelligkeit, Fasereinzug sowie Faserbruch beim Einbringen der Z-Pins resultiert.

Ein Einfluss der Z-Pins auf den Schubmodul konnte nicht nachgewiesen werden, was durch Finite Elemente Analysen gestützt wird [3]. Die Inhomogenitäten im Faseraufbau infolge der Pins zeigen keinen Einfluss auf den Schubmodul G_{12}, da dieser überwiegend durch die Matrixeigenschaften dominiert wird. Durch die Verwendung von Kohlefaserpins

ist keine Erhöhung des Schubmoduls zu erwarten, da der Schubmodul G_{23} der Pins sich nur gering vom Schubmodul des umgebenden Laminates unterscheidet.

Die Versuche zur Bestimmung der Rissenergiefreisetzungsrate zeigen für beide Rissmodi auch für Pindurchmesser bis 2 mm einen deutlichen Verstärkungseffekt in Form einer gesteigerten Risskraft wie auch einer erhöhten Rissenergie. Dieser Verstärkungseffekt wurde für Pindurchmesser kleiner 1mm ebenfalls nachgewiesen [5]. Während bei den Mode I Versuchen der Rissfortschritt über eine Risslänge von ~100 mm und damit über mehrere Pinreihen untersucht wird, erfasst die untersuchte Rissfortschrittslänge bei den Mode II Versuchen mit ~15 mm maximal eine Pinreihe. Die Stufen im abfallenden Bereich der Kraft-Weg-Kurven der Mode I-Versuche weisen auf das Ausreißen der einzelnen Pinreihen hin, welche bei den verpinten Proben einen zusätzlichen Zusammenhalt der Laminatschichten bewirken. In den Kurven der Mode II Versuche wird der Verstärkungseffekt der einzelnen Pinreihen weniger deutlich, da die Pins hier einem kombinierten Versagensmechanismus (Ausreißen, Quer- und Längsschub) unterliegen.

Die durchgeführten Untersuchungen belegen den positiven Einfluss der Z-Pins auf das Anrissverhalten sowie das Risswachstum von CFK-Laminaten. Somit ist zu erwarten, dass die Schadenstoleranz von CFK-Propellern durch Z-Pins verbessert wird. Weiterführende Untersuchungen sind in Vorbereitung. So sollen Impact-Versuche auf die Laminatkante klären, inwieweit der Erstschaden durch Z-Pins begrenzt werden kann.

Literatur

[1] Dirk Büchler und L. Erdman, „Composite propeller new features and properties specific design and experiences“, in *Society of Naval Architects and Marine Engineers Propellers/Shafting 2006 Symposium*, Williamsburg, 2006.

[2] A. P. Mouritz, „Review of z-pinned composite laminates“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 38, Nr. 12, S. 2383-2397, 2007.

[3] L. C. Dickinson, G. L. Farley, und M. K. Hinders, „Prediction of effective three-dimensional elastic constants of translaminar reinforced composites“, *Journal of Composite Materials*, Bd. 33, Nr. 11, S. 1002-1029, 1999.

[4] P. Chang, A. P. Mouritz, und B. N. Cox, „Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 37, Nr. 10, S. 1501-1513, 2006.

[5] D. D. R. Cartié, M. Troulis, und I. K. Partridge, „Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates“, *Composites Science and Technology*, Bd. 66, Nr. 6, S. 855-861, 2006.

Ansätze zur Simulation der Vorgänge in einer Wirbelschicht zur Ermittlung der mechanischen und thermischen Lasten als Grundlage für die Konstruktion Stationärer Wirbelschichtfeuerungsanlagen kleiner Leistung

Carsten Böhme, Klaus Brökel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
Email: carsten.boehme@uni-rostock.de; Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Die Forschung zur Simulation von Wirbelschichten beschäftigt sich regelmäßig mit der Beschreibung aus Sicht der Verfahrenstechnik, zielt also auf das Verständnis des Verbrennungs- oder Verarbeitungsprozesses. Für die Konstruktion der im Projekt VESTA weiterentwickelten stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage kleiner Leistung sind hingegen die durch den Prozess am Wirbelschichtreaktor hervorgerufenen thermischen und mechanischen Beanspruchungen von Interesse. Der Beitrag gibt einen Überblick zum Stand der Technik in der Simulation von Zweiphasenströmungen, entwickelt an Annahmen zu Lasten und Randbedingungen im Wirbelschichtreaktor und stellt die eigenen Ansätze zur vereinfachten, konstruktionsgerechten Simulation in Pro/MECHANICA vor.*

Abstract: *Research on the simulation of fluidized beds regularly uses an internal approach, i.e. will focus on understanding the fluidized bed process itself. In contrast, engineering of the fluidized bed combustion plant developed in project VESTA requires knowledge of thermal and mechanical stress induced by the process on the reactor vessel. The paper will give an overview on the simulation of two-phase-flow, develop assumptions on loads and boundary conditions in a fluidized bed reactor and show the principle of a simplified, design-oriented simulation in Pro/MECHANICA.*

Stichwörter: *Wirbelschichtfeuerung, thermische Belastung, mechanische Belastung, VESTA*

Keywords: *fluidized bed combustion, thermal load, mechanical load, VESTA*

1 Einleitung

Die aktuelle Forschung zur Simulation von Wirbelschichten beschäftigt sich regelmäßig mit der Beschreibung aus Sicht der Verfahrenstechnik, zielt also auf das Verständnis des Verbrennungs- oder Verarbeitungsprozesses.

Für die Konstruktion der im Projekt VESTA weiterentwickelten stationären Wirbelschichtfeuerungsanlage kleiner Leistung sind hingegen die Rückwirkungen des

Prozesses auf den Wirbelschichtreaktor von Interesse, da das Konstruktionsprinzip eine hohe Beanspruchung des Behältermaterials bedingt. Wünschenswert sind die Kenntnis der genauen Verteilung der thermischen Belastung durch die Verbrennung und der mechanischen Belastung aufgrund der Bewegung des Wirbelbetts.
Abschnitt 2 gibt einen Einblick in den Stand der Technik numerischer Strömungssimulationen. In Abschnitt 3 werden die am Wirbelschichtreaktor auftretenden Lasten erarbeitet. Zum Abschluss wird auf eine vereinfachte, konstruktionsgerechte Modellierung dieser Lasten eingegangen.

2 Stand der Technik – Simulation von Wirbelschichten

Die Untersuchung des Verhaltens von Wirbelschichten mit den Methoden der numerischen Strömungssimulation ist Gegenstand zahlreicher Arbeiten. Wirbelschichten werden im Allgemeinen als dichte Mehrphasenströmungen, vereinfacht als Zweiphasenströmung, angesehen. In der untersuchten Bauart einer Stationären Wirbelschichtfeuerung liegt allerdings ein hoch expandierendes Wirbelbett vor, so dass die Annahme einer dichten Strömung nicht zwingend in allen Bereichen zutreffend ist.

Grundsätzlich sind zur Modellierung solcher Zweiphasenströmungen die folgenden Teilprobleme zu lösen:

- Bewegung der kontinuierlichen Phase
- Bewegung der dispersen Phase
- Wechselwirkungen zwischen kontinuierlicher und disperser Phase
- Kollision der Partikel untereinander
- Kollision der Partikel mit der Wand

Eine umfassende Simulation muss zusätzlich den Einfluss des Verbrennungsprozesses berücksichtigen.

Das Verhalten der Gasphase kann mit den Navier-Stokes-Gleichungen (Impuls- und Energieerhaltung, Kontinuitätsgleichung) beschrieben werden, sofern sie um Kopplungsterme für die Wechselwirkung mit der Partikelphase ergänzt werden [1].
HUSSMANN [1, Seite 13f] vergleicht die beiden Methoden zur Darstellung von Zweiphasenströmungen. Zur Simulation von Strömungen mit hohem Feststoffanteil sei

generell die Euler-Euler-Modellierung gut geeignet. Hierbei wird die disperse Phase wie die Gasphase als ein Kontinuum aufgefasst und ebenfalls mit den Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Da somit keine Einzelpartikel betrachtet werden müssen, bleibt der Rechenaufwand begrenzt. Allerdings seien gerade die für den Konstrukteur interessanten Wechselwirkungen mit der Reaktorwand mit dieser Methode nur schwer beschreibbar. Die Annahme einer quasikontinuierlichen Partikelphase dürfte für den oberen Bereich des hoch expandierenden Wirbelbetts nicht gültig sein.

Da in der Arbeit von HUSSMANN die Vorgänge am Einzelpartikel interessieren, entscheidet er sich für die Euler-Lagrange-Modellierung [1, Seite 14ff]. Dabei wird nur die Gasphase als Kontinuum berechnet, während die Partikel als Punktmassen vereinfacht und einzeln verfolgt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die korrekte Wiedergabe der Kollisionen mit der Reaktorwand. Abhängig von Partikelanzahl und verfügbarer Rechenleistung ist dabei praktisch immer die Zusammenfassung sehr vieler Partikel zu Paketen erforderlich.

Sehr dichte Partikelströmungen erfordern eine Erweiterung der Modelle um ein Partikel-Partikel-Kollisionsmodell. HUSSMANN nutzt dazu das Iterative Monte-Carlo-Verfahren von OSTERLÉ und SOMMERFELD. Es ist zu klären, ob diese Erweiterung für den unteren Bereich der Stationären Wirbelschichtfeuerung notwendig ist.

MIER [3, Seite 46ff] wählt bei dem in seiner Problemstellung vorliegenden Dispersphasenanteil von 15 % das Euler-Euler-Verfahren.

Einen anderen Ansatz verfolgt das ältere, bei PEGLOW [2] wiedergegebene Modell von MAY. Die dort getroffenen Annahmen zur Gasströmung könnten die Berücksichtigung des Blasenverhaltens erleichtern. Aktueller und umfangreicher werden die an Blasen in einer Strömung auftretenden Effekte von SOKOLICHIN [4, Seite 191ff] untersucht. Er geht auch auf Wechselwirkungen zwischen einzelnen Blasen ein. Hinsichtlich der Behandlung von Blasen übt er Kritik am Euler-Lagrange-Verfahren, da Blasen regelmäßig groß im Vergleich zu den Gitterzellen sind.

Sowohl das Euler-Euler- als auch das Euler-Lagrange-Verfahren sind in der gängigen CFD-Software verfügbar. In den letzten Jahren wurden verstärkt Simulationsergebnisse unter Nutzung dieser Software veröffentlich, so beispielsweise von ZHANG [5], hier mit Hilfe von Fluent.

3 Vorgänge im Wirbelschichtreaktor

Das zunächst ruhende Bettmaterial mit einer Schütthöhe von 1 m wird durch Einblasen der Wirbelluft durch den Düsenboden fluidisiert. Es bildet sich ein hoch expandierendes Wirbelbett. Nachdem dieses Wirbelbett mit Hilfe eines Anfahrbrenners auf Betriebstemperatur gebracht wurde, wird Brennstoff zudosiert und verbrennt innerhalb des Wirbelbetts. Dieser Prozess erzeugt mechanische und thermische Rückwirkungen auf den Reaktor.

3.1 Thermische Lasten

Die Verbrennung wird auf eine Temperatur von ca. 860 °C eingestellt. Aus Messdaten der an der Pilotanlage installierten Thermoelemente ist das Temperaturprofil über die Höhe der Anlage bekannt. Nennenswerte Abweichungen vom Sollwert treten nur im Bereich der Wirbellufteindüsung auf. Da das Wirbelbett prinzipbedingt hervorragend durchmischt ist, darf in gleicher Höhe gleiche Temperatur über den gesamten Querschnitt angenommen werden.

Abgeführt wird die Verbrennungswärme mit dem Rauchgas sowie – abhängig von der Ausführung der jeweiligen Anlage - über in das Wirbelbett eingebrachte oder in das Freeboard integrierte Wärmetauscher. In geringem Umfang treten Wärmeverluste durch die gedämmte Reaktorwand und den optional vorhandenen, kontinuierlichen Bettmaterialabzug auf.

Die kontinuierlich eingetragenen Medien – Wirbelluft und Brennstoff – bewirken eine Kühlung. Dieser Effekt ist durch die Temperaturmessungen gut sichtbar; bei nicht vorgewärmter Wirbelluft liegt die Reaktortemperatur im Bereich des Düsenbodens ca. 100 °C unter der Solltemperatur.

Tabelle 1 fasst die genannten thermischen Lasten zusammen.

Tabelle 1: Thermische Lasten

Position	Richtung	Temperaturmessung	
Wirbelluft	+	-20…200 °C	Umgebungsluft, gegebenenfalls vorgewärmt
Brennstoff	+	-20…30 °C	z.B. EBS oder Kompost
Reaktorwand	-		1.4841 und Dämmung
Wärmeauskopplung	-	200 °C	
Rauchgas	-		
Verbrennung	+	860 °C	

3.2 Mechanische Lasten

Innerhalb des Wirbelbetts bilden sich kontinuierlich Blasen, die zunächst aufsteigen und schließlich kollabieren. Das dann zurückfallende Bettmaterial bewirkt eine stoßende Belastung des Reaktorbodens. Weitere Schwingungserreger sind das Brennstoff-eintragssystem, der Eintrag der Wirbelluft über den Düsenboden und die Aktoren der Stelleinrichtungen.

Bei den anliegenden Temperaturen keinesfalls zu vernachlässigen sind die Gewichtskräfte aus der Eigenmasse der Anlage und der Masse des Bettmaterials sowie in geringem Umfang aus der Masse des eingebrachten Brennstoffs, sofern dieser nicht gasförmig vorliegt. Die Summe der Eigenmassen bestimmt vermutlich eine Obergrenze für die Baugröße dieses Anlagentyps.

In Bild 1 werden die oben erläuterten Lasten nochmals verdeutlicht. Sinnbildlich dargestellt sind das Wirbelschichtgefäß (unterer Zylinder), das Freeboard (oberer Zylinder), ein konisches Übergangsstück sowie die Aufhängung.

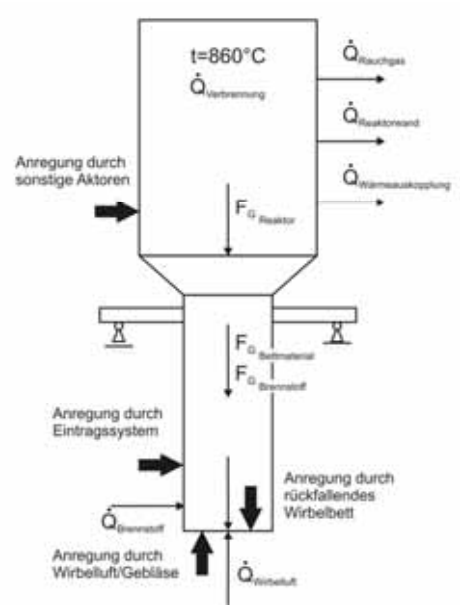


Bild 1: Lasten am Wirbelschichtreaktor

4 Konstruktionsgerechte Modellierung der Belastung

Eine vollständige Betrachtung der Einwirkung des Wirbelbetts auf den Reaktor erfordert die Simulation der Zweiphasenströmung mit den zuvor beschriebenen Verfahren und eine daraus abgeleitete Bewertung der Stoßvorgänge an der Reaktorwand. Dieser Ansatz birgt ganz erhebliche Anforderungen an Modellbildung und Rechenzeit.

Um den gewünschten Erkenntnisgewinn dennoch mit den Mitteln des Konstrukteurs zugänglich zu machen, wird auf die exakte Betrachtung mittels Strömungssimulation verzichtet. Stattdessen werden vereinfachte Modelle gesucht, die in Pro/MECHANICA darstellbar sind.

Die Simulation erfolgt in mehreren Schritten. Als erstes wird ein vereinfachtes Modell der Reaktorgeometrie und der Dämmung erzeugt und mit den vom Zulieferer bekannten Werkstoffkennwerten belegt. Nach Antragen der gemessenen Temperaturen kann nun die Temperaturverteilung berechnet werden. Damit stehen die Wärmedehnung und die Wärmespannung bei der ermittelten Temperaturverteilung ebenfalls zur Verfügung; Mit der

Definition von Lagerreaktionen und Gewichtskräften sind dann alle statischen Lasten bekannt.

Die Belastung des Düsenbodens durch zurückfallende Blasen wird durch ein Feder-Masse-System angenähert. Dazu müssen mit einer Unsicherheit behaftete Annahmen zur Blasengröße und -häufigkeit getroffen werden.

Literatur

[1] Hußmann, Björn: Modellierung und numerische Simulation zweiphasiger Strömungs- und Verbrennungsvorgänge in einem Staustrahltriebwerk mit Bor als Festtreibstoff. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2008

[2] Peglow, Mirko: Beitrag zur Modellbildung von eigenschaftsverteilten dispersen Systemen am Beispiel der Wirbelschicht-Sprühagglomeration. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2005

[3] Mier, Patrick: Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation der Flüssigkeits-Feststoff-Strömung im Strahlschlaufenapparat. Technische Universität Berlin, Dissertation, 2006

[4] Sokolichin, Alexander: Mathematische *Modellbildung und numerische Simulation von Gas-Flüssigkeits-Blasenströmungen*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 2003

[5] Zhang, Nan et al.: 3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150 MW_e circulating fluidized bed boiler. In: Chemical Engineering Journal 162 (2010), Seite 821-828

Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit mobiler Energiewandler

Jana Hadler, Klaus Brökel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD
Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock
Email: jana.hadler@uni-rostock.de; klaus.broekel@uni-rostock.de
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Das großskalige Modell einer Kleinwasserkraftanlage (Free Stream Energy Converter – FSEC) aus dem Forschungsprojekt HYLOW ist fertiggestellt und bereits in einem Flora-Fauna-Habitat der Warnow getestet worden. Das Schwimmverhalten des FSEC wurde zuvor mit Hilfe von Zugversuchen in tiefen und freien Gewässern der Umgebung analysiert. Bisher beschränkt auf technische und ökologische Experimente, ist die Entwicklung der Kostenseite auch im Hinblick auf die ehrgeizigen Ziele unserer Bundesregierung (Energiekonzept 2050) einer tiefergehenden Betrachtung wert. Verdeutlicht werden die Amortisationsdauern und Investitionsmöglichkeiten einer solchen Anlage in verschiedenen Regionen in Abhängigkeit aktueller Einspeisevergütungen.*

Abstract: *The Large Scale Model of a Free Stream Energy Converter (FSEC) has been built and already tested in an FFH. Previously, the floating stability through towing tests in deep waters was already analysed. Until today only the technical and ecological parts were considered. Now it depends on the economic aspects, especially in the association with the objectives of the German Government regarding the Energy Concept 2050.*

Stichwörter: *Kleinwasserkraft, niedrige Fallhöhen, Wirtschaftlichkeit.*

Keywords: *Small hydropower, low head differences, profitability.*

1 Einleitung

Erneuerbare Energien rücken auffällig oft in den Fokus von Politik und Öffentlichkeit, da Alternativen zu Atomkraft und Rohstoffverknappung bundesweit noch nicht realisiert sind.
In einer aktuellen Studie erkennt der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) in einem Szenario zur Selbstversorgung Deutschlands mit Strom aus erneuerbaren Energien, dass dieses aus Kostengründen in den nächsten Jahren nicht zu realisieren ist. Denkbar ist es allerdings, auf internationaler Ebene mit Ländern zu kooperieren, die ausreichend Möglichkeiten zur Nutzung haben. [1]

Mobile Kleinwasserkraftanlagen, wie sie im EU-geförderten Projekt *HYLOW* (hydropower converter for very low head differences) entwickelt werden, sind mit Sicherheit keine Lösung für große Energiegewinnung, aber auf Grund ihres einfachen Aufbaus stellen sie eine mögliche Option für dezentrale Energieproduktion in Entwicklungsländern oder auch für entfernte Gegenden dar, in denen kein ausgebautes Energienetz vorhanden ist und eine direkte Versorgung vor Ort erforderlich ist. *HYLOW* untersucht die Entwicklung von Energiekonvertern für niedrige Potentiale.

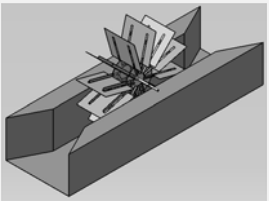
2 Stand der Entwicklung

Die erste größere Testphase des FSEC in einem Flora-Fauna-Habitat wurde von Februar bis Ende März 2011 erfolgreich absolviert (Bild 1). Dieses ist als erster öffentlicher Erfolg des Projektes zu werten, zumal die Versuche von der deutschen Medienwelt gelegentlich begleitet wurden. Mit einer Länge von 7580 mm, einer Breite von 2400 mm, einer Gesamthöhe von etwa 3500 mm wiegt das Modell aus Stahl etwa 4,5 t und beeinträchtigt auch in diesen Dimensionen die Um- und Wasserwelt nur unwesentlich. Das Schwimmverhalten des FSEC wurde zuvor mit Hilfe von Zugversuchen in tiefen und freien Gewässern der Umgebung analysiert.

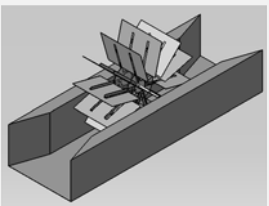
Bild 1: Versuchsstandort im Flora-Fauna-Habitat (Warnow bei Sternberg)

3 Einsatzmöglichkeiten eines FSEC

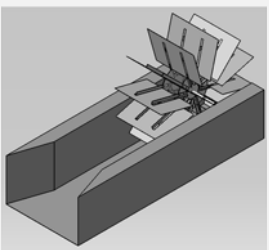
Das großskalige Modell des FSEC ist für Fließgeschwindigkeiten bis zu 3,5 m/s konzipiert. Verschiedene Bauvarianten lassen es zu, diese Energiekonverter in Gewässer mit unterschiedlichen Einsatzbedingungen auszubringen. In Bild 2 werden diese Varianten übersichtlich dargestellt.



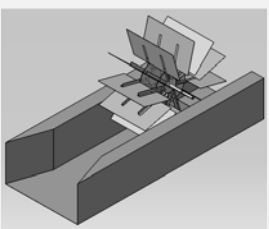
- Fließgeschwindigkeiten bis 3,5 m/s
- breite Schwimmkörper
- bidirektionale Fließrichtung für Einsatz in Tidegebieten
- ebene Schaufeln



- Fließgeschwindigkeiten bis 2,5 m/s
- schmale Schwimmkörper
- bidirektionale Fließrichtung für Einsatz in Tidegebieten
- ebene, breite Schaufeln



- Fließgeschwindigkeiten bis 2,0 m/s
- schmale Schwimmkörper
- unidirektionale Fließrichtung, stumpfes Heck
- ebene oder gewölbte, schmale Schaufeln
- Wasserradachse im hinteren Kanalbereich



- Fließgeschwindigkeiten bis 1,5 m/s
- schmale, flache Schwimmkörper
- unidirektionale Fließrichtung, stumpfes Heck
- ebene oder gewölbte, breite Schaufeln
- Wasserradachse im mittleren bis hinteren Kanalbereich

Bild 2: Varianten eines FSEC

3.1 Regionale Einsatzmöglichkeiten

Das geografische Süd-Nord-Gefälle in Deutschland gestattet im Norden keine große Anstauung von Flüssen oder gar den Bau von Pumpspeicherwerken mit z.B. Kaskadentechnologien, wie es in Norwegen realisiert werden kann. Im Bild 3 ist das Wasserkraftpotential nach Giesecke dargestellt. Das technisch nutzbare Potential in Norddeutschland ist in geringem Maße vorhanden, weshalb der Einsatz einer FSEC-Variante durchaus denkbar ist.

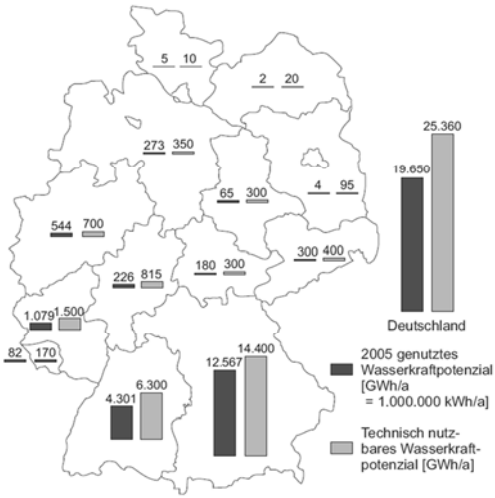


Bild 3: Wasserkraftpotential in Deutschland 2005 [2]

Zu beachten sind jedoch außerdem das wirtschaftliche und das realisierbare Potential, welche beide in jedem Fall niedriger als das technische Potential sind.

Im Vorfeld der Installation eines schwimmenden Energiewandlers ist es zum einen notwendig, konkrete Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit anzustellen und alle Genehmigungen zum Installieren und Betreiben der Anlage einzuholen. Zum anderen müssen die genauen Gegebenheiten im Einsatzgebiet ermittelt werden, um die konkrete Modellvariante zu bestimmen.

3.2 Globale Einsatzmöglichkeiten

Die Mobilität des FSEC ermöglicht eine Installation überall dort, wo fließende Gewässer den Einsatzbedingungen sowie den Last- und Leistungsanforderungen genügen.

Weltweit gibt es selbst in Industrienationen Gegenden, die nicht elektrifiziert sind und Bedarf an dezentraler Energieversorgung hätten. Zumeist herrscht aber in Entwicklungsländern ein Defizit an Elektrizität, wie der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen ist.

Tabelle 1: Weltweiter Elektrizitätszugang 2009 nach International Energy Agency (IEA) [3]

	Population without electricity [million]	Electrification rate [%]	Urban electrification rate [%]	Rural electrification rate [%]
Africa	587	41.9	68.9	25.0
North Africa	2	99.0	99.6	98.4
Sub-Saharan Africa	585	30.5	59.9	14.3
Developing Asia	799	78.1	93.9	68.8
China & East Asia	186	90.8	96.4	86.5
South Asia	612	62.2	89.1	51.2
Latin America	31	93.4	98.8	74.0
Middle East	22	89.5	98.6	72.2
Developing countries	1,438	73.0	90.7	60.2
Transition economies & OECD	3	99.8	100.0	99.5
World	1,441	78.9	93.6	65.1

In einkommensstarken Regionen besteht auf Grund der Nutzung fossiler Energieträger, großer Pumpspeicherwerke und großflächiger Solarfelder sowie auf Grund von Energie- bzw. Ressourcenimporten ein Energieüberschuss. Die Zahlen der IEA belegen, dass es überwiegend Entwicklungsländer sind, die mit einer Unterversorgung an elektrischem Strom leben.

4 Wirtschaftlichkeit des FSEC

4.1 Investitionsobjekt – ja oder nein?

Derzeit steht und fällt mit den Einspeisevergütungen, welche den Stromerzeugern zugutekommen, die ihren erzeugten Strom in das öffentliche Netz einspeisen, jede Investitionsentscheidung für eine Kleinwasserkraftanlage. Die entstandenen Kosten für den Bau des Prototypen des FSEC sind bereits betrachtet worden [4].

Sollte ein weiteres Produkt entstehen, fallen die Kosten auf 70%; für eine Kleinserienfertigung von fünf Stück reduzieren sich die Kosten auf 60% pro Stück. Europaweit betrachtet würde sich die Installation mit Hilfe der Einspeisevergütungen auf

die Laufzeit betrachtet für die Einzelteil- und Kleinserienfertigung nur in Großbritannien und Italien lohnen. [5]

4.2 Kostensenkungspotentiale

Material- und Personalkosten sind die jeweils größten Kostenblöcke bei der Herstellung eines FSEC. Der Kauf größerer Mengen und die Bevorratung von Material führen zu immenser Kapitalbindung – ein Aufwand, den Unternehmer oft scheuen. Personalkosten werden mit dem Bau jedes Konverters weniger, da Lerneffekte bereits beim Nachbau eines Einzelstückes einsetzen. Eine Reduktion der Fertigungszeit führt somit schon zu niedrigeren Personalkosten.

Die Zielgrößen Qualitätssteigerung, Termintreue und Kostenminimierung führen einerseits zur Steigerung des Unternehmenswertes, stehen aber andererseits in solchen Relationen zueinander, dass sie Konfliktpotential in sich bergen und in Einklang gebracht werden müssen. Die Potentiale zur Kostensenkung in den Bereichen

- *Planung und Entwicklung* (z.B. durch Einbindung aller Unternehmensbereiche in den Entwicklungsprozess),
- *Produktion* (z.B. durch Steigerung der Produktionsmenge Senkung der Fixkosten je Erzeugnis),
- *Distribution* (z.B. auftragsorientierte Produktion und Direktvertrieb) und
- *Nutzung* (z.B. durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung Vermeidung des Ausfalls der Anlage)

können nur unter Beachtung der o.g. Zielgrößen realisiert werden. [6] Im Detail wird die Konzeption dieser mit einem konkreten Produktionsauftrag erfolgen.

5 Ausblick

Staatliche Kernaufgaben im Bereich der intensiven Nutzung der erneuerbaren Energien für die nächsten Jahre werden der Netzausbau und die Entwicklung von Speichertechnologien sowie die Schaffung harmonisierter und langfristiger Rahmenbedingungen sein.

Der freischwimmende Energiewandler ist aus geografischer und hydrologischer Sicht beurteilt eine Option für den Norden Deutschland. Doch wegen der durchgehenden Elektrifizierung in unserem Land ist diese Anlage nur bedingt erforderlich und dann auch nur, wenn damit zunächst keine Gewinne erzielt werden sollen. Unabhängig davon ist eine

Weiterentwicklung und Optimierung notwendig, da es weltweit Bedarf an dieser Art Energiewandlung gibt. Konkrete Nachfragen auf Kongressen und über die Homepage *www.hylow.eu* bestätigen dieses.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

Literatur

[1] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2011: *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung; Sondergutachten.* Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG. – ISBN 978-3-503-13606-3

[2] Giesecke, J.; Mosonyi, E. und S. Heimerl, 2009: *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb.* Springer-Verlag, Berlin (S.37). – ISBN 978-3-540-88989-2

[3] International Energy Agency, Electricity access in 2009: http://www.worldenergyoutlook.org /electricity.asp (22.07.2011)

[4] Hadler, J. und K. Brökel, 2010: *Wasserkraft für geringe Fallhöhen und ihr wirtschaftliches Potential.* 8. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2010, Magdeburg - ISBN 978-3-86912-040-0

[5] Hadler, J. und K. Brökel, 2011: Low head hydropower – its design and economic potential, in proceedings of World Renewable Energy Congress Linköping, Sweden.

[6] Domke, R., 2010: Analyse und Darlegung der Kostensenkungspotentiale für eine mögliche regionale und globale Nutzung mobiler Energiewandler, Rostock, unveröffentlichte Bachelorarbeit