Moderne computerbasierte Simulations- und Visualisierungsverfahren ergänzen sich in der Produktentwicklung mit den Ansätzen der Konstruktionsmethodik in idealer Weise. In diesem Zusammenwirken kann die Diskrepanz „Simulation vs. Reality“ erfolgreich verringert werden.
Im Rahmen des 7. Gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik werden Methoden und Werkzeuge der vernetzten Produktentwicklung zu folgenden Themenschwerpunkten vorgestellt:

- **Methodische und rechnerbasierte Untersuchungen des Produktentwicklungsprozesses**
- **Werkzeuge, Methoden und deren Kopplung in der Produktentwicklung**
- **Modellierung und Simulation für die Produktentwicklung**
- **Experimentelle Produktentwicklung vs. virtuelle Produktentwicklung**

LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSLEHRE UND CAD

UNIVERSITÄT BAYREUTH

ISBN 978-3-00-028222-5

KT2009 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2009

KT2009

7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik

VERNETZTE PRODUKTENTWICKLUNG: METHODEN UND WERKZEUGKOPPLUNG

Klaus Brökel, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote,

Frank Rieg, Ralph Stelzer

(Hrsg.)

Tagungsband

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

7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2009

VERNETZTE PRODUKTENTWICKLUNG: METHODEN UND WERKZEUGKOPPLUNG

am 8. und 9.10.2009

in Bayreuth

Vorwort

Die Kopplung von Methoden und Werkzeugen mit dem Ziel einer vernetzen Produktentwicklung ist die Möglichkeit, vorhandene Innovationspotentiale besser auszuschöpfen. Diese Potentiale zu erschließen und ihre Nutzung zu unterstützen ist der Grundgedanke des 7. Gemeinsamen Kolloquiums Konstruktionstechnik. Computergestützte Werkzeuge ermöglichen eine Verschlankung des Entwicklungsprozesses, können aber erst durch eine gezielte Kombination mit klassischen Methoden ihre volle Wirkung entfalten. Ingenieure und Produktentwickler an Hochschulen und in der Industrie setzen viel Kraft daran, die Vision der vernetzten Produktentwicklung umzusetzen.

Ihnen soll dieses Kolloquium ein Forum bieten, das Hochschulwissenschaft und industrielle Praxis aus verschiedensten Teilgebieten der Ingenieurswissenschaften einen fruchtbaren Austausch erlaubt. Wie schon in den vergangenen Veranstaltungen sollen Trends, aktuelle Forschungsergebnisse und Zukunftsperspektiven diskutiert werden, damit neue Anregungen geschaffen werden.

Daher möchte ich an dieser Stelle jenen für Ihre Arbeit und Ihre Mühen danken, welche die Diskussionsgrundlage liefern: Den Vortragenden. Des Weiteren gilt mein Dank allen Gästen, welche durch ihr Interesse die Veranstaltung bereichern. Eine Veranstaltung, welche ohne den Einsatz der Mitarbeiter des LS CAD, insbesondere Frau Dr.-Ing Bettina Alber-Laukant und Frau Manuela Lackner, nicht zu realisieren gewesen wäre.

Ich möchte allen Teilnehmern einen angenehmen Aufenthalt in der Festspiel- und Universitätsstadt Bayreuth und eine erfolgreiche Veranstaltung wünschen. Mögen daraus neue Ideen entstehen, welche im Rahmen, des Kolloquiums 2010, ausgerichtet von meinem lieben Kollegen Prof. Karl-Heinrich Grote und dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, die Forschung weiter vorantreiben.

Bayreuth, Oktober 2009

Prof. Frank Rieg

Inhaltsverzeichnis

Grundzüge maschinenbaulicher Ausbildung G. Pahl	7
Konzeption und Entwicklung eines modularerweiterbaren Finite Elemente Programmsystems A. Troll, F. Rieg Universität Bayreuth	17
Arbeitsraum-Untersuchungen an einem Industrieroboter für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Hüftendoprothesen C. Kliewe, K. Brökel, R. Souffrant, M. Kähler, R. Bader, C. Woernle Universität Rostock	25
Anwendung der Rapid-Prototyping-Technologie für Kleinserien im Explosionsschutz R. Träger, K.-H. Grote, U. Klausmeyer, F. Engelmann Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg	32
Reverse Engineering Prozesse im Spannungsfeld zwischen Produktentwicklung und Produktpiraterie C. Schöne, R. Stelzer Technische Universität Dresden	40
Produktentwicklung optimieren mit Hilfe der selbst organisierenden Merkmalskarten (SOM) in der Automobilzulieferindustrie A. Nagarajah, J. Feldhusen RWTH Aachen	48
Vorhersage des Fließverhaltens von Kunststoffbauteilen durch computergestützte Methoden und Werkzeuge J. Zapf, F. Rieg Universität Bayreuth	55
Einsatz von CAE Methoden zur Analyse und Verbesserung des Verhaltens eines Flächenportals bei der automatisierten Textilablage für Faser-Kunststoff-Verbunde J.-H. Ohlendorf, Ch. R. König, M. Kochmann, D. H. Müller, K.-D. Thoben Universität Bremen	63
FE-Simulation zur Analyse des Vorspannverlaufs von Kunststoff-Direktverschraubungen Y. Yao, R. Renz Technische Universität Kaiserslautern	71
Anforderungen an eine Methode zur Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung D. Roth, H. Binz, R. Watty Universität Stuttgart	79

Potentiale einer eigenschaftsbasierten Produktbeschreibung C. Westphal, H. Krehmer, K. Paetzold, S. Wartzack, H. Meerkamm Universität Erlangen-Nürnberg	87
Anforderungen an eine Wissensrepräsentationsform zur Darstellung von Konstruktionswissen in neuartigen wissensbasierten Systemen M. Kratzer, H. Binz, R. Watty Universität Stuttgart	95
FSEC – Konstruktionen als Ergebnis aus Labor- und Freilanduntersuchungen J. Hadler, K. Brökel, C. Semlow Universität Rostock	103
Investigation of stressed state of elastic element of elastic clutch from reinforced polymer material with the change of the strain V. Hadzhiyski, Z. Atanasov University of Food Technologies Plovdiv	110
Einfluss der DFX-Strategie auf Produktentwicklungskriterien C. Stöber, H. Meerkamm Universität Erlangen-Nürnberg	118
Feuer- und brandschutzgerechtes Konstruieren als Baustein für das Design for X H. Schnegas Hochschule Wismar	126
Simulation zur Unterstützung der Produktentwicklung von Beveloidverzahnungen T. Röthlingshöfer, C. Brecher, C. Gorgels RWTH Aachen	134
Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse T. Schulze, B. Schlecht, C. Hartmann-Gerlach Technische Universität Dresden	142
Berechnung hydrostatischer Radialgleitlager mit Mathcad unter Berücksichtigung verschiedener Schmiermittelversorgungssysteme S.-U. Kreja, K. Brökel Universität Rostock	149
Berücksichtigung des Fördergutes bei der Entwicklung und Konstruktion von Materialflusssystemen D. Wieczorek, B. Künne Technische Universität Dortmund	156

Optimierungsmöglichkeiten im Konstruktionsprozess/-ablauf innerhalb des Sonderfahrzeugbaus am Beispiel der Firma Rheinmetall Landsysteme 164
T. Bläßing, K.-H. Grote, C. Steglich
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kleinteiloptimierung am Beispiel von Verbindungselementen in Windkraftanlagen 171
J. Brökel, R. Kortenkamp
Suzlon Energy GmbH

Anwendung des Theorems von Roberts/Tschebyschev zur CAD basierten und effizienten Auslegung teilflexibler Führungsgetriebe 179
F. Ebert, M. Berger
Technische Universität Chemnitz

Modellierung und Simulation zum Kegelradfräsen - Analyse der Werkzeugbelastung 187
A. Hardjosuwito, C. Brecher, F. Klocke, St. Herzhoff
RWTH Aachen

Unterstützung der Konstruktion von Stetigförderern durch die Simulation des dynamischen Systemverhaltens 195
B. Benthaus, Jan Eggert, B. Künne, S. Kulig
Technische Universität Dortmund

Entwicklung und Erprobung anhand virtueller Modelle am Beispiel einer Sicherheitsvorrichtung für Oberleitungen elektrischer Bahnen 203
K.-P. Herber, J. Scholten, H. Haensel
Ruhr-Universität Bochum

Werkzeuge zur automatisierten Messplanung von Freiformflächen 211
S. Holtzhausen, C. Schöne, R. Stelzer
Technische Universität Dresden

Finite Elemente für den konstruktiven Alltag: Mit einer vereinfachten Anwendung zu besseren Ergebnissen 219
H.-P. Prüfer
Ruhr-Universität Bochum

Anforderungen des Technischen Designs an die Modellierung und Simulation in der virtuellen Produktentwicklung 226
G. Kranke
Technische Universität Dresden

Erweiterung der Funktionalität von Pro/ENGINEER unter Verwendung der Programmier-Schnittstelle J-Link 233
R. Rahn, K. Brökel
Universität Rostock

Quantitative Studie über die Nutzung informationstechnischer Systeme im Produktentstehungsprozess 241
K. Lindow, R. Stark, G. Beier, C. Kind, K. Özgen
Technische Universität Berlin

Experimenteller Beitrag zur Verbesserung virtueller Werkzeuge 249
P. Lyszczan, O. van Bargen, Th. Just
Technische Universität Berlin

Grundzüge maschinenbaulicher Ausbildung

Gerhard Pahl, Darmstadt

1 Der Maschinenbau

Der Maschinenbau weist eine große Vielfalt von Produkten auf. So gibt es in Deutschland etwa 22 000 Maschinenbaufirmen verschiedenster Art. Der VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) klassifiziert den Maschinenbau in 44 Nomenklaturgruppen, wie z. B. Allgemeine Lufttechnik, Antriebstechnik, Druck- und Papiertechnik, Fördertechnik, Geldschrank- und Tresoranlagen, Kompressoren und Vakuumpumpen, Landmaschinen, Reinigungsmaschinen, Textilmaschinen, Verpackungsmaschinen, Werkzeugmaschinen, Zerkleinerungsmaschinen, Windsichter und viele mehr, wobei die Automobilindustrie noch nicht einmal eingeschlossen ist.

Der Maschinenbau ist im Export weltweit orientiert und damit auch der Globalisierung unterworfen, d.h. es sind fremdländische Bedingungen und internationale Vorschriften und Gepflogenheiten zu beachten. Die Problemlösungen und die daraus entstehenden Produkte nutzen heute eine Symbiose vom Mechanik und Elektronik in einer Mechatronik. Die Entwickler bedienen sich im hohen Maße numerischer Rechenmethoden und der Finite Elemente Methode, um komplizierter Gestaltungen berechnen zu können. Schließlich gehören Informationssysteme, wie das virtuelle Produktmodell in Form eines 3D-CAD- Modells als unverzichtbare Basis für die konstruktive Gestaltung und für die Planung und Durchführung der Fertigung ganz selbstverständlich dazu.

Die vorgenannte stichwortartige Aufzählung deutet auf eine Vielzahl von Problemen und Erscheinungen, aber auch auf eine Vielzahl von zu beherrschenden Wissensgebieten und Methoden hin. Wie kann eine maschinenbauliche Ausbildung solchen vielfältigen Anforderungen gerecht werden? Meine nachfolgenden Empfehlungen gründen auf eine langjährige Erfahrung als Hochschullehrer im Maschinenbau, auf eigenständig durchgeführte Reformen in der Fakultät für Maschinenbau an der damaligen TH Darmstadt, dargelegt in der Geschichte des Maschinenbaus an der TU Darmstadt in [1] und auf einen internationalen Beitrag in Santa Barbara „Engineers in the Global Economy“ [2].

2 Betonung der maschinenbaulichen Grundlagen

Eine maschinenbauliche Ausbildung kann der genannten Vielfalt nur gerecht werden, indem sie versucht, als Allgemeiner Maschinenbau die Grundlagen zu vermitteln, auf denen die vielfältigen Erscheinungen beruhen. Diese Grundlagen befinden sich zunächst in den klassischen Fächergebieten Mathematik, Physik, Chemie, Mechanik, Mechanischer Technologie, Maschinenelemente, Thermodynamik. Zusätzlich sind aber noch eine vertiefte Strömungslehre, eine Regelungs- und Steuerungstechnik, eine Maschinendynamik, eine Werkstoffkunde mit deutlichem Bauteilbezug und eine Einführung in die elektronischen Datenverarbeitung als Pflichtfächer vorzusehen. Diese Grundlagen sind in der notwendigen Tiefe mit jeweils vier Wochenstunden und mit Beispielen maschinenbaulicher Anwendung zu behandeln.

Eine solche Konzentration auf die Grundlagen vermeidet ausdrücklich ein spezielles Fachrichtungsstudium, wobei es örtlich aus traditionell gewachsenen Gründen Ausnahmen geben kann, z. B. in Darmstadt die akademische Ausbildung der Papieringenieure.

Zu diesem Weg mit Konzentration auf die oben genannten Grundlagenfächern gehört dann zwingend eine freie Auswahl individuell motivierter Anwendungsgebiete. Diese Auswahl sollte zwecks Sicherstellung einer ausreichenden Anwendungsbreite aber unter bestimmten Bedingungen erfolgen:
Mindesten zwei vertiefte Anwendungsfächer (≥ 6Wh) aus unterschiedlichen Gebieten, z. B. warm /kalt, Produktionstechnik/ Fahrzeugtechnik, thermische Verfahrenstechnik/Leichtbau oder ähnlich.
Zwei Studienarbeiten in den jeweils ausgewählten vertiefenden Anwendungsfächern, davon eine als Konstruktiver Entwurf.
Die Diplomarbeit in einem weiteren, von den vorherigen also verschiedenen Anwendungsgebiet, wobei die Diplomarbeit konstruktiver, theoretischer oder experimenteller Art sein kann.

Wichtig ist eine individuell motivierte Auswahl der Anwendungsgebiete, um einen möglichst hohen persönlichen Einsatz mit bestmöglichem Erfolg zu erzielen. Dabei kann die Motivation durch das Fach selbst, aber auch durch den jeweils vermittelnden Hochschullehrer gegeben sein. Da die unumgänglichen Grundlagenfächern Pflichtfächer sind, ist die

freie Wahl der vertiefenden Anwendungsfächer von hoher Bedeutung, um im Allgemeinen Studium des Maschinenbaus den persönlichen Interessen, einem angestrebten Schwerpunkt oder sogar einer gewissen individuell erwählten Fachrichtung zu entsprechren.

Es ist darauf zu achten, dass in den genannten Pflicht- und Wahlfächern eine solide Vermittlung der fachlichen Fakten erfolgt. Der später agierende Maschinenbau-Ingenieur schafft in seiner Arbeitsumgebung und im Kreise seiner Kunden nur durch eine profunde Fachkenntnis und sichere Aussage das notwendige Vertrauen.

3 Methodenkenntnisse

Fachkenntnisse allein sind aber nicht ausreichend. Zur Bewältigung der vielfältigen Aufgaben sind Methodenkenntnisse und eine gewisse Erfahrung in ihrem Umgang notwendig. Für den heutigen Maschinenbauer sind nachfolgende Methodenbereiche wichtig:

3.1 Arbeitswissenschaft und Sicherheitstechnik

Bei fast allen maschinenbaulichen Aufgaben ist die Mensch-Maschine-Beziehung zu beachten, deren Grundlagen und Erscheinungen in der Arbeitswissenschaft vermittelt werden. Es kommt darauf an, Lösungen zu entwickeln, die menschlichen Fähigkeiten gerecht werden, wie günstige Arbeitshaltungen, Vermeidung frühzeitiger Ermüdung und sinnvolle Handlungsabläufe. Sicherheitstechnisch einwandfreie Maschinen, Geräte und Systeme gehören ebenfalls zu wichtigen Gestaltungsaufgaben im Maschinenbau. Sicherheitsprinzipien und entsprechende Gestaltungsregeln haben eine hohe Schnittmenge zwischen den Fachgebieten der Arbeitswissenschaft und der Konstruktionslehre, wobei der wesentliche Teil sicherheitstechnischer Prinzipien in der Konstruktionslehre bzw. Produktentwicklung zu vermitteln ist [3].

3.2 FEM-Methode und numerische Mathematik

Gestaltungen mit nicht elementar geometrischen Formen sind häufig einer geschlossenen Berechnung ihrer Festigkeit oder Verformung nicht zugänglich. Dazu bedarf es der Finite Elemente Analyse oder sonstigen Verfahren der numerischen Mathematik. Wenn auch der maschinenbauliche Konstrukteur versucht, den Grundregeln nach Einfachheit und Eindeutigkeit zu entsprechen, verlangen hohe Materialausnutzung und gute Funktionalität oft komplizierte Gestaltungsformen. Sie können nur mit entsprechenden Methoden beurteilt werden, wozu Maschinenbauer befähigt sein müssen. Der ausgebildete Maschinenbauer

sollte mindestens die Grundsätze und Möglichkeiten der Finite Elemente Analyse soweit kennen gelernt haben, dass er ihre Einsatzmöglichkeiten und die Schwierigkeiten der Netzwerkbildung abschätzen kann.

3.3 Konstruktionsmethodik

Im Rahmen der konstruktiven Ausbildung ist eine Konstruktionsmethodik, d.h. ein planmäßiges Verfahren zur Suche von Lösungen bei der Entwicklung von Produkten zu vermitteln. Diese Forderung hat durch die Arbeit von Judith Jänsch aus dem Jahre 2006 [4] eine bedeutsame Unterstützung erfahren, in der nämlich nachgewiesen wurde, dass das Vorgehen und die Grundsätze bisheriger und bekannten Konstruktionsmethoden z.B. nach VDI 2222 [5] oder nach Pahl/Beitz „Konstruktionslehre“ [3] durchaus auch Erkenntnissen der Denkpsychologie hinsichtlich kognitiver Voraussetzungen und Fähigkeiten entsprechen. Damit sind frühere Einwände hinsichtlich mangelnder Übereinstimmung mit dem menschlichen Denken widerlegt worden.

Mit dem heutigen Vortrag möchte ich gerade aus vorstehenden Gründen betonen, wie wichtig eine konstruktionsmethodische Anleitung für den künftigen Maschinenbauer ist. Die Konstruktionsmethodik ist in ihrem Wesen eine allgemeine Lehre, um Probleme schlechthin erfolgreich lösen zu können. Eine solche Lehre folgt stark abstrahiert auf folgenden Vorgehensschritten:
Information –Definition – Kreation – Evaluation

Information bedeutet, dass der Problemlöser sich zuerst eingehend informiert, worum es sich bei der Problemlösung handelt, welche Randbedingungen und Grenzen bestehen, welche Auswirkungen zu beachten sind und in welchem Kostenrahmen eine Lösung zu suchen ist.
Konstruktionsmethodisch führt eine solche Klärung zur Anforderungsliste. Eine solche Anforderungsliste ist anfangs nicht vollständig, sie ist im Laufe der Entwicklung korrigierbar und ergänzungsbedürftig, aber von Anfang an ein unverzichtbares Abstimmungs- und Leitdokument.
In denkpsychologischer Hinsicht entspricht sie der in der Kognitionswissenschaft beobachteten Mittel-Ziel-Analyse.

Definition weist nun daraufhin, dass auf Grund der gewonnenen Informationen ein Erkennen der vorliegenden Problematik möglich ist und auch ihre nähere Beschreibung erfolgen kann.

Konstruktionsmethodisch stehen hierfür die Definition der Gesamtfunktion und ihre zu erfüllenden Teilfunktionen in einer Funktionsstruktur zur Verfügung. Mit ihr werden strukturelle Zusammenhänge deutlich, ohne schon im Einzelnen konkrete Lösungen zu benennen. Die Definition und Anzahl der Teilfunktionen kann dabei zunächst durchaus unvollständig sein. Anfangs hilft schon allein die Auflistung erkennbar notwendiger Funktionen. Auch darf die Einteilung in Haupt- und Nebenfunktionen zunächst provisorisch sein, denn erst später im Laufe der Entwicklung sind sie genauer definierbar. Jedenfalls ermöglicht das Hilfsmittel „Funktionen zu definieren“, einen ersten Überblick für den Umfang der Lösungssuche, für denkbare Strukturen und für das Erkennen der wesentlichen Hauptfunktion, für die sinnvoll mit einer Lösungssuche zu beginnen ist.
Ein solcher Schritt entspricht in denkpsychologischer Hinsicht der Wahrnehmung von Komponenten in einer zusammengehörigen Struktur sowie dem Erkennen von Problemfeldern.

Kreation schließt neben den spontan auftretenden Ideen ein möglichst planvolles Vorgehen ein, um rasch und zielsicher eine Lösung zu finden. Die vorangegangenen Schritte der Information und der Definition von Funktionen haben den Problemlöser bereits vorbereitet, sein einfallsreiches Denken in zweckmäßige Bahnen zu lenken. Er wird so von vorn herein aussichtsreichere Lösungswege verfolgen.
Konstruktionsmethodisch stehen ihm dabei mehrere unterschiedliche Suchmethoden zur Verfügung, die er aus seiner Methodenkenntnis heraus auswählen muss. Intuitiv betonte Methoden, wie Brainstorming, Methode 635, Galeriemethode, wird er wählen, wenn zunächst für die ausgewählte Hauptfunktion kein Ansatz erkennbar, aber doch eine entsprechende kreative Gruppe kurzfristig in einer Sitzung zur Verfügung steht. Die dort gewonnenen Ergebnisse sind in der Regel nur Ideen oder Denkansätze und bedürfen in der Regel noch erheblicher Nacharbeit im Einzelnen. Diskursive betonte Methoden wie Systematische Untersuchung des physikalischen Zusammenhangs, Aufstellung von Ordnungsschemata und die Durchsicht von Katalogen sind sinnvoll, wenn erste physikalische oder sonstige Ansätze erkennbar sind. Auch hier sind immer individuelle kreative Weiterarbeit und Vervollständigung erforderlich. Dabei werden immer mindestens einige Gestaltungs-

varianten entstehen, die zu einer auf gleichem Niveau ausgearbeiteten Form gebracht werden müssen, damit sie gegeneinander vergleichbar sind.
Denkpsychologisch nutzt der Problemlöser eine geordnete Struktur im semantischen Netz seines Wissens, das hierarchisch geordnet ist, wobei er unter ständigen Wechsel zwischen abstrakten und konkreten Vorstellungen seinen Suchvorgang optimiert. Durch Kataloge und Systematiken wird ein schemabasiertes Wissen günstig unterstützt.

Evaluation führt zu einer unerlässlichen Kontrolle des kreativen Ergebnisses in mehrfach Hinsicht, nämlich, erstens ob die Forderungen aus der Anforderungsliste erfüllt sind, was auf eine ja/nein Entscheidung hinaus läuft. (Gegebenenfalls kann es zu einer Abminderung von Forderungen führen, wenn an der betreffenden Lösungsvariante dennoch aus guten Gründen festgehalten werden soll.) Konstruktionsmethodisch stehen für eine erste Prüfung ein Auswahlverfahren nach Pahl/Beitz [3] zur Verfügung, das mit seinen ja/nein-Entscheidungen relativ einfach zu handhaben ist. Eine Lösungsvielfalt ist auf eine geringere Zahl gut geeignerter Lösungen zu reduzieren.

Zur Evaluation gehört zweitens die Feststellung des Wertes einer Lösung, nämlich in wie weit diese den Anforderungen der jeweiligen Aufgabe und allgemeine technisch-wirtschaftlichen Bedingungen erfüllt. Zur Feststellung des Wertes einer Lösung bieten sich konstruktionsmethodisch Bewertungsverfahren nach Kesselring bzw. VDI –Richtlinie 2225 [6] oder die Nutzwertanalyse der Systemtechnik [7] an. Bei allen Vergleichen und Bewertungen ist darauf zu achten, dass die Varianten annähernd zu einem gleichen Konkretisierungsgrad entwickelt sind, weil sonst deren Beurteilung nicht zutreffend möglich ist. Bewertungsunsicherheiten sollten in einer Spanne von vergebenen Punkten oder durch beigefügte Bemerkungen deutlich gemacht werden. Lösungen, die mit ihrer Wertigkeit deutlich unter 80 % liegen bedürfen in der Regel einer Verbesserung, besonders wenn bei der bevorzugten Lösung ein oder zwei Bewertungskriterien gegenüber den anderen nur gering bewertet wurden. Es ist das Prinzip einer ausgeglichenen Wertigkeitsverteilung zu verfolgen, um nicht bei der späteren Realisierung unliebsame Überraschungen zu erleben.

Denkpsychologisch entsprechen die Auswahl- und Bewertungsverfahren einer Metakognition, die stets für die Planungs-, Beobachtungs-, Kontroll- und Regulationsprozesse zuständig ist und auch eingesetzt werden muss.
Diese Metakognition wirkt aber nicht erst bei der Evaluation, sondern ihr ist während des gesamten Entwicklungsprozesses Raum zu gewähren, d.h. es ist vom Entwickler immer

wieder zu prüfen, ob sein jeweiliges Vorgehen und seine Auswahl von angewandten Methoden zweckmäßig ist. Fricke hat in seiner Dissertation [8] deutlich darauf hingewiesen, in dem er methodisches Konstruieren als einen flexiblen Problemlöseprozess kennzeichnete. Den kognitiven Begrenzungen wird bei Kenntnis der Gesamtaufgabe durch ein schrittweises Vorgehen mit einer sukzessiven Betrachtung von Teilproblemen und durch einen angemessenen Wechsel von Abstraktion und Konkretisierung begegnet. Die veröffentlichten Vorgehenspläne sind dabei Anhalt, was geschehen soll, aber keine strikten Vorschriften. Der Entwickler passt Vorgehen und Wahl der Teilmethoden flexibel an die jeweilige Problemlage an, ohne das Ziel und Gesamtvorgehen aus dem Auge zu verlieren. Jeder Formalismus an sich ist zu vermeiden.

Mit diesen Ausführungen wollte ich die Bedeutung des konstruktionsmethodischen Vorgehens für die Entwicklung der Denkweise eines kreativen Maschinenbauers nochmals deutlich machen. Mit ihr haben wir die gute Möglichkeit in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen der Denkpsychologie den Maschinenbauingenieur in seinen kreativen Fähigkeiten gut auszubilden und für vielfältige Entwicklungstätigkeit zu rüsten.

3.4 3D-CAD-Produktmodell

Mit der Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung hat sich nach anfänglichen Irritationen doch sehr rasch das 3D-CAD-Produktmodell durchgesetzt. Dieses rechnerinterne Modell bietet eine Reihe von Vorzügen gegenüber einer anfänglichen 2D-Darstellung. Mit dem 3D-Produktmodell wird die Konsistenz, d.h. eine verträgliche Vollständigkeit, sichergestellt. Aus ihm sind alle 2D-Ansichten und Schnitte automatisch ableitbar. Der Aufbau und Veränderung eine 3D-Produktmodells wird in der Regel durch ein Hybridsystem von körperorientierten und flächenorientierten Volumenmodellen realisiert [9]. Ein solches System gehört heute zum selbstverständlichen Handwerkszeug.

Zu seiner Benutzung gehört aber die Fähigkeit, die beabsichtigte Gestaltungsform mit Hilfe einer Freihandskizze vorher sich selbst vorzustellen oder anderen vorzulegen. Mit ihrer Anfertigung können die Generierungsstrategien am CAD-System besser erkannt und damit das Produktmodell zielgerichteter generiert werden, wenn auch heutige Systeme hinsichtlich ihrer Generierbarkeit und Änderbarkeit erheblich komfortabler geworden sind. Das bedeutet, dass die 3D-CAD-Ausbildung mit einer Ausbildung im Freihandzeichnen mit den wichtigsten Regeln von genormten Ansichten und Darstellungsarten einhergehen

muss. Die dann erlangte Fähigkeit des Freihandzeichnens kann dann auch sehr erfolgreich beim Brainstorming, Galeriemethode und Diskussionen im Team als Informationsmittel eingesetzt werden.

Eine gute Hilfe zwecks Zeitersparnis beim Konstruieren am Bildschirm sind die so genannten Feature, die ganze wiederkehrende Funktionsgruppen oder aber werkzeuggerechte Gestaltungszonen, wie genormte Einsenkungen, Bohrlöcher, Gewindebereiche u. ä., umfassen und schon im Rechner bereitgestellt sind. Solche Zonen zu definieren und programmieren ist für einen in der Ausbildung stehenden Maschinenbauer sehr lehrreich. Er wird dabei die Regeln für Baureihen- und Baukastensysteme lernen und anwenden müssen.

4 Bereitschaft zur Teamarbeit und Fremdsprachenkenntnis

In der heutigen Industriewelt wird vom künftigen Entwickler im Maschinenbau die Fähigkeit zur Zusammenarbeit in sehr verschiedener Form verlangt. Zum einen verlangt ein konstruktionsmethodisches Vorgehen eine Zusammenarbeit mit den Kollegen des eigenen Entwicklungsbereichs wie auch mit anderen Bereichen des Unternehmens, z. B. bei der Aufstellung der Anforderungsliste, der Durchführung gruppendynamischer Lösungssuche und dem Auswählen und Bewerten von Lösungen in einer Bewertungsgruppe. Insofern trägt schon ein konstruktionsmethodisches Vorgehen zur Teambildung bei.

Viele Entwicklungsprojekte können nur mit mehreren Bearbeitern in Form einer Aufgabenteilung durchgeführt werden, wobei der Einzelne für seinen Aufgabenteil verantwortlich, aber auch gleichzeitig durch frühzeitige Zusammenarbeit mit den anderen Kollegen für den nötigen Informationsfluss und gegenseitiger Abstimmung in den sich berührenden Grenzbereichen sorgen muss. Hier ist gute Führung wie aber auch der Wille zur Zusammenarbeit nötig.

Der Maschinenbau ist zum erheblichen Teil exportorientiert, d.h. er agiert global. Für die Beteiligten bedeutet dieser Umstand mindestens die Kenntnis einer Fremdsprache, besser eine zweite zur Ergänzung. Ein sich verlassen auf Dolmetscherdienste geht mindestens bei technischen Details gründlich daneben, verursacht hohe Kosten und verärgert den Kunden. Ein längerer Auslandsaufenthalt in Form eines Praktikums oder als Mitarbeiter in

einer Firma sollte in jedem Fall schon während des Studiums in den höheren Semestern oder nach dem Studium eingeplant werden.

5 Umsetzung der Empfehlungen

Die dargelegten Grundzüge einer maschinenbaulichen Ausbildung erfordern hinsichtlich der grundlagenorientierten Wissensvermittlung und einer hinreichenden Wahrnehmung von unterschiedlichen Anwendungsfächern einen flexiblen Studienplan ohne spezielles Fachrichtungsstudium von ausreichender Dauer. Die Vorstellung mit einem Bachelorabschluss nach 6 Semestern einen berufsfähigen Abschluss zu erzielen ist illusionär. Es sind hierzu mindestens 8 Semester zuzüglich einer Praktikantenzeit anzusetzen. Eine Umsetzung in das heutige Bachelor-Master-System an einer Technischen Universität ist im Gegensatz zum bisherigen Diplom-Studiengang nur mit gewissen Kaschierungen und einem geplanten Anfügen eines Master-Studienganges möglich. Das Erlangen von Credits reicht hierzu nicht. Im Studium erlangtes Wissen muss weitgehend in geeigneten Anwendungen selbständig umgesetzt werden.

Die im Studium vorgesehenen methodischen Anteile unterstützen die Ausprägung von individuellen Fähigkeiten, Probleme erfolgreich lösen zu können. Letzteres ist ein Markenzeichen guter Ausbildung im Maschinenbau.

Literatur

[1] Hampe, M.; Pahl, G. (Hrsg.) : Zur Geschichte des Maschinenbaus an der Technischen Universität Darmstadt. Düsseldorf: VDI-Verlag 2008.

[2] Pahl, G.: How to Educate Globally Oriented Engineers. Referat C.R.I.S.: Engineering in the Global Economy. Santa Barbara, Okt. 19-21 1998.

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

[4] Jänsch; J.: Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz. Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht. Dissertation TU Darmstadt. Düsseldorf: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Nr. 396.VDI-Verlag 2007

[5] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
VDI-Richtlinie 2222 (Blatt 1): Konzipieren technischer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1977

[6] VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Düsseldorf: VDI-Verlag 1977

[7] Zangemeister, Ch.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. München: Wittmannsche Buchhandlung 1970

[8] Fricke, G.: Konstruieren als flexibler Problemlöseprozess. Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen. Dissertation. Fortschritt-Berichte, Reihe 1, Nr.227, Düsseldorf: VDI-Verlag 1993

[9] Pahl, G.: Konstruieren mit 3D-Systemen. Berlin: Springer 1990

Konzeption und Entwicklung eines modular erweiterbaren Finite Elemente Programmsystems

Alexander Troll, Bernd Roith, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth
Universitätsstrasse 30, D-95447 Bayreuth
Email: Alexander.Troll@uni-bayreuth.de; Internet: http://www.konstruktionslehre.uni-bayreuth.de/

Inhalt: *Im Rahmen der Neu- und Weiterentwicklung von Funktionen in der Finiten Elemente Analyse (FEA) besteht der Bedarf für eine Integrationsplattform, die nicht nur eine effektive Ansteuerung neuer Codeteile ermöglicht, sondern auch eine schnelle und effektive Einbindung neuer Methoden in einen Simulationsworkflow ermöglicht.*

Am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD wurde basierend auf dem FE-System Z88 ein Programmsystem entwickelt, welches beide Konzepte miteinander vereint. Der zweigliedrige Aufbau des Systems ermöglicht mittels einer GTK+-basierten Oberfläche das gezielte Aufrufen beliebiger Codebausteine und Bibliotheken. Das Konzept soll im Rahmen dieser Ausarbeitung erläutert und seine Verbesserungspotentiale sollen aufgezeigt werden.

Abstract: *The development of new and advanced routines and functionalities for Finite Element Analysis calls for an integration platform that not only has the capability to include these functionalities but that can also provide a improved integration of these into simulation workflows.*

The department of engineering design and CAD has developed such a tool based on the FE-System Z88 that can cope with these requirements. A dual layered architecture with a GTK+-frontend calling the queried functions and libraries is shown and the potential for the improvement of finite element coding is lined out.

Stichwörter: *FEA, Softwareentwicklung, GTK+, Modulare Architektur*

Keywords: *FEA, software engineering, GTK+, modular architecture*

1 Simulationssysteme in der universitären Forschung

1.1 Verwendung von FE-Systemen an Forschungseinrichtungen

Die Verwendung von Systemen für die Finite Elemente Analyse [1] welche in der industriellen Praxis zum Standard geworden sind, dient in der universitären Forschung nicht nur zur Verifizierung von klassischen strukturellen Festigkeitsnachweisen, sondern, entsprechend dem Auftrag der Universitäten, zur Erarbeitung und Umsetzung neuer Erkenntnisse. Hierfür ist die Möglichkeit, neue Ideen in Algorithmen und Programme zu implementieren

unersetzlich. Daher kommen an forschenden Hochschulen nicht nur kommerzielle Computer Aided Engineering-Werkzeuge (CAx) [2] zur Anwendung sondern auch eigens implementierte Forschungssysteme, welche oft auch anderen interessierten Gruppen als Freeware oder Open Source zur Verfügung gestellt werden [3] [4]. Da das Hauptaugenmerk dieser Systeme auf dem Forschungseinsatz liegt, werden oft Erweiterbarkeit und Systemarchitektur vernachlässigt, was, als contradictio in adjecto, aber wiederum zu erschwerter Nutzbarkeit im Forschungseinsatz führt. Im Folgenden sollen FE-Systeme auf ihre Struktur und ihre Erweiterbarkeit untersucht und die Möglichkeiten zur Verbesserung an einem Beispiel aufgezeigt werden.

1.2 Tauglichkeit eines FE-Systems für den Forschungs- und Entwicklungseinsatz

Die Verwendung einer FE-Software, nicht nur im industriellen Umfeld zum Festigkeitsnachweis, sondern zum Einsatz in der Forschung erfordert, dass die Software bestimmte Kriterien erfüllt. Die Funktionsweise der Software insbesondere ihrer Rechenroutinen muss offen liegen und beeinflussbar sein, damit Ergebnisse sicher interpretiert und Fehlerquellen analysiert werden können (Zugänglichkeit). Dies ist wichtig für Vergleichsrechnungen, um Abweichungen in den Ergebnissen beurteilen zu können [5]. Gerade für den Einsatz in der Entwicklung neuer Verfahren ist eine Erweiterbarkeit des Systems, etwa um neue Materialmodelle, Bibliotheken für Gleichungslöser oder neue physikalische Modelle unentbehrlich. Diese Erweiterbarkeit muss, am besten in Verbindung mit einer schnellen Einbindung neuer Module in eine funktionale Oberfläche einhergehen. Des Weiteren müssen zur schnellen Korrektur von Fehlern Speicheranforderungen und Variablen eindeutig Funktionen zugeordnet werden können und ein gegenseitiges Beeinflussen der Bausteine vermieden werden (Kapselung und Fehlertoleranz).

2 Aufbau und Programmierung von FE-Systemen

2.1 Aufbau von Simulationsprogrammen

Der prinzipielle Aufbau eines FE-Systems, wie auch anderer CAx-Werkzeuge orientiert sich an dem Prinzip, dass diesen zugrunde liegt. Sie folgen dem EVA-Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe), welche sich bei Rechenzeit- und speicherintensiven Abläufen als vorteilhaft erwiesen hat [6]. Hierbei werden zunächst alle Daten für die notwendige Modellbeschreibung in einen Präprozessor eingegeben und nach Durchlauf des entspre-

chenden Gleichungslösers werden die Ergebnisse in einem Postprozessor visualisiert und entsprechend ausgewertet (Abb.1).

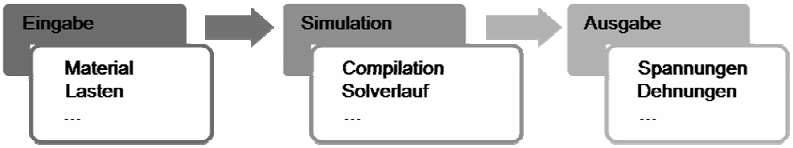


Abb. 1: EVA-Prinzip in der Finiten Elemente Analyse

Für den Aufbau eines solchen Systems bieten sich somit zwei Konzepte für einen zweckmäßigen Aufbau an: Als monolithisches oder als modulares System.

Der Aufbau eines monolithischen Systems, angelehnt an den monolithischen Kernel eines Betriebssystems, zeichnet sich dadurch aus, dass alle Routinen, die Speicherverwaltung und die Interaktion mit der Hardware in einem gemeinsamen Lademodul vorliegen. Es erfolgt also kein externer Aufruf oder die Einbindung von Bibliotheken. Dadurch wird Zeit eingespart welche für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten benötigt würde und die gemeinsame Speicherverwaltung ist einfacher zu handhaben. Nachteile sind hierbei, dass Fehler meist zu einem Absturz des Gesamtprogramms führen und die Erweiterbarkeit stark eingeschränkt ist. Änderungen müssen durchgängig in den gesamten Code eingepflegt werden und das gesamte Lademodul neu kompiliert und an Nutzer im Gesamten verteilt werden.

Modulare Systeme zeichnen sich durch eine Vielzahl einzelner Lademodule und Bibliotheken aus. Hierbei werden die einzelnen Teilprogramme meist von einem gemeinsamen Steuerprogramm (meist mit einer graphischen Benutzeroberfläche) aus aufgerufen, können aber auch bei Bedarf einzeln angesteuert werden. Änderungen in einzelnen Unterprogrammen oder Bibliotheken werde dadurch vereinfacht, die einzelnen Teile entkoppelt werden. Eine Neukompilation ist nur für die geänderten Module nötig, die Fehleranfälligkeit sinkt und die Fehlersuche im Rahmen des Delta Debugging [7] wird durch die Entkopplung vereinfacht. Nachteilig ist in diesem Fall die Zeit, welche über das Betriebssystem für die Kommunikation der Programmteile anfällt.

2.2 Programmierung mit Schwerpunkten

Neben dem prinzipiellen Aufbau des Programmes, welche hauptsächlich auf die Bedienbarkeit des Systems Einfluss nimmt, ist einer der Hauptaspekte der Architektur von Simu-

lationssystemen die verwendete Programmiersprache. Der Einfluss der Programmiersprache liegt hauptsächlich in der Geschwindigkeit mit der Rechenoperationen ausgeführt werden.

Hardwarenahe Programmiersprachen wie Assembler greifen auf alle verfügbaren Befehle für den Prozessor zu und nutzen diesen optimal, was aber mit einem Mangel an Portierbarkeit verknüpft ist, da ein Programm im zum jeweiligen Prozessor passenden Assemblercode geschrieben werden muss, denn ein Assemblerbefehl ist nur eine lesbare Darstellung eines einzelnen Maschinenbefehls.

Hochsprachen zeichnen sich dadurch aus, dass Maschinenbefehle mittels abstrakter für den Menschen interpretierbarer Befehle dargestellt werden [6]. Jeder dieser Befehle wird vom Compiler in eine Vielzahl von Maschinenbefehlen umgesetzt. Hier bietet zur Verbesserung der Probabilität die Möglichkeit an den Maschinencode erst zur Laufzeit zu erzeugen (z.B. C#) oder ihn zusätzlich in einer, von der tatsächlichen Hardware unabhängigen Virtuellen Maschine (z.B. Java) auszuführen. Diese Verbesserung der Kompatibilität wird mit Leistungseinbußen, durch die vermehrte Kommunikation und den Speicherbedarf der virtuellen Maschinen bezahlt, welche für rechenintensive Programme nicht toleriert werden kann. Den Königsweg stellen in diesem Fall Sprachen wie ANSI-C oder FORTRAN (FORmula TRANslation) dar, da sie über die Lesbarkeit einer Hochsprache verfügen, die maschinenspezifischen Compiler aber fertigen und schnellen Maschinencode erzeugen (C ist ein „portabler Assembler“). Aus Gründen der Verbreitung wird heute weitestgehend C genutzt obwohl noch viele FE-Systeme auf FORTRAN aufbauen [8]. Getrennt von den Fragen der Rechenroutinen muss die Graphische Benutzeroberfläche gesehen werden. Hier können bei entsprechender Abkopplung von den Rechenroutinen Leistungseinbußen zugunsten eines Gewinnes bei der Erweiterbarkeit und der Nutzerfreundlichkeit in Kauf genommen werden. Als mögliche Lösungen kommen Oberflächen, welche in GTK+ oder mittels Java-Toolkits wie Swing erstellt wurden,in Betracht. Hier müssen in erster Linie die Mittel gewählt werden welche eine möglichst gute Umsetzung der DIN 9241-110 [9] ermöglichen und die schlüssige Interaktion zwischen Mensch und Programm unterstützen.

3 Das FE-System Z88

Das kompakte Finite Elemente Programm Z88 wurde von Prof. Dr.-Ing Frank Rieg im Rahmen der Forschungsarbeit am Lehrstuhl beständig weiterentwickelt und die aktuelle Version 13 steht als Open Source Programm zur Verfügung [10]. Es verfügt über ver-

schiedene Gleichungslöser für linear statische Analysen und kann sowohl Struktur- als auch Kontinuumselemente verwenden. Z88 folgt dem in Kap. 2.1 dargestellten EVA-Prinzip. Z88 findet am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD in den folgenden Gebieten Anwendung:

- **Lehre:** Aufgrund der Möglichkeit Strukturen direkt von Hand einzugeben ist es geeignet um Studenten frühzeitig in der grundlegenden Anwendung von FE-Programmen zu unterweisen. Aufgrund der Freiheit des Quellcodes bietet es sich an, um in höheren Semestern die theoretischen und nummerischen Hintergründe von Simulationen zu vermitteln.
- **Vergleichsrechnung:** Da alle Abläufe in Z88 bekannt sind, kann die Ergebnisgüte abgeschätzt werden. Dadurch ist es möglich Vergleiche und Bewertungen mit den Ergebnissen kommerzieller Programmpakete durchzuführen.
- **Forschung:** Im Rahmen der individuellen Forschung und von Forschungsprojekten lassen sich neue Routinen in den offenen Quellcode einbinden.

Besagter dritter Punkt führte zu einer genauen Analyse der Version 13 von Z88 nach den in 1.2 aufgestellten Kriterien. Die Untersuchung lieferte, grob umrissen, die folgenden Ergebnisse. Während die beiden Punkte Offenheit des Systems und Modifizierbarkeit als prinzipiell gegeben feststehen, wurden in den verbliebenden Kriterien Defizite festgestellt. Die einzelnen monolithischen Programmteile, welche von einem Basismodul aus aufgerufen werden bieten nicht die Möglichkeit einzelne Programmteile schnell zu ersetzen, sondern es muss jeweils das komplette Lademodul neu erzeugt werden. Die Verknüpfung einzelner Quellen miteinander im Sinne der gemeinsamen Nutzung von Speicher und Variablen führen zu einem erschwerten Überblick über die Auswirkung auch von kleinen Änderungen am Quellcode. Des Weiteren erschwert die Programmierung in der Win-API das schnelle, situationsgerechte Hinzufügen und Entfernen von funktionsgebundenen Bedienelementen. Somit wurde eine Konzeptstudie zur Verbesserung des bestehenden Systems als gerechtfertigt erachtet.

4 Neukonzeptionierung des Simulationsprogramms Z88

Im Rahmen der Neukonzeptionierung wurde die bestehende Struktur von Z88 aufgelöst (Abb.2). Eine neue gemeinsame und leicht zu verändernde Oberfläche in GTK+ bietet die Möglichkeit neue Module schnell in entsprechende Reiter einzubinden. Die einzelnen Be-

standteile des Quellcodes wurden modularisiert, die Variablen und das Speichermanagement unabhängig gemacht und einzelne Funktionsgruppen als eigenständige Bibliotheken ausgeführt. Hier kommt weiterhin aus Geschwindigkeitsgründen ANSI C zum Einsatz.

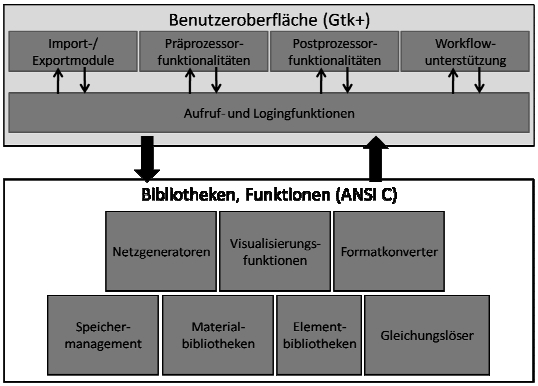


Abb.2: Modulare Neukonzeption von Z88 Aurora

Die Aufrufe der einzelnen Module und das Allokieren des zugehörigen Speichers erfolgt zeitgerecht und unabhängig von anderen Aktionen. Hierfür wurden die bereits vorhandenen Gleichungslöser und andere grundlegende Module entsprechend aufbereitet. Neue Funktionen können nun unabhängig von der Gesamtsoftware entwickelt werden, solange die entsprechenden Ein- und Ausgabedaten vorliegen. Eine Einbindung in die Benutzeroberfläche ist in kürzester Zeit möglich, ebenso eine Steuerung welche Funktionen bei Aufruf aktiv sind. Eine Aktualisierung einzelner Module ist bei Auslagerung in Bibliotheken ohne eine Neukompilation der anderen Komponenten möglich.

5 Vergleich der Systeme

Aktuell ist ein Vergleich nur vom Standpunkt des Entwicklers aus möglich, da entsprechende Tests mit Anwendern noch ausstehen. Bezogen auf die in 1.2 genannten Kriterien für die Einsetzbarkeit eines FE-Systems im Umfeld der universitären Forschung ergibt sich, aus der Sicht des Programmierers, folgendes Ergebnis:

Tabelle 1: Übersicht des Systemvergleichs. – sehr negativ, - negativ, o neutral, + positiv, ++ sehr positiv; Bezogen auf die Aussagen von sechs Entwicklern.

Merkmal	Z88 V13	Z88 Aurora
Zugänglichkeit		
Offenheit des Quellcodes	++	++
Beeinflussbarkeit der Routinen	++	++
Erweiterbarkeit		
Integration auf Codeebene	O	+
Einbindung auf Nutzerebene	-	+
Kapselung und Fehlertoleranz		
Trennung der Module	O	++
Gegenseitige Beeinflussung	-	-

Während insbesondere im Bereich der einfachen Erweiterbarkeit Verbesserungen erzielt werden konnten, ist es trotz einer verbesserten Trennung der einzelnen Bausteine nicht möglich die, in der FEA gegebene, gegenseitige Beziehung der einzelnen Teilberechnungen zu Eleminieren.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Das vorgestellte Konzept einer modularen FE-Software für den Einsatz in der universitären Forschung bietet noch viel Verbesserungspotential ist aber bereits ein Schritt hin zu einer einfachen Einbindung neuer Inhalte in das bestehende Programm. Damit kann es dem Entwickler ermöglicht werden seine Zeit für die Umsetzung und Verbesserung der Rechenroutinen und nicht für eine Integration in das Softwarepaket aufzuwenden. Die tatsächliche Leistungsfähigkeit im Einsatz muss in folgenden Studien aber noch nachgewiesen werden. Insbesondere sollte hierbei die Gestaltung der Oberfläche bezüglich einer Usability-Studie evaluiert werden, um Rückschlüsse auf die Stimmigkeit des integrierten vorgegeben Workflows zu erlauben. Hierfür bietet sich ein entsprechender Einsatz in der Lehre an, da auf diese Weise über den Lehrstuhl jährlich bis zu 200 Personen einbezogen werden können, deren Kenntnisstand die Spanne zwischen FE-Anfänger und Nutzer mit Hintergrundwissen variiert.

Literatur

[1] Bathe, K.-J., Zimmermann, J.: *Finite Elemente Methoden.* 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

[2] Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: CAx-für Ingenieure: *Eine praxisbezogene Einführung*. 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2007.

[3] Dhont, G.; Wittig, K.: *Calculix-Homepage*. http://www.calculix.de. Letzte Aktualisierung: 08.2009.

[4] N.N.: *Code Aster-Homepage*. http://www.code-aster.org. Letzte Aktualisierung: 7. 2009

[5] Roith, B.; Troll, A.; Rieg, F.: *Integrated Finite Element Analysis (FEA) in Three-Dimensional Computer Aided Design Programs (Cad) - Overview and Comparison*. In: Proceedings of ICED 07. Paris: The Design Society, 2007.

[6] Rießinger, T.: *Informatik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Eine anschauliche Einführung in das Programmieren mit C und Java*. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

[7] Zeller, A.: *Yesterday my programm worked. Today it does not. Why?*. In: Proceedings of the Joint 7th European Software Engineering Conference (ESEC). Toulouse: Springer-Verlag, 1999.

[8] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: *Softwaretechnik für Ingenieure – Eine leicht verständliche Einführung*. München: Hanser Verlag, 2001.

[9] N.N.: *DIN EN ISO 9241-110 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Berlin: Beuth Verlag, 2006.

[10] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure. Eine leicht verständliche Einführung.*2.Auflage. München: Hanser Verlag, 2009.

Arbeitsraum-Untersuchungen an einem Industrieroboter für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Hüftendoprothesen

Kliewe C*, Souffrant R, Kähler M***, Brökel K*, Bader R**, Woernle C*****

* Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/ CAD, Universität Rostock
** Orthopädische Klinik, Universität Rostock
*** Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik, Universität Rostock
Albert Einstein Str. 2, D-18059 Rostock
Email: christian.kliewe@uni-rostock.de; Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Zur Bestimmung der Luxationsanfälligkeit von Hüftendoprothesen ist die Einbeziehung der Wirkung der Weichteilumgebung des Gelenks relevant. Mit dem an der Universität Rostock im Aufbau befindlichen Luxationssimulator HiLuX sollen Fragestellungen zum Luxationsverhalten bei Variation von operativen und konstruktiven Parametern untersucht werden, wobei das Hardware-in-the-Loop-Konzept (HiL) zur Anwendung kommt. Die Bewegungen und Belastungen im künstlichen Hüftgelenk werden durch einen Industrieroboter aufgebracht. Die aufzubringenden Gelenkkräfte werden mit Hilfe eines biomechanischen Mehrkörpermodells unter Berücksichtigung der Weichteile numerisch ermittelt und an die Robotersteuerung übergeben. In der vorliegenden Studie wird die Positionierung der Endoprothesenkomponenten so ermittelt, dass die erforderlichen Bewegungen im Arbeitsraum des Roboters liegen.*

Abstract*: After total hip replacement the consideration of the surrounding soft tissue is relevant for the determination of the risk of dislocation of the artifical joint. At the University of Rostock the novel dislocation simulator HiLuX is built up to investigate the influence of substantial design parameters of the total hip implants and their position in the pelvis and the femur, respectively. The simulator is based on the hardware-in-the-loop (HiL) concept. The movements and the loads in the hip joint are realized by the industrial robot. The applied joint forces are calculated by means of a biomechanical multibody model under consideration of the soft tissues and transferred to the robot controller. In this study the position of the components of the endoprothesis is determined in such a manner that the required movements are within the robot workspace.*

Stichwörter: *Hüftendoprothesen, Luxation, Biomechanik Hardware-in-the-Loop-Simulation*

Keywords: *Total hip replacement, dislocation, biomechanics, hardware-in-the-loop simulation*

1 Einleitung

Die Luxationsanfälligkeit von Hüftendoprothesen wird durch eine Vielzahl geometrischer Parameter sowie die Einflüsse der gelenkumschließenden Strukturen beeinflusst. Neben dem speziellen Design spielt die Positionierung der Prothesenkomponenten eine große Rolle, da hierdurch der ROM (Range of Motion) bis zum Anschlagen der Komponenten,

dem sog. Impingement, wesentlich bestimmt wird. Mit dem Luxationssimulator HiLuX (Gebrauchsmuster 20 2009 002 316.8) sollen Fragestellungen zum Einfluss des Designs der Endoprothesen und ihrer Positionierung in der Pelvis bzw. im Femur hinsichtlich Stabilität und Luxationsrisiko geklärt werden. Darüber hinaus soll die beim operativen Eingriff unvermeidbare Schädigung der Weichteile beurteilt werden, so dass aus diesen Erkenntnissen Empfehlungen für den besten operativen Zugang abzuleiten sind. Im Luxationssimulator HiLuX werden die Bewegungen und Belastungen im künstlichen Hüftgelenk durch einen Industrieroboter aufgebracht. Die aufzubringenden Gelenkkräfte werden mit Hilfe eines biomechanischen Mehrkörpermodells unter Einbeziehung der Weichteile numerisch ermittelt und an die Robotersteuerung übergeben. In der vorliegenden Studie wird die Positionierung der Prothesenkomponenten so ermittelt, dass die erforderlichen Bewegungen im Arbeitsraum des Roboters liegen.

2 Konzept und Versuchsaufbau

Bei der Hardware-in-the-Loop-Simulation wird das Verhalten einer realen Systemkomponente in einer auf einem Prozessrechner simulierten Umgebung untersucht. Die reale Systemkomponente und der Prozessrechner mit dem Simulationsmodell bilden einen Regelkreis. Bei dem Luxationssimulator HiLuX stellt die Endoprothese die reale mechanische Komponente dar, während die anatomische Umgebung mit den Muskel-, Bänder- und Weichteilstrukturen in einem Mehrkörper-Simulationsmodell (MKS) abgebildet ist. Die Kopplung zwischen dem Simulationsmodell und der zu untersuchenden Endoprothese erfolgt durch ein Aktuatorsystem, hier der Industrieroboter, und durch Sensoren, hier die Lage- und Kraftsensoren des Roboters. Die hier realisierte Verknüpfung des Simulationsmodells mit einer realen Endoprothese geht über die Visualisierung der Simulationsergebnisse hinaus, weil die in der Endoprothese real auftretenden Belastungen für die jeweilige Gelenkstellung durch Messungen erfasst werden. Somit sind auch Einflüsse der Gelenkreibung und insbesondere die Einflüsse der Prothesengeometrie erfassbar, da beim Luxieren die Gelenkbindung verloren geht und der Kugelkopf aus der Gelenkpfanne auswandert. Diese Lageänderung sowie zusätzliche Momente beim Heraushebeln des Prothesenkopfs werden vom Roboter erfasst und gehen als Eingangsgrößen in das Simulationsmodell ein. Der folgende Simulationsschritt erfolgt somit mit der aktuellen Lage des Prothesenkopfs und den damit einhergehenden Kräften aus der Weichteilumgebung.

2.1 Simulation der Gelenkbewegungen und Realisierung mittels Roboter

Die Beschreibung von konkreten Bewegungen des Gelenks erfolgt auf Grundlage der Achsdefinitionen und der Drehfolge nach FDIS ISO 14242 [1]. Daraus wird eine gedachte kinematische Kette abgeleitet, mit deren Hilfe auch überlagerte Bewegungen aus Flexion/ Extension, Abduktion/ Adduktion und Innen-/ Außenrotation beschrieben werden können (Bild 1). Als luxationskritisch werden insbesondere überlagerte Bewegungen aus Flexion und Innenrotation oder Außenrotation und Adduktion eingeschätzt [2].

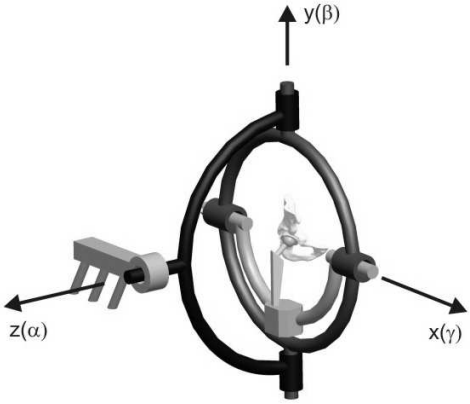


Bild 1: Kinematische Kette zur Beschreibung der Hüftbewegung

Für die HiL-Simulationen wird ein Aktuatorsystem mit einem den natürlichen Grenzen entsprechenden Bewegungsumfang von bis zu 130 Grad benötigt. Hierzu wird ein sechsachsiger Industrieroboter des Typs STÄUBLI TX 200 (Stäubli AG, CH-Horgen) eingesetzt, der auf Grund seiner universellen Kinematik einen großen rotatorischen Arbeitsraum besitzt. Mit Hilfe von Bewegungssimulationen mit dem MKS-Programm ADAMS (Version 2007R1, MSC Software Corporation, Santa Ana, USA) wird in der vorliegenden Studie nachgewiesen, dass bei einer raumfesten Anordnung der Gelenkpfanne mit dem Roboter die benötigten Bewegungen realisiert werden können. Hierbei werden zwei grundsätzliche Varianten betrachtet. Bei einer Anordnung der Hüftpfanne derart, dass die Pfannenöffnung nach oben zeigt, können die erforderlichen Bewegungen bis zum Impingement und darüber hinaus problemlos realisiert werden. Vor allem aus Gründen einer anschaulichen Versuchsanordnung ist es jedoch wünschenswert, die Pfanne entsprechend ihrer Lage beim stehenden Menschen anzuordnen. Die zwei Neigungswinkel der Achse der Hüftpfanne (Inklination und Anteversion gemäß radiographischer Definition nach Murray [3]) sowie die

Verdrehung des Prothesenstiels im Femur um die Longitudinalachse (Antetorsion) können dann anschaulich dargestellt werden. Im Zusammenspiel mit der dreiachsigen Bewegung des Femur wäre bei einer Einbaulage, welche nicht der anatomischen Anordnung entspricht, die Nachvollziehbarkeit stark eingeschränkt.

Die Arbeitsraumuntersuchungen zeigen zunächst, dass der Roboter die geforderten Bewegungsbahnen nicht uneingeschränkt abfahren kann, da insbesondere die Endlagen in Richtung Flexion bis 130 Grad nicht erreicht werden. Der begrenzende Faktor ist der relativ kleine Schwenkwinkel von Handachse 5 mit ± 120 Grad.

Bei der Bewegungsplanung des Roboters ist die Konfiguration der kinematischen Kette zu beachten. Hierunter werden die verschiedenen Stellungen der kinematischen Kette verstanden, mit denen eine gegebene Lage des Endeffektors erreicht werden kann. Der sechsachsige Knickarm-Roboter der vorliegenden Bauart besitzt im Regelfall acht Konfigurationen. Der Wechsel zwischen diesen Konfigurationen führt stets über eine singuläre Stellung der kinematischen Kette, in welcher der Endeffektor nicht mehr in jede gewünschte translatorische oder rotatorische Richtung bewegt werden kann. Bereits in der Umgebung einer singulären Stellung treten große Gelenkgeschwindigkeiten auf. Aus diesem Grund sollten die erforderlichen Bewegungen des Gelenks innerhalb einer Konfiguration des Roboters realisiert werden. Im Folgenden werden exemplarisch zwei Konfigurationen betrachtet. Bei der ersten Konfiguration, in welcher der Roboterarm 2 in der Ausgangslage etwa waagerecht steht, ist ein ausreichender Bewegungsumfang gegeben (Bild 2 links). Jedoch besteht die Gefahr, dass die Handachsen 6 und 4 in eine singuläre Lage gelangen. Es ergeben sich dann große Drehgeschwindigkeiten, die von den Antrieben dieser Achsen nicht realisiert werden können.

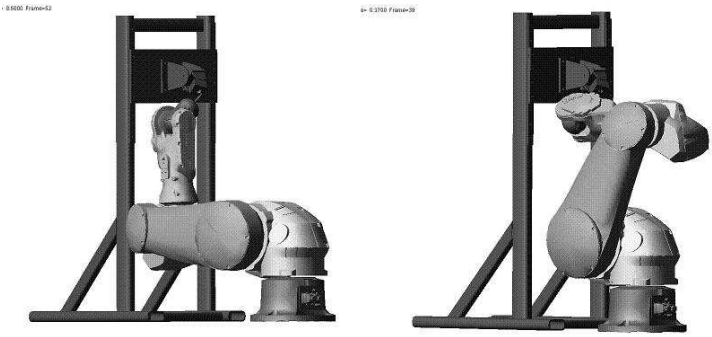


Bild 2: Startkonfiguration des Roboters mit unterschiedlicher Stellung von Arm 2

In der zweiten Konfiguration steht der Arm 2 in der Ausgangslage der Bewegung etwa senkrecht (Bild 2 rechts). Durch die zunächst willkürliche Festlegung, den Prothesenstiel in die Handachse 6 zu legen, kann eine Anordnung gefunden werden, bei der die geforderten Schwenkwinkel bis zum Impingement erreicht werden. Auf Grund der Tatsache, dass zur Untersuchung der Luxationsstabilität über die Anschlagstellungen hinaus geschwenkt werden soll, ist aber auch diese Konfiguration nicht geeignet. Daher wurde festgelegt, den Prothesenstiel um minimal 30 Grad in Richtung Adduktion gegenüber der Handachse 6 zu verdrehen (Bild 3), wodurch der Schwenkwinkel der Handachse 5 im zulässigen Bereich liegt.

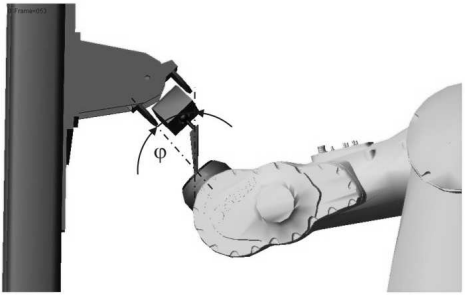


Bild 3: Anordnung des Prothesenstiels am Werkzeugflansch des Roboters

Dies führt zu einem ausgeglichenen Winkelverlauf für alle Roboterachsen (Bild 4), wobei für eine Laufzeit der Bewegung von einer Sekunde auch die berechneten Winkelgeschwindigkeiten von den Roboterantrieben realisiert werden können.

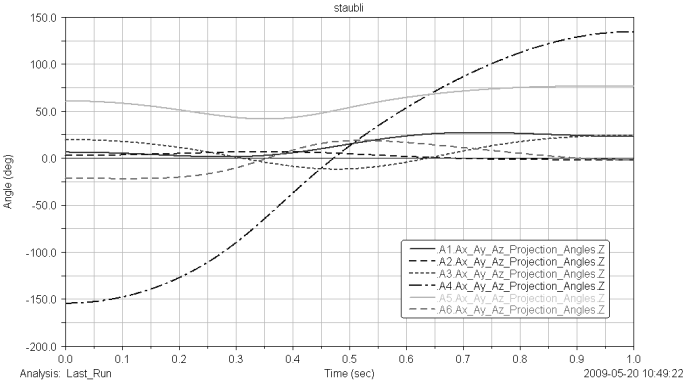


Bild 4: Verläufe der Achsdrehwinkel bei einer Bewegung von 130 Grad Flexion bis 50 Grad Extension

Kopplung von Bewegungs- und Kraftsimulation

Zur Realisierung der in der MKS berechneten Kraftverläufe für bestimmte Bewegungsbahnen ist eine hybride Kraft-Lageregelung des Roboters notwendig. Eine hybride Kraft-Lage-Regelung bedeutet, dass der Roboter in den freien Richtungen lagegeregelt und in den gesperrten Richtungen kraftgeregelt betrieben wird. In den kraftgeregelten Richtungen wird solange der Endeffektor nachgeführt, bis sich die vorgegebene Kraft einstellt, was mit einer Lageänderung einhergeht (Bild 5).

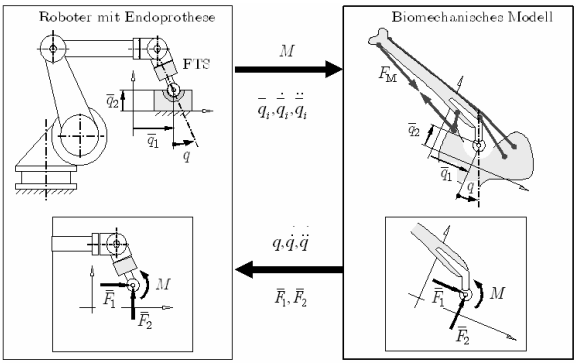


Bild 5: Kopplung von Roboter und MKS-Modell für die HiL-Simulation

Eine klare Trennung von kraftgeregelten und lagegeregelten Achsen ist nicht möglich, weil zur Ausführung einer Bewegung des Endeffktors in einer Richtung mehrere Roboterachsen beteiligt sein können. Die zu realisierenden Drehwinkel am Gelenk gehen direkt in die Rückwärtstransformation ein. In den gesperrten translatorischen Richtungen werden Verschiebungen in Kraftrichtung vorgegeben. Diese Drehungen und Verschiebungen werden mittels der Rückwärtstransformation auf die Achswinkel des Roboters umgerechnet. Mit der am Kraft-Momenten-Sensor erfassten, tatsächlich im künstlichen Hüftgelenk angreifenden Kraft kann über eine Korrektur der Verschiebungen die Kraft im numerischen Modell abgeglichen werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Das hier vorgestellte neuartige HiL-Konzept zur Testung von Hüftendoprothesen hinsichtlich der Luxationsneigung ist äußerst komplex. Ausgehend von grundlegenden Definitionen zur Beschreibung der Gelenkbewegungen und deren Realisierung mittels eines Industrieroboters stellt insbesondere die Bereitstellung biomechanischer Daten eine be-

sondere Herausforderung für die Generierung des Simulationsprogramms dar. Das für die Vorstudien verwendete MKS-System AnyBody® verfügt nicht über die Schnittestellen für den schrittweisen Datenaustausch mit dem Simulationsrechner. Deshalb sollen geeignete MKS-Systeme wie z.B. Mobile® oder SimPack® Verwendung finden. Die Kernfrage des HiL-Simulationskonzeptes ist die speziell zu entwickelnde hybride Kraft-Lage-Regelung. Dazu sind geeignete Schnittstellen zwischen dem Simulationsrechner sowie dem Steuerungsrechner des Roboters zu schaffen, um den schrittweisen Datenaustausch in Echtzeit realisieren zu können.

Literatur

[1] Wu G, Siegler S, Allard P, Kirtley C, Leardini A, Rosenbaum D, Whittle M, D'Lima D, Cristofolini L, Witte H, Schmid O, Stokes I: ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I, Journal of Biomechanics, 2002; 35(4): 543

[2] Bader R, Scholz R, Steinhauser E, Busch R, Mittelmeier W: Methode zur Evaluierung von Einflussfaktoren auf die Luxationsstabilität von künstlichen Hüftgelenken. Biomed Tech (Berl), 2004; 49(5): 137-44

[3] Murray D.W: Definition and measurement of acetabular orientation, J Bone Joint Surg Br. 1993, 75: 228-232

[4] Kähler M, Woernle C, Bader R, Hardware in the Loop Simulation of Constraint Elements in Mechanical Systems, Computational Kinematics, Duisburg 2009

Anwendung der Rapid-Prototyping-Technologie für Kleinserien im Explosionsschutz

Dipl.-Ing. Ramona Träger, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote,
Prof. Dr.-Ing. Uwe Klausmeyer*, Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Engelmann**

Institut für Maschinenkonstruktion, OvGU Magdeburg
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg
Email: Ramona.Traeger@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/
* Fachbereich 3.5 Zünddurchschlagsprozesse, PTB Braunschweig
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig
Email: Uwe.Klausmeyer@ptb.de; Internet: http://www.ptb.de
** Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen, FH Jena
Carl-Zeiss-Promenade 2, D-07745 Jena
Email: frank.engelmann@fh-jena.de; Internet: http://www.wi.fh-jena.de

Inhalt: *Polymerwerkstoffe, die mittels Vakuumgießen verarbeitet werden, besitzen andere Werkstoffeigenschaften als Werkstoffe der „herkömmlichen" Ur- und Umformverfahren. Die zur Fertigung von explosionsgeschützten Gehäusen eingesetzten Werkstoffe müssen jedoch grundsätzlich die Anforderungen der jeweiligen Zündschutzart erfüllen. Bei druckfest gekapselten Gehäusen werden die Gehäusewandungen durch impulsartige Druck- und Temperaturspitzen sowie heiße reaktive Abgase belastet, die durch Explosionen im Gehäuse hervorgerufen werden können. Die Flammenfront und die Explosionsabgase strömen in konstruktionsbedingte Spalte und können diese erodieren. Als Folge kann ein Spalt so stark vergrößert werden, dass dessen flammenlöschende Wirkung nachlässt und die umgebende explosionsfähige Atmosphäre entzündet werden kann. Ein Konstruktionswerkstoff muss dieser Beanspruchung sicher standhalten. Ob und in wie weit die Anforderungen an die Werkstoffe der RP-Verfahren erfüllt werden, soll im Rahmen des angelaufenen DFG-Forschungsprojektes konstruktionsmethodisch für verschiedene geometrische und stoffliche Parameter untersucht werden.*

Abstract: *Thermosetting polymers, which can be used for vacuum casting, have different material characteristics compared to typical thermoplastic and thermosetting materials used for common production processes like e.g. injection moulding. The polymers must by all means fulfil the specific requirements for flameproof enclosures. This type of protection allows an explosion inside the enclosures leading to high thermal and pressure loads. The hot exhaust gases enter inevitable gaps, which can be eroded. This is especially the case if thermosetting polymers are used. This would of course limit the quenching ability of the enclosure leading to a flame transmission into the outer atmosphere. The material of the enclosure has, therefore, to withstand the specific loads in all cases. Within a research project funded by the Deutsche Forschungsge-*

meinschaft (German Research Foundation) it will be examined, what type of thermosetting polymers fulfil the specific requirements using systematic engineering design and product development processes.

Stichwörter: *Rapid-Prototyping, Vakuumgießen, Explosionsschutz, Druckfeste Kapselung.*

Keywords: *rapid-prototyping, vacuum casting, explosion protection, flameproof enclosure.*

1 Einleitung

1.1 Rapid-Prototyping

Der Nutzungsschwerpunkt von RP-Modellen lag bisher in der Visualisierung und dadurch in der Beschleunigung der Produktentwicklung. Die Randbedingungen in der Produktentwicklung veränderten sich in den letzten Jahren zunehmend. Die Vielfalt der Produkte wächst immer stärker, gleichzeitig verringern sich die Produktlebenszyklen. Dadurch werden häufig kleinere Losgrößen von der Industrie verlangt und die Produzenten müssen diesem Trend gerecht werden. Diese zwei Gründe fördern den Bedarf des produzierenden Gewerbes nach generativen Fertigungsverfahren, mit denen es möglich ist, Werkzeuge und serienähnliche Endprodukte herzustellen. Die so erzeugten Produkte werden in einzelnen Industriezweigen bereits in Maschinen verbaut und verkauft.

Generative Fertigungsverfahren ermöglichen durch die Technologie des Rapid Prototyping, neben dem herkömmlichen Prototypenbau, die Herstellung serienfertiger Produkte (Rapid Manufacturing) bzw. Werkzeuge (Rapid Tooling), mit denen Serienprodukte hergestellt werden können. Auch für die Branche der Hersteller explosionsgeschützter Betriebsmittel stellt die Nutzung dieser Technologien ein Entwicklungspotential dar, denn für derartige Anwendungen sind häufig nur kleine Fertigungschargen zu verzeichnen (Kleinst- und Kleinserienfertigungen). Der Hauptgrund hierfür liegt in der individuellen Anpassung der Produkte an die Kundenwünsche. Die bisherigen für derartige Produkte genutzten Fertigungstechnologien sind das Fräsen und der Spritzguss. Der Spritzguss erfordert einen hohen Aufwand bei der Fertigung des Werkzeugs und ist daher sehr kostenintensiv.

Auf dem Weltmarkt werden verschiedene Rapid-Prototyping-Technologien (RP-Technologien) angeboten. Der Lehrstuhl Konstruktionstechnik wendet die wichtigsten Verfahren an, insbesondere das Objet-Verfahren von Objet Geometries Ltd. seit 2005. Erweitert wird diese RP-Technik durch eine vorhandene Vakuumgießanlage UGM 400A der Firma Schüchl. Insbesondere gießbare Duroplaste werden so unter Vakuum in eine Silikonkautschukform gegossen, anschließend ausgehärtet und entformt. Zur Silikonformherstellung können als Urmodelle z. B. Objetmodelle genutzt werden. Durch diese Vorausset-

zungen bietet es sich geradezu an, Serienteile über Vakuumgießen herzustellen. Weitere ökonomische und konstruktive Gründe sprechen für den Einsatz dieser Technologie; hierzu zählen die kostengünstige und schnelle Formherstellung, hohe Flexibilität bei der Konzipierung der Gießform, leichte Entformbarkeit, hohe Genauigkeit der Abgüsse, das Einbinden von Norm- und Formteilen während des Gießvorganges, die Herstellung transparenter, glasfaserverstärkter, farbiger und/oder gummiartiger Abgüsse und die Fertigung von seriennahen Modellen.

Anhand von durch Vakuumgießen hergestellten Probekörpern aus Duroplasten soll eine Aussage über die Eignung von Polymerwerkstoffen im Explosionsschutz getroffen werden. Wobei insbesondere die Anwendbarkeit dieser Werkstoffe als Wandmaterial druckfest gekapselter Gehäuse zu prüfen und deren Randbedingungen zu bestimmen sind.

1.2 Polymerwerkstoffe im Explosionsschutz

Zur Verwendung von Polymerwerkstoffen im Explosionsschutz existiert lediglich eine Arbeit aus dem Jahr 1989 [1]. In diesem Bericht wurde anhand von Probescheiben aus Polymerwerkstoffen der Einfluss künstlicher Alterung auf das Verhalten von Polymerwerkstoffen bei mehrfacher Explosionsdruckbelastung untersucht. Ebenfalls wurden konstruktionsbedingte Spalte betrachtet. Dazu wurden Versuche durchgeführt, bei welchen heiße Abgase durch Spalte strömten. Die Gase formten dabei Erosionsstellen, so dass nach mehreren Versuchen ein Zünddurchschlag beobachtet werden konnte. In dieser Arbeit wurde darauf hingewiesen, dass erst eine optimale Spaltgeometrie gefunden werden muss, ehe solche Konstruktionen in den Normen berücksichtigt werden und somit der Industrie zur Verfügung gestellt werden können. Seit 1989 wurden zahlreiche hochbelastbare Polymerwerkstoffe entwickelt, die mit verbesserten thermischen und mechanischen Eigenschaften der Industrie zur Verfügung stehen und deshalb in die Untersuchungen mit einbezogen werden.

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurde der Spalt als zylindrischer oder flacher Spalt untersucht. Jedoch die Werkstoffeigenschaften des Polymerwerkstoffes wurden nicht in die Untersuchungen einbezogen. Die Betrachtungen zum flachen oder zylindrischen Spalt sind aus diesem Grund nicht ausreichend, denn das Ziel besteht darin, den Zünddurchschlag zu verhindern. Die Ergebnisse der vereinfachten Modelle geben nur Hinweise zu Länge oder Breite des Spaltes. Andere Geometrien, wie labyrinthartige Spalte oder Spalte mit verän-

derlichem Querschnitt, haben ebenfalls Auswirkung auf den Zünddurchschlag, wurden jedoch bisher nicht untersucht.

Für die Konstruktion eines Gehäuses der druckfesten Kapselung müssen zwei Normen beachtet werden. Zum einen die DIN EN 60079-0 [2], in der die allgemeinen Anforderungen an elektrische Betriebsmittel in explosionsgefährdeten Bereichen beschrieben werden und zum anderen die DIN EN 60079-1 [3], die die speziellen Anforderungen an die „Druckfeste Kapselung“ enthält.

2 Anforderungsprofil an Polymerwerkstoffe für Gehäuse der Zündschutzart „druckfeste Kapselung“ und Auswahl

2.1 Beanspruchungsanalyse und Ableitung der Versuche

Die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ ist dadurch gekennzeichnet, dass mögliche Zündquellen elektrischer Geräte oder gesamte Baugruppen innerhalb eines druckfesten Gehäuses von der Umgebung gekapselt werden. Eine Explosion beschränkt sich auf das Innere des Gehäuses. Dieses ist so ausgelegt, dass einer Explosion standhält. Auch die nach außen tretenden heißen Abgase (Freistrahl), die bei einer Verbrennung entstehen und durch konstruktiv bedingte Spalte nach außen gelangen können, dürfen die außerhalb befindliche explosionsfähige Atmosphäre nicht entzünden. Tritt dies dennoch ein, kommt es zum so genannten Zünddurchschlag (ZDS). Dieser muss unter allen Umständen vermieden werden, da sonst ein erhebliches Zerstörungsrisiko für Mensch und Technik in der Umgebung besteht.

Bei einer Explosion im Inneren eines Gehäuses wirken hohe Belastungen auf das Wandmaterial. Bei Explosionen werden Drücke von etwa 7 bis 10 bar aufgebaut [4], der so genannte Bezugsdruck. Dieser resultiert laut [5] aus einem Druckanstieg, der aufgrund einer Verbrennung eines Brennstoff-Luft-Gemisches in einem geschlossenem adiabaten Behälter hervorgerufen wird.

Das erste von zwei Zielen beinhaltet die Analyse der Eigenschaften des zünddurchschlagsicheren Spalts. Hierbei wird der Zusammenhang von Werkstofferosionen durch den aggressiven Kontakt von heißen Abgasen mit der Spaltgeometrie untersucht. Die zwei Parameter Werkstoff und Spaltgeometrie sind voneinander abhängig.

Das zweite Ziel soll die Frage nach der Verwendbarkeit des RT-Verfahrens Vakuumgießen zur Verarbeitung von RP-Polymerwerkstoffe und Gießwerkstoffe aus der Praxis als Wandmaterial für die Druckfeste Kapselung klären. Dabei ist die Oberflächengüte der

Spalte zu kontrollieren. Auch das Kriterium der Maßhaltigkeit der Teile in den einzelnen Fertigungsschritten wird in den Untersuchungen einfließen.

2.2 Anforderungsprofil seitens der Normen

Die in der Norm DIN EN 60079-0 [2] dargelegten allgemeinen Anforderungen an Konstruktion, Prüfung und Kennzeichnung elektrischer Betriebsmittel und Bauteile in gasexplosionsgefährdeten Bereichen werden durch die Norm DIN EN 60079-1 „Druckfeste Kapselung“ [3] im speziellen ergänzt. Hierin sind zahlreiche Richtwerte vorgegeben, die beim Konstruieren beachtet werden müssen. Die Anwendung normativer Empfehlungen soll technisch einwandfreies Verhalten gewährleisten, die somit eine Grundlage für technisch optimale und gefährdungsfreie Konstruktionen liefern [6].

Folgende Hauptanforderungen sind an die „Druckfeste Kapselung“ definiert: Die druckfeste Kapselung muss dem Druck einer inneren Explosion standhalten und darf keine plastischen Verformungen aufweisen (Überdruckprüfung gemäß Absatz 15.1.3 laut [3]). Der Zünddurchschlag muss verhindert werden (Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit gemäß Absatz 15.2 laut [3]). Die Oberflächentemperaturen der Betriebsmittel müssen entsprechend der Temperaturklassen ausgelegt sein, um eine Zündung durch heiße Oberflächen zu vermeiden. (Thermische Prüfungen gemäß Absatz 26.5 laut [2] mit dem Zusatz des Absatzes 14 Tabelle 5 laut [3])

Hieraus lassen sich die Hauptanforderungen an den Werkstoff ableiten [6]: hoher Elastizitätsmodul E, um möglichst kleine Dehnungen im elastischen Bereich der Hooke’schen Gerade zu erhalten; hohe Streckgrenze R_e, σ_y um Rissbildung zu minimieren und hohe Schlagzähigkeit, um Sprödbruch zu vermeiden.

An nichtmetallische Gehäuse und nichtmetallische Teile von Gehäusen werden ergänzende Anforderungen für Typprüfungen laut Absatz 19.3 [3] gestellt. Speziell für Gehäuse bzw. -teile aus Polymerwerkstoffen gilt in diesem Zusammenhang, dass in Übereinstimmung mit [7] eine Entflammbarkeitsprüfung durchzuführen ist.

2.3 Auswahl der Gießwerkstoffe

Aus den Einsatzbedingungen der Geräte in explosionsgefährdeten Bereichen ergeben sich Anforderungen an die Einsatztemperaturen von -30 °C bis mind. +80 °C, Temperaturbeständigkeit (kurzzeitig Temperaturen von mind. 85 °C). Weitere Anforderungen an die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Werkstoffe ergeben sich aus den Belastungen der Typprüfungen [2]. Dazu gehören: Prüfung auf Schlagfestigkeit nach Absatz

26.4.2, Kälte- und Wärmebeständigkeitsprüfung nach Absatz 26.9 bzw. 26.8 unter Berücksichtigung der Testtemperaturen nach Absatz 26.7 für nichtmetallische Gehäuse oder nichtmetallische Gehäusebauteile und Fallprüfung nach Absatz 26.4.3. Dabei handelt es sich nicht um eine vollständige Liste der Anforderungen, sondern nur um eine Aufstellung aller wesentlichen Forderungen an die Polymerwerkstoffe.
Bei den im Vakuumgießen mit Silikonformen verwendbaren Polymerwerkstoffen handelt es sich um Polyurethanharze (PUR). In Anbetracht der hohen Anforderungen an mechanische Eigenschaften, der Brennbarkeitsklasse UL94 V2 um höher seitens des Explosionsschutzes und aufgrund der Anforderungen des Fertigungsverfahrens Vakuumgießen reduzieren sich die auf dem Markt befindlichen RP-Gießharze und die industriellen Gießharze.

2.4 Spaltgeometrie zur Erosionsprüfung

Eine Analyse der geprüften Geräte bei der PTB ergab, dass an diesen Geräten vorwiegend der ebene Spalt, der zylindrische Spalt sowie deren Kombinationen und Gewindespalte zum Einsatz gelangen. Diese Spalte decken sich mit den in der Norm DIN EN 60079-1 hauptsächlich angeführten Spaltarten. Da sich der zylindrische Spalt nur schlecht über den geplanten Versuchsaufbau umsetzen lässt und durchaus auch Ergebnisse äquivalent zum ebenen Spalt zu erwarten sind, wird auf eine Berücksichtigung dieses Spaltes gegenwärtig verzichtet. Der Gewindespalt wird entsprechend durch den geriffelten Spalt ersetzt. Erweitert werden die zu betrachtenden Spaltarten durch einen konkaven Spalt. Die in der im Punkt 3 vorgestellten Prüfapparatur sollen der ebene, zusammengesetzte, geriffelte und konkaver Spalt (in Prüfkörper eingebracht) getestet werden.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Auf einem zylindrischen Behälter wird der Deckel mit dem integrierten Prüfkörper dicht aufgeschraubt. Die einzige Öffnung zur umgebenden Atmosphäre ist der konstruktiv vorgesehene Spalt im Prüfkörper. Der Behälter hat ein Volumen von max. 500 cm^3 und Anschlüsse zum Ein- und Auslass des explosionsfähigen Gas/Luft-Gemisches sowie für eine Zündquelle (Zündkerze). Dieser Behälter wird in einen Prüfkessel eingebracht.
Die Zündung des explosionsfähigen Gasgemisches erfolgt über die Zündkerze im inneren des Behälters. Die heißen reaktiven Abgase können dabei nur über den konstruktiv bedingten Spalt entweichen. Hierbei darf kein Zünddurchschlag erfolgen, der die umgebende explosionsfähige Atmosphäre im Prüfkessel zündet.

Entsprechend [3] besteht die Forderung, das Erosionsverhalten durch 50 Explosionen zu testen. Der Test gilt als bestanden, wenn kein Zünddurchschlag erfolgt. Im Zuge des Bearbeitungsfortschrittes sollen die Betrachtungen durch Berücksichtigung des Einflusses der Klimalagerung erweitert werden.

Die Anzahl der durchzuführenden Versuche ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Spaltgeometrien (4+1), der Anzahl der Werkstoffe (8), mit und ohne Klimalagerung (2) und der erforderlichen Anzahl an Explosionen (50). Es sind maximal 4.000 Versuche durchzuführen. Eine Versuchsreihe von 50 Explosionen wird sofort abgebrochen, sobald ein Zünddurchschlag erfolgt.

4 Zusammenfassung

Nach über 20 Jahren werden wieder Erosionsversuche an Spaltgeometrien aus Polymerwerkstoffen durchgeführt. Diese Werkstoffe sind aus der Palette der modernen Polymerwerkstoffe ausgesucht worden. Hierbei spielt die Forderung der Nutzung der RT-Technologie Vakuumgießen eine wesentliche Rolle.

Erste Ergebnisse werden in den kommenden Monaten erwartet. Es wird die Formulierung einer Aussage zur Eignung des Einsatzes von Spaltarten und den Polymerwerkstoffen unter dem Kriterium der Verwendbarkeit der Technologie Vakuumgießen für seriennahe Teile bzw. Serienteile für den bestimmungsgemäßen Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen hinsichtlich des Einflusses des Werkstoffs auf Erosionserscheinungen und Zünddurchschläge und hinsichtlich des Einflusses der Spaltgeometrie auf Erosionserscheinungen und Zünddurchschläge erwartet.

Literatur

[1] Klausmeyer, U.; Wehinger, H.: Kunststoffgehäuse in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung „d“ für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel. PTB-Bericht, 1989.

[2] DIN EN 60079 Teil 0 05.07: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Allgemeine Anforderungen.

[3] DIN EN 60079 Teil 1 04.08: Explosionsfähige Atmosphäre - Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung "d".

[4] Wehinger, H.: Explosionsschutz elektrischer Anlagen. Einführung für den Praktiker. Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1995.

[5] Steen, H.: *Handbuch des Explosionsschutzes*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000.

[6] Engelmann, Frank; Sohn, Daniel; Träger, Ramona: *Konstruktionsmethodik als Hilfe bei der Konstruktion von Gehäusen der Zündschutzart „druckfeste Kapselung“*. In: Grote, K.-H. (Hrsg.); Brökel, K. (Hrsg.); Stelzer, R. (Hrsg.): 3. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2005. Aachen: Shaker Verlag , 2005, S. 85-100. - ISBN: 3-8322-3971-5, ISSN 0945-0831.

[7] IEC 60695 Teil 11-10 03.99: Prüfungen zur Beurteilung der Brandgefahr - Teil 11-10: Prüfflammen; Prüfverfahren mit 50-W-Prüfflamme horizontal und vertikal.

Reverse Engineering im Spannungsfeld zwischen Produktentwicklung und Produktpiraterie

Christine Schöne, Ralph Stelzer

Technische U Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
01062 Dresden
Email: Christine.Schoene@tu-dresden.de; Ralph.Stelzer@tu-dresden.de
Internet: http://www.tu-dresden.de

Inhalt: *Reverse Engineering wird als übliche Methode im Produktentwicklungsprozess angewendet und akzeptiert. Die hierbei angewendeten Werkzeuge und differenzierten Methoden eignen sich gleichermaßen um Produkte von Mitbewerbern zu analysieren um dann die gewonnen Erkenntnissen für Weiterentwicklungen zu nutzen. Zunehmend wird Reverse Engineering genutzt, um Teile oder ganze Produkte zu kopieren (u.a. zur Ersatzteilefertigung). Hier besteht rechtlich gesehen eine Grauzone, die es näher zu beleuchten gilt um Fehlinterpretationen zu vermeiden.*

Abstract: *Reverse Engineering as an usual and accepted method in the product development. The used tools and methods are appropriate for the analyzing of competing products for benchmarking. But Reverse Engineering also is a technology to develop and produce components of existing products (e.g. spare part). By copying individual parts as well as complete products there is a gray area between legal and illegal copying. The article analyzes and describes this process to prevent misinterpretations.*

Stichwörter: *Reverse Engineering, Benchmark, Produktpiraterie*

Keywords: *Reverse Engineering, benchmarking, product piracy.*

1 Einleitung

„Reverse Engineering“ (engl.: umgekehrt entwickeln, rekonstruieren) bezeichnet den Vorgang, aus einem bestehenden, fertigen System oder einem meistens industriell gefertigten Produkt durch Untersuchung der Strukturen, Zustände und Verhaltensweisen, die Konstruktionselemente zu extrahieren. Aus dem fertigen Objekt wird somit wieder ein Plan gemacht. Im produktionstechnischen Umfeld hat sich Reverse Engineering in den vergangenen Jahren gut etablieren können. Im Kontext der Einbeziehung natürlicher Objekte in den Entwicklungsprozess oder der Erfassung realer Produktexemplare im Rahmen der Qualitätssicherung ist Reverse Engineering heute zu einer unverzichtbaren Technologie geworden [1]. Andererseits stehen damit natürlich auch Methoden, Werkzeuge und Anla-

gen zur Verfügung, die es relativ problemlos gestatten, weitgehend exakte geometrische Modelle von Produktkomponenten zu erzeugen und damit diese zu kopieren. In diesem Umfeld gibt zum einen teilweise sehr unklare Vorstellungen, was Reverse Engineering bei der Rekonstruktion von Produktunterlagen zu leisten vermag bzw. welcher technische Aufwand für die Gewinnung geeigneter Produktionsunterlagen erforderlich ist. Zum anderen ist die Bewertung derartiger Nutzungen im Spannungsfeld zwischen legaler und illegaler Kopie teilweise problematisch.

Im Beitrag wird zunächst eine kurze allg. Einführung in den Bereich des Reverse Engineering gegeben. Anschließend wird speziell auf die Vorgehensweise der Rekonstruktion von Produktdokumentationen eingegangen. Eine Abgrenzung zur Produktpiraterie wird aufgezeigt.

2 Reverse Engineering in der Produktentwicklung

Reverse Engineering ist eine optionale, häufig genutzte Technologie im Rahmen von Produktentwicklung und Fertigung (Abb. 1).

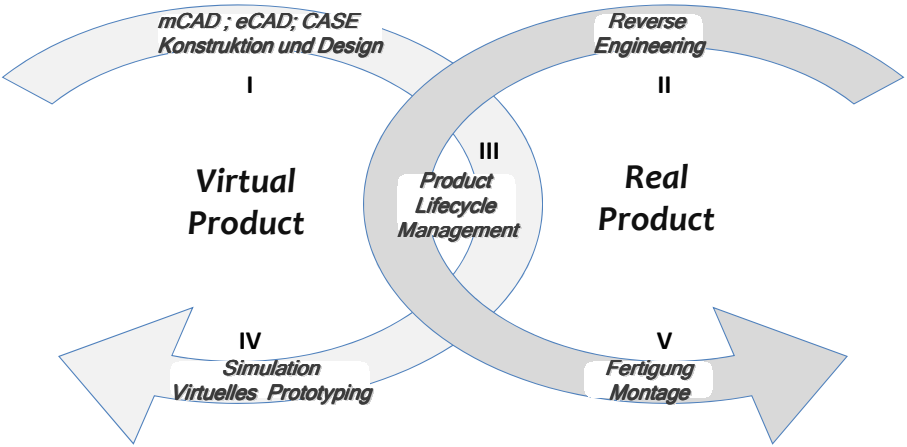


Abb 1: Einordnung des Reverse Engineering in den Produktentstehungsprozess nach *STELZER [2]*

Neben den heute üblichen Rechnermodellen, die direkt in der Produktentwicklung entstehen (I) werden dabei auch Modelle von bereits existierenden Objekten genutzt (II). Alle für die Produkterzeugung benötigten Informationen werden dabei üblicherweise in zentralen Managementsystemen (PDM/PLM) verwaltet (III). Genutzt werden die Modelle zum einen virtuell zum Zwecke der Simulation und Verifikation (IV), zum anderen insbesondere natür-

lich auch zur Herstellung (Fertigung und Montage) der Produkte (V). Im Produktentwicklungsprozess werden z.B. Konkurrenzprodukte ebenfalls mit Methoden des Reverse Engineering untersucht. Baugruppen und Produkte werden zerlegt, analysiert und funktional überprüft. Die Untersuchung von Konkurrenzprodukten wird innerhalb der Produktentwicklung als Benchmarking bezeichnet.

Im Gegensatz zu einer funktionellen Nachempfindung, die ebenso auf Analysen nach dem Black-Box-Prinzip aufbauen kann, zielt das Reverse Engineering darauf, das vorliegende Objekt weitgehend exakt abzubilden. In Anlehnung an die allg. Definition kann man unter Reverse Engineering hier den Vorgang verstehen, aus einem bestehenden, fertigen, meistens industriell gefertigten Produkt durch Untersuchung der Strukturen, Zustände und Verhaltensweisen, eine für nachfolgende Prozesse geeignete Beschreibung (zurück) zu gewinnen. Dabei ist die Vorgehensweise und der zu treibende Aufwand von der Zielstellung des Prozesses abhängig. Typische Anwendungen sind:

Reverse Engineering als Komponente eines teilweise manuellen Entwicklungsprozesses;

Qualitätssicherung eines gefertigtes Teiles durch Erfassung der reale Geometrie;

Einbeziehung natürlicher Objekte in den Produktentwicklungsprozess

rechnergestützte Bearbeitung von Objekten, die z.B. auf Grund des Alters nicht rechnergestützt entwickelt wurden.

Rekonstruktion von Entwicklungsunterlagen fremder Produkte

Je nach dem Ziel des Reverse Engineering muss man den Prozess enger oder weiter fassen. Unter **Reverse Engineering im engeren Sinn** versteht man die Erfassung der Geometrie eines Objektes und die Aufbereitung der 3D-Punktinformationen zu 3D-CAD-Modellen und von diesen Modellen abgeleiteten Zeichnungen. In vielen Fällen wird Reverse Engineering im Ingenieurwesen auf dieses Teilprozess eingeschränkt betrachtet. Jede Produktentwicklung zielt jedoch auf die effektive Herstellung neuer Produkte. Hier schließt sich die Produktionstechnik an. Für alle Fälle, in denen eine industrielle Nutzung der entstehenden Modelle erfolgen soll, müssen deshalb eine weitergehende Betrachtungen angestellt werden. So umfasst **Reverse Engineering im erweiterten Sinn** die Nutzung der 3D-Daten in der gesamten Prozesskette zur Fertigungsplanung und Herstellung von Produkten sowie zur Qualitätskontrolle gefertigter Produkte [3].

3 Reverse Engineering bei der Rekonstruktion von Entwicklungsunterlagen

Die Rekonstruktion von Entwicklungsunterlagen wird immer dann erforderlich, wenn Produkte oder Komponenten weiterentwickelt oder gefertigt werden sollen, von denen aus verschiedenen Gründen keine Originaldokumentation verfügbar ist. Dies kann der Fall sein, wenn teilweise sehr alte Produkte wieder hergestellt werden sollen, für die ursprünglich keine ausreichende Dokumentation erzeugt wurde (ein Beispiel dafür ist die Wiederaufnahme des Sportwagens Melkus RS-1000 und dessen Fortführung im neuen RS-2000 [4]).

Allerdings stehen heute zunehmend margenstarke Ersatzteile und Komponenten im Mittelpunkt des Interesses. Bestehen auf derartige Teile keine Schutzrechte, so ist gegen ein derartiges Vorgehen prinzipiell nichts einzuwenden. Grundsätzliche Probleme liegen dann vor allem in der erforderlichen Qualität der so erzeugten Teile, die durch geeignete Rekonstruktions- und Fertigungsprozesse zu garantieren sind.

Unzulässig sind Kopie und Vertrieb von urheberrechtlich geschützten Teilen. In derartigen Fällen spricht man von Produktpiraterie. Dabei beschränken sich Produktpiraten heute nicht mehr auf die Herstellung von Komponenten, sondern kopieren bereits vollständige Maschinen und Anlagen [5].

Der Schaden durch Produktpiraterie betrug nach einer Studie der OECD im Jahr 2005 ca. 200 Mrd.€ (darin nicht enthalten sind illegale Kopien digitaler Medien wie Software, Musik oder Filmen) [6]. Zunehmend ist heute auch der Investitionsgüterbereich, wie der Maschinen- und Anlagenbau, betroffen. Schätzungen gehen von jährlichen Schäden bis ca. 5 Milliarden € sowie einem Verlust von zehntausenden Arbeitsplätzen in Deutschland aus [7].

In diesem Zusammenhang sollen durch Reverse Engineering Unterlagen gewonnen werden, die es erlauben, die Originalteile, Baugruppen oder Produkte unter Verzicht auf die nicht zugänglichen Originalunterlagen selbstständig herzustellen. Zielstellung ist dabei die illegale Nutzung als Komponente eigener Produkte, der Vertrieb als eigenes Produkt (Plagiat) oder als angebliches Original (Fälschung).

In diesem Spannungsfeld müssen sich auf der einen Seite die Originalproduzenten durch organisatorische Maßnahmen, wie

Sicherung und Kontrolle der logistischen Kette,

Ausgestaltung der internen und externen Maßnahmen zum Know-how-Schutz,

Standortentscheidungen
und technische Maßnahmen (technische Schutzvorkehrungen), wie
Hologramme,
Mikrofarbcodes,
RFID,
schützen.

Da aber durchaus in vielen Fällen auch legale Kopien von Teilen, auf die keine Schutzrechte bestehen, angefertigt werden, müssen auf der anderen Seite solche Unternehmen ebenfalls für ein adäquates Reverse Engineering Sorge tragen. Geeignete technische Maßnahmen garantieren die erforderliche hohe Qualität der Kopien. Eine lückenlose Dokumentation aller Prozesse stellt sicher, dass in möglichen rechtlichen Auseinandersetzungen jederzeit die Legalität des Vorgehens nachgewiesen werden kann. Dies betrifft sowohl eine Schutzrechtsprüfung, die angewendeten technischen Analysemethoden und -ergebnisse als auch den Nachweis, dass nur frei zugängliche Informationen und Unterlagen benutzt wurden.

Es muss zunächst festgestellt werden, dass es bisher keine genormte oder irgend verbindliche Vorgehensweise gibt. Vielmehr richtet sich der genutzte Prozess am beabsichtigten Ziel und den verfügbaren Originalobjekten (Mandanten) aus. Je nach Kombination von Prozessziel und verfügbaren Mandanten sind dann bestimmte Vorgehensweisen sinnvoll und üblich. Eine derartige sinnvolle und übliche Vorgehensweise unter der Annahme, dass von einer größeren Anzahl verfügbarer Mandanten eine für die nachfolgend beabsichtigte industrielle Fertigung geeignete Dokumentation erzeugt werden soll, soll nachfolgend als Standardprozess bezeichnet werden. Dabei muss immer der Zusammenhang zwischen der Baustruktur, der Funktionalität und der Herstellung gesehen werden (Abb. 2).

Die Baustruktur gliedert sich in die Betrachtung der einzelnen Komponenten. Dazu gehören alle Teile, also die zu fertigenden Zeichnungsteile ebenso, wie Kauf- und Normteile, die später von externen Lieferanten zugekauft werden können. Erforderlich ist die Dokumentation des Zusammenbaus der Teile zu Baugruppen in aufsteigender Hierarchie bis zum kompletten Produkt. Dazu gehören die Ermittlung der Anzahl der Teile, die funktionale Zusammengehörigkeit, die Einbauverhältnisse sowie das Erkennen ggf. in den Montageprozess eingebetteter Fertigungsschritte (z.B. Bohren vormontierter Teile im Verbund).

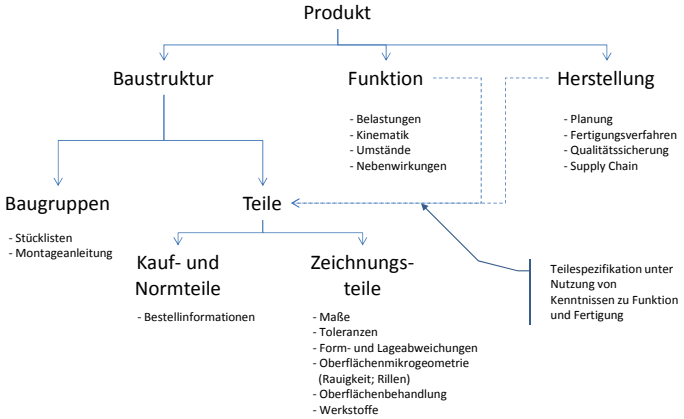


Abb. 2: Wesentliche Betrachtungsaspekte im Reverse Engineering Prozess

Ein wesentlicher Schritt im Reverse Engineering ist das Verstehen der Produktfunktion. Dazu zählen alle erforderlichen Fakten, die für eine spätere Nutzung des Produktes maßgebend sind, also z.B. geforderte Bewegungsabläufe, auftretende Belastungen (Momente, Kräfte), erforderliche bzw. zu erwartende Beschleunigungen, Geschwindigkeiten etc. Auch zu erwartende externe Einflüsse („Umstände“ genannt; z.B. Einsatz in aggressiven Umgebungen) sowie zulässige Beeinträchtigungen und Nebeneffekte auf die Umgebung („Nebenwirkungen“ genannt; z.B. zulässige Emissionen) müssen bekannt sein. Dieser Arbeitsschritt setzt zumeist ein tiefes Verständnis des Produktes (im allg. Sinne - nicht jedoch unbedingt des konkreten Mandanten einer bestimmten Firma) voraus und ist der Produktspezifikation einer Entwicklung sehr ähnlich. Ohne diese Kenntnisse ist es später schwierig, wenn nicht gar unmöglich, wichtige Parameter der Teiledokumentation zu bestimmen (z.B. sinnvolle und erforderliche Toleranzen).

Im Standardprozess folgt darauf das Erfassen der physischen Modellvorlagen. Dies beginnt mit der Demontage und (als Ergebnis eines Demontageprotokolles) der Ableitung von später benötigten Montageanleitungen. Es folgt die Betrachtung der Makrogeometrie, welche durch geeignete Verfahren ermittelt werden kann. Unter Nutzung des Funktionsverständnisses können darauf aufbauend Informationen zu Oberflächenrauigkeiten, Toleranzen, Form- und Lageabweichungen und Werkstoffeigenschaften ermittelt werden. Dabei muss immer beachtet werden, dass viele konstruktive Angaben von Informationen zu beabsichtigten bzw. verfügbaren Fertigungsmitteln – und verfahren abhängen. Dazu gehö-

ren speziell die Möglichkeiten in den Bereichen der Ur- und Umformtechnik (welche Gießtechnologien stehen zur Verfügung), der spanenden Bearbeitung (welche Qualitäten sind erreichbar) oder auch der Beschaffung (welche Halbzeuge sind beschaffbar).

Der Ermittlung der Geometrie der einzelnen Bauteile kommt naturgemäß eine besondere Rolle bei. Die Geometrie ist die Basis eines für die spätere Herstellung unerlässlichen CAD-Modells. Sie kann durch unterschiedliche Verfahren bestimmt werden, deren Auswahl sich von der Art des Teiles (z.B. Außen/Innengeometrie; einfache Struktur aus Regelflächen oder komplizierte Struktur mit Freiformflächen) ableitet. Da jeder Messvorgang grundsätzlich fehlerbehaftet ist und sich wesentliche technische Parameter durch Vermessung eines einzelnen Teiles überhaupt nicht bestimmen lassen (z.B. Toleranzen) ist es sowohl notwendig, Gruppen von Mandanten zu bestimmen, als auch auf die im vorigen Abschnitt beschrieben Funktionsermittlung zurückzugreifen. Die Auswertung der Messungen an Gruppen von Mandanten ist immer dann unerlässlich, wenn aus einer funktionalen Betrachtung keine gesicherte Aussage zu erforderlichen Parametern von Teilen (wie z.B. Toleranzen) abgeleitet werden können. Aus den Streuungen der Maße der realen Teile kann dann auf die zulässigen Toleranzwerte geschlossen werden. Die Originalwerte sind dabei in der Regel nicht zu ermitteln.

Nach der detailliert beschriebenen Ermittlung der Geometrie der Teile ist es erforderlich Angaben zum Material bereitzustellen. Dabei werden Werkstoffeigenschaften nicht nur durch das Materialvolumen, sondern in erheblichem Maße durch Oberflächeneigenschaften und Beschichtungen bestimmt. Verbunde aus unterschiedlichen Materialien, Oberflächenbehandlungen und Beschichtungen müssen erkannt werden. Für eine vollständigen Werkstoffcharakterisierung müssen deshalb zusätzlich zu den klassischen Verfahren der Werkstoffprüfung und -analyse am Materialvolumen Methoden der modernen Oberflächen- und Dünnschichtanalytik eingesetzt werden. Dadurch ist es möglich verschiedene Parametergruppen (Materialvolumina, Oberflächen, Schichten) zu bestimmen, die chemische Zusammensetzung inkl. Spurenbestandteile, laterale und vertikale Verteilungen von Elementen und Verbindungen, mechanische Eigenschaften, Kristallstruktur und Gefüge , Topografie, Schichtdicken, Schichtverläufe, Schichthaftung etc. Auch die Bestimmung von Rauheiten ist messtechnisch problemlos möglich. Wie bei allen anderen Parametern muss natürlich beachtet werden, dass die Messung einer einzelnen exemplarischen Rauheit keine Aussage über funktional zulässige Wertebereiche zulässt.

Eine ganz wesentliche Bedeutung für die erfolgreiche Beherrschung einer späteren industriellen Fertigung ist die Planung der Technologie. Diese legt für jedes einzelne Teil die geeignete Fertigungsart fest. Dabei muss im Rahmen des Reverse Engineering herausgefunden werden, mit welchem Fertigungsverfahren und ggf. unter welchen Rahmenbedingungen das Bauteil hergestellt wurde. Auf der Basis vorliegender Erkenntnisse (Betriebsbelastung, Einsatzbedingung) und Untersuchungsergebnisse sowie der offensichtlichen Erscheinung des Bauteil kann auf die Herstellung geschlossen werden.

4 Fazit

Reverse Engineering spielt heute sowohl als unverzichtbare Technologie in der Produktentstehung eine wichtige Rolle, wird aber auch in zunehmendem Maße zur Rekonstruktion von Produktdokumentationen eingesetzt. Im Spannungsfeld zwischen legalen und illegalen Kopien sowie der unverzichtbaren Qualitätsforderungen ist eine technisch gesicherte Durchführung des Prozesses sowie eine transparente Planung und Dokumentation bereits im Vorfeld unverzichtbar.

Literatur

[1] Deltl, J.: Strategische Wettbewerbsbeobachtung, Gabler 2004

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

[3] Schöne,C.: Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik, Verlag Dr.Huth 2009

[4] http://www.melkus-motorsport.de/motorsport/aktuell/news_20050921-Sportwagenbau.php; Dresden 2005

[5] Wildemann, H.; et al.: Plagiatschutz – Handlungsspielräume der produzierenden Industrie gegen Produktpiraterie, TCW Transfer-Centrum GmbH & Co. KG 2007

[6] OECD (Organization for Economic co-operation and development): The Economic Impact of Counterfeiting and Piracy, OECD Publishing 2008

[7] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Forschungsoffensive gegen Produktpiraterie; Pressemitteilung 006/2008

Produktentwicklung optimieren mit Hilfe der selbstorganisierenden Merkmalskarten (SOM) in der Automobilzulieferindustrie

Jörg Feldhusen, Arun Nagarajah

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

Inhalt: *Diese Veröffentlichung beschreibt ein Konzept für die Anwendung selbstorganisierender Merkmalskarte (SOM) zur Unterstützung der Entwickler bei der Produktentwicklung von Anpassungskonstruktion in der Automobilzulieferindustrie. Die SOM ist in der Lage Ähnlichkeiten von Lastenheften zu erkennen. Durch die Annahme, dass ähnliche Lastenhefte zu ähnlichen Produkten führen, kann durch SOM die bestehende Produktvariante identifiziert werden, die mit minimalen Anforderungen den neuen Auftrag erfüllen wird. Eine Grundvoraussetzung für die Anwendung von SOM ist die Aufbereitung der Anforderungen.*

Abstract: *This paper describes an approach to apply self organizing map (SOM) for the support of the developer to optimize the design process of adaptable products in the automotive supplier industry. The SOM is able to asses the similarity of requirement lists. Assuming that similar requirement lists lead to similar products, the SOM is able to identify the existing product, which has to be changed least to fulfil a new order. A prerequisite for using SOM is to prepare the requirements.*

Stichwörter: *Anpassungskonstruktion, Automobilzulieferindustrie, Selbstorganisierende Merkmalskarten*

Keywords: *Adaptable Products, Automotive Supply Industry, Self Organising Maps*

1 Einleitung und Problembeschreibung

In der heutigen Automobilzulieferindustrie wird ein hoher Anteil der zu entwickelnden Produkte durch Anpassungskonstruktion entwickelt [1]. Ein Grund hierfür liegt sicherlich in der gestiegenen Forderung der OEMs, die Konstruktions- und Entwicklungsdauer zu verkürzen, gleichzeitig hohe Sicherheitsstandards sicherzustellen und die Kosten kontinuierlich zu senken. In der Zulieferindustrie haben diese Kriterien nicht die gleiche Relevanz. Es wird zwar von den Zulieferunternehmen erwartet, dass sie die in der Branche und von den

Kunden geforderten Qualitätsstandards erfüllen und auch sich an den vorgegeben Terminen halten, aber diese beiden Kriterien stellen die notwendigen Voraussetzungen für die Vergabe von Aufträgen dar. Das zumeist entscheidende Kriterium stellt das Senken der Produktkosten dar. Diese Forderung führt dazu, dass die Zulieferunternehmen die neuen Kundenanfragen zum Großteil durch Anpassungskonstruktion realisieren. Dabei verfolgen sie das Ziel die notwendigen Anpassungen an dem vorhandenen Produkt so gering wie möglich zu halten. Produktänderungen bedeuten für die Unternehmen, dass die nachfolgenden Prozesse wie z.B. Fertigungs- und Montageprozesse ebenfalls geändert werden müssen und folglich die Kosten steigen werden. Eine Kostenoptimale Produktentwicklung ist erst gegeben, wenn das für die neue Entwicklung als Basis verwendetes Produkt diese Forderung erfüllt.

Viele Projekte in der Zulieferindustrie haben gezeigt, dass die Entwickler nicht das für den neuen Auftrag passende Produkt als Entwicklungsgrundlage nehmen, sondern überwiegend das zu letzt entwickelte Produkt auswählen. Dies führt dazu, dass die Angebotskalkulation sehr kostenintensiv und damit eine Auftragserteilung sehr unwahrscheinlich sein wird. Für die Lösung dieses Problems stellt sich die Frage, ob die Auswahl eines passenden Produktes mit den heute verfügbaren Tools durchgeführt werden kann.

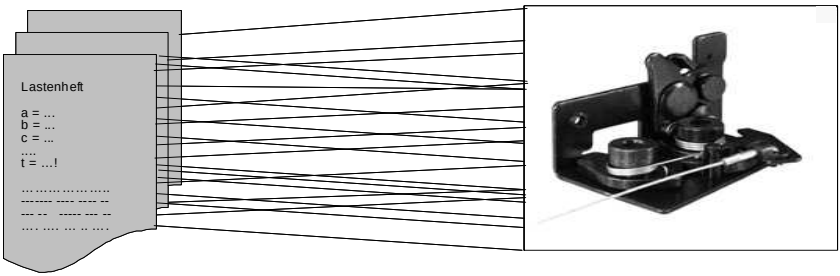


Abbildung 1: Zuordnung der Anforderungen zu den Gestaltparametern

Für die Beantwortung dieser Fragestellung bieten viele Tools die Möglichkeit, die Anforderungen mit den Produktkomponenten bzw. Gestaltparameter zu verknüpfen (Abbildung 1). Hierdurch soll dem Anwender die Produktkomponenten aufgezeigt werden, die durch die Anforderungsänderungen beeinflusst werden. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist der erhöhte Zeitaufwand für die Durchführung dieser Zuordnungen. Zudem können die impliziten Anforderungen, die ebenfalls durch die Gestaltung realisiert worden sind, nicht identifiziert und damit auch nicht zugeordnet werden.

Eine rechnerbasierte Lösung, die möglichst automatisch die Produktauswahl vornehmen würde, könnte für die Praxis vielversprechend sein. Für das Erreichen dieses Zieles wurde im Rahmen eines BMBF Projektes mit dem Titel „Produktentwicklung optimieren unter Nutzung von Neuronalen Netzen und grafischer Visualisierung der Anforderungen (PONNGA)“ ein Forschungsprojekt durchgeführt.

In diesem Projekt wurde aus den oben erwähnten Nachteilen nicht das Ziel verfolgt, die explizite Zuordnung der Anforderungen mit den Produktkomponenten vorzunehmen, sondern einen Umweg über das Vergleichen von Lastenheften zu gehen (Abbildung 2).

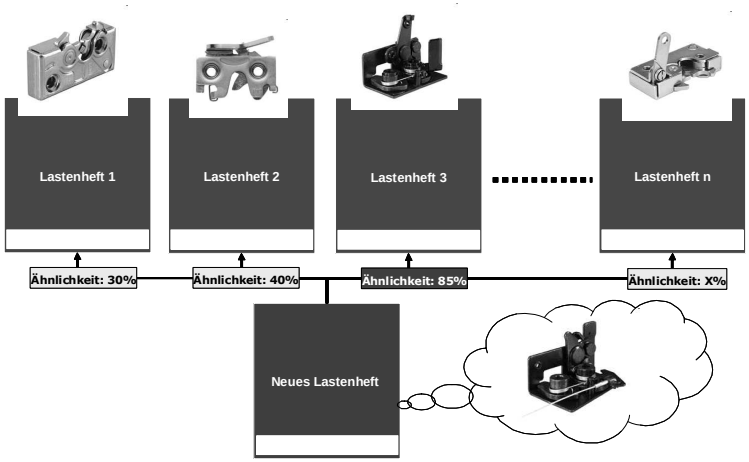


Abbildung 2: Vorgehensweise in PONNGA

Für das rechnerunterstützte vergleichen der Lastenhefte werden die folgenden Annahmen getroffen:

Die Anforderungen aus dem Lastenheft sind entscheidend für die Produktänderungen. Die Forderungen der anderen Stakeholder, wie Gesetzgeber oder Normungsinstiute haben Auswirkungen auf alle Produktvarianten und somit werden diese Änderungen für das angestrebte Ziel vernachlässigt.

Des Weiteren wird angenommen, dass die Anforderungsart und –anzahl nahezu konstant bleiben und nur die Ausprägung der Anforderungen sich verändern. Eine Anforderung setzt sich nach AHRENS aus einem Merkmal und einer Ausprägung zusammen. Dabei beschreibt das Merkmal das Bezugsobjekt der Anforderung und die Ausprägung den eigentlichen Sollwert für das Merkmal [2].

Die getroffenen Annahmen beschreiben auf der einen Seite ausreichend genau die Anforderungen in der Automobilzulieferindustrie, auf der anderen Seite werden hierdurch die Voraussetzungen geschaffen, um die Anforderungen durch die Data Mining Methode Selbstorganisierende Merkmalskarte (SOM) automatisch vergleichen zu können. Die Anforderungen, die durch die Lastenhefte der OEMs beschrieben werden, müssen im ersten Schritt für die Anwendung der SOM aufbereitet werden.

2 Anforderungsaufbereitung

Die Grundvoraussetzung für das angestrebte Ziel ist die Erfassung und Aufbereitung der Kundenanforderungen. Hierzu sollen im ersten Schritt die Anforderungen aus den bestehenden Lastenheften erfasst werden. Für die praktische Durchführung dieser Aufgabe wird zuerst eine Systembeschreibung des zu untersuchenden Produktes durchgeführt (Abbildung 3). Aufbauend auf dieser Systembeschreibung werden in einem weitern Schritt die Anforderungen aus den Lastenheften den Systemkomponenten zugeordnet. Dabei ist es wichtig, dass die Anforderungen aus dem Lastenheft in dem Originalwortlaut übernommen werden. Hierdurch soll vermieden werden, die Anforderungen durch

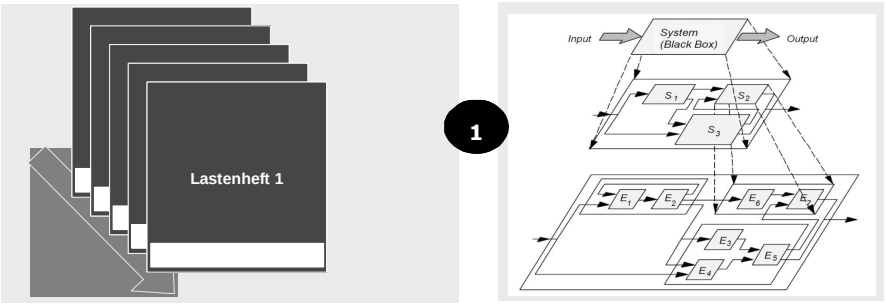


Abbildung 3: Erfassen der Lastenhefte

mögliche Interpretationsfehler bereits zu Beginn der Analyse auszuschließen. Diese Zuordnungen werden in einer Excel Tabelle aufgenommen.

In einem weiteren Schritt soll in Anlehnung an die VDA-Empfehlung (Verband der Automobilindustrie e.V.) eine Beschreibungsform für Anforderungen in Form von elementaren Bausteinen entwickelt werden. Diese Bausteine bestehen aus Subjekt, Anforderungswort, Objekt und Prädikat [3]. Durch diese Beschreibung sollen die zusammengesetzten Anforderungen in einzelne und eindeutige Anforderungen aufgegliedert werden. Hierdurch ist es

möglich die Anforderungen, die die gleiche Bedeutung für die Produktbeschreibung haben, aber durch unterschiedliche Begrifflichkeiten beschrieben werden, zu erkennen. Somit können gleiche Anforderungen eindeutig erkannt und eliminiert werden. Als Ergebnis liegt eine bereinigte Liste von Anforderungen vor, die für die Anwendung in SOM aufbereitet worden ist.

3 Lastenhefte vergleichen mithilfe der SOM

Die SOM ist ein spezielles Verfahren aus dem Bereich Data-Mining, mit dem komplizierte Zusammenhänge numerische nachgebildet und visualisiert werden können[4]. Unter dem Oberbegriff Data-Mining gibt es eine große Zahl an wissensgenerierenden Verfahren. Diese werden im Wesentlichen dazu herangezogen, wenn es darum geht, ein Verständnis für komplexe Zusammenhänge zu erhalten und sich klassische statistische Untersuchungen als nicht zielführend bzw. zu aufwändig erweisen.

Die SOM ist eine Form neuronalen Netzes, die in der Lage ist, ein klassifizierendes Verhalten ohne vorgegebene Output Daten zu erlernen. Hierdurch können in gegebenen Datenmengen automatisch die Klassifizierungen erkannt werden, die bisher nicht bekannt waren [6].

Entsprechen dem Vorbild im Gehirn werden die Synapsenstärken so gewählt, dass eine an das Netz gelegte Stimulation nur eine lokal angeordnete Neuronengruppe anregt. Alle restlichen Neuronen werden nicht beeinflusst. In diesem Sinne wird jedem möglichen Eingabevektor **i** ein Lagevektor **x** zugeordnet, wobei **x** die Lage des Neurons im Neuronenverbund ist, welches bei Eingabe von **i** am stärksten Angeregt wird. Die Nachbarneuronen des angeregten Neuronen werden ebenfalls stimuliert [5]. Eine solche Karte wird mit den bestehenden Eingangsvektoren trainiert, um Referenzkarten zu erzeugen, mit der ein neuer Eingangsvektor verglichen werden kann. Dabei wird der Vergleich farblich visualisiert.

Für das Projekt PONNGA dienen die Ausprägungswerte als Eingangsvektoren, die automatisch klassifiziert, um miteinander verglichen zu werden. In der durchgeführten Fallstudie wurde eine neue Anforderungsliste (AL04) herangezogen und die Eignung von vier vorhandenen Produktvarianten (ratngv05, ratngv06, ratngv07, ratngv08) numerisch ausgegeben und visuell untersucht. Die Anforderungsliste AL04 manifestiert sich nun automatisch (auf Basis der SOM-Algorithmen) als eine schwarz gekennzeichnete Wabe, an einer Stelle, auf allen vorhandenen Varianten (Abbildung 4). Es ist deutlich erkennbar, dass die

Variante 06 (ratngv06) den höchsten Fitness-Wert für diese Anforderungsliste aufweist. Rot steht für eine hohe Übereinstimmung der Anforderungslisten und Blau für eine Niedrige.

Durch die Visualisierung der „Fitnesslandschaft“, die die Übereinstimmung der Anforderungslisten darstellt, ergeben sich eine Reihe von Vorteilen.

Beispielsweise würde eine nur leicht modifizierte Anforderungsliste (AL04') sich innerhalb des eingezeichneten grünen Kreises bewegen, wohingegen sich eine gänzlich andere Anforderungsliste in einem ganz anderen Bereich dieser Merkmalskarten manifestieren würde.

Bei leichter Übung im Umgang mit dieser Technik kann diese Tatsache nun durch Interpretation in eine wertvolle Erkenntnis überführt werden:

Bei leichten Änderungen der Anforderungsliste kann sich vor allem die Produktvariante 08 ebenfalls als geeignet herausstellen, robuster gegen Änderungen (also gleichbleibend in der Eignung) wird jedoch wahrscheinlich die Variante 06 bleiben.

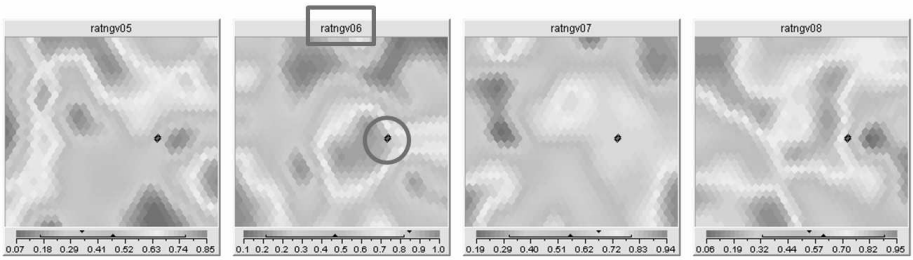


Abbildung 4: Merkmalskarte von Produktvarianten

4 Zusammenfassung

Für die Optimierung der Variantenkonstruktion ist es notwendig bereits zu Beginn einer Entwicklung zu erkennen, welche der bestehenden Variante als Entwicklungsgrundlage verwendet werden kann, um den neuen Auftrag mit minimalen Entwicklungsaufwand zu realisieren. Zur Identifizierung dieser Variante wird mithilfe der SOM die zugehörigen Lastenhefte zu den Produktvarianten automatisch verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleiches wird nicht nur durch den Erfüllungsgrad numerisch (z.B. in Prozenten) beschrieben sondern auch durch ein Falschfarbenbild visualisiert. Hierdurch kann durch Experten beur-

teilt werden, wie robust bzw. stabil die mögliche Variante im Hinblick auf die neue Anforderungsliste sein wird.

Literatur

[1] Tovey M., *Design of Lean Implementation Based on Cost Analysis*, Journal of Engineering Design, July 2001, ISSN 0954-4838

[2] Ahrens, G., Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen, Dissertation, TU Berlin, 2000 Verband der Automobilindustrie e.V., Automotive VDA-Standardvorlage Komponentenlastenheft, Frankfurt a.M., 2006, ISSN 0943-9412Braß,

[3] Otte R., Otte V., Kaiser V., *Data Mining für die industrielle Praxis*, München, Hanser, 2004, ISBN 3-446-22465-3

[4] Kinnebrock W., Neuronale Netze –Grundlagen, Anwendungen, Beispiele, München, Oldenburg Verl ag, 1992, ISBN 3-486-22103-5

[5] Lämmel U., Cleve J., Künstliche Intelligenz –Lehr- und Übungsbuch-, München, Fachbuchverlag Leipzig, 2004, ISBN 3-446-22574-9

VORHERSAGE DES FLIESSVERHALTENS VON KUNSTSTOFF-BAUTEILEN DURCH COMPUTERGESTÜTZTE METHODEN UND WERKZEUGE

Jochen Zapf, Bettina Alber-Laukant, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth
Universitätsstraße 30, D-95447 Bayreuth
Email: jochen.zapf@uni-bayreuth.de; Internet: http://www.cad.uni-bayreuth.de

Inhalt: *Der Einsatz von Kunststoffen in der Konstruktion hat sich seit Jahren auch in hochbelasteten Bereichen bewährt. Mit Hilfe moderner Simulationswerkzeuge kann das Verhalten von Werkstoffen bis zu einem gewissen Grad abgebildet werden. Nach der Validierung der Simulationsergebnisse durch den Abgleich mit realen Versuchsdaten kann ein virtueller Prototyp erstellt werden, der Prognosen für das Einsatzverhalten bei veränderten Randbedingungen ermöglicht. Am Beispiel von hochbeanspruchten Bauteilen aus der Antriebstechnik, den Elastomerdämpfungskomponenten einer drehelastischen Klauenkupplung, soll demonstriert werden, wie durch eine geschickte Kombination von virtueller und realer Produktgestaltung eine Vorhersage des Fließverhaltens der Polymerbauteile unter Fliehkrafteinfluss getroffen werden kann. Durch ein geschicktes Front Loading können Simulation und Analyse bereits einer frühen Phase des Produktentwicklungsprozess einbezogen werden, um effektive Zeit- und Kostenersparnis zu bewirken.*

Abstract: *The use of polymers has proven itself successful even in heavy-duty domains of product design. By modern computer-aided tools material behaviour can be emulated to a certain degree. After validation of simulation results by comparison with real measurments, a virtual prototype can be created, permitting material behaviour forecasts, before real parts exist. The prediction of elastomers' yield behaviour under centrifugal force is to be shown by skilled combination of virtual and real product design, using the example of highly-stressed power train components – the damping elements of elastomer clatch couplings. By targeted front loading simulation and analysis can be included in early stages of product development, to effect time and cost savings.*

Stichwörter: *CAx-Werkzeuge, Simulation, FEA*

Keywords: *CAx-tools, simulations, FEA*

1 Einleitung

Durch den konsequenten Einsatz moderner computergestützter Werkzeuge (Computer Aided x), wie CAD-Software und FE-Berechnungstools können im Produktentwicklungsprozess wichtige Wettbewerbsvorteile erreicht werden, bspw. bei der belastungsgerechten

Auslegung von Kunststoffbauteilen in hochbelasteten Bereichen der Antriebstechnik. Um das Werkstoffverhalten abzubilden und schon vor der eigentlichen Fertigung bis zu einem gewissen Punkt abschätzen zu können, werden Simulations- und Analysewerkzeuge eingesetzt werden. Durch die Schaffung von virtuellen Prototypen kann die Produktentwicklung für Folgeprojekte bereits in frühen Konstruktionsstadien dergestalt gelenkt werden, dass Fehler frühzeitig erkannt und somit vermieden werden können, was für den Prozess eine signifikante Zeit- und somit auch Kostenersparnis darstellt [1].

2 Praktische Versuchsdurchführung

Am Beispiel von hochbeanspruchten Bauteilen aus der Antriebstechnik, den Elastomerdämpfungskomponenten einer drehelastischen Klauenkupplung, soll demonstriert werden, wie durch geschickte Kombination von virtueller und realer Produktgestaltung eine Vorhersage des Fließverhaltens der Polymerbauteile unter Fliehkrafteinfluss getroffen werden kann.

2.1 Drehelastische Wellenausgleichskupplung

Bei dem gewählten Bauteil handelt es sich um einen Elastomerstern einer nicht schaltbaren Klauenkupplung. Diese Kupplungen werden als Wellenverbindung zur schwingungs-, verlust- und stoßfreien Übertragung von Drehmomenten eingesetzt. Ferner dienen sie dazu axiale, laterale und angulare Versätze zwischen den Wellen auszugleichen [2]. Das Bauteil ist für verschiedene Wellengrößen verfügbar und wird bei den größeren Bauweisen mit einem Nenndrehmoment von bis zu 600 Nm belastet. Bei den kleineren Ausführungen werden Drehzahlen von bis zu 28.000 U/Min. angelegt. Der Stoß- und Schwingungsausgleich der Klauenkupplung erfolgt über einen Elastomerstern, der sich zwischen den beiden Kupplungshälften befindet. Diese Elastomersterne sind in verschiedenen Shore-Härten, je nach Anwendungszweck, verfügbar. Im Folgenden soll dieses Dämpfungselement für die Betrachtungen herangezogen werden.

2.2 Versuchsaufbau Fliehkraft

Um die später nur noch simulierten Materialdaten mit realen Versuchswerten abzugleichen müssen Versuche am Prüfstand durchgeführt werden. Ziel dieser Versuche ist es, das Fließverhalten der im Einsatz befindlichen Werkstoffe unter hohen Drehzahlen zu ermit-

teln. Um eine möglichst große Bandbreite der Versuche abzudecken, wurden Simulationen mit verschiedenen Sterngrößen von 42 mm bis 102 mm Außendurchmesser durchgeführt. Dabei wurden die Verformungen mit Hilfe einer Lichtschranke gemessen.
Um eine gewisse Sollsicherheit der im Betrieb hochbeanspruchten Teile zu gewährleisten, soll das Nenndrehmoment der Kupplung angelegt werden, jedoch beim dreifachen der Nenndrehzahl. Ferner soll das Materialverhalten durch eine Finite Elemente Analyse berechnet werden, um für weiterführende Untersuchungen Vorhersagen des praktischen Versuchsverlaufs auf Basis von FE-Simulationen treffen zu können. Um eine möglichst realitätsnahe Simulation zu ermöglichen, müssen hierfür zunächst Materialdaten ermittelt und für die Berechnung aufbereitet werden.

2.3 Materialdatenermittlung

Die Herstellung der Elastomersterne erfolgt mit dem Material TPU (Thermoplastisches Polyurethan). Dies macht die Verwendung des Spritzgusses als Herstellverfahren möglich. Durch die Eigenschaften dieser Werkstoffgruppe, nämlich eine regellose physikalische Vernetzung der Makromoleküle, verhalten sich Bauteile aus diesen Werkstoffen je nach Konstruktion und Bauteildicke verschieden. Somit ist es nicht zielführend, an Normprüfkörpern (z.B. Zugstab) die Materialkennwerte zu ermitteln, es müssen direkte Messungen an den Elastomersternen durchgeführt werden. Durch die aufgebrachte Zugspannung werden die verschlungenen Molekülketten ausgerichtet; nach Wegnahme der Spannung stellt sich die ursprüngliche Anordnung durch die kristallinen physikalischen Vernetzungen wieder ein [3].
Für diesen Versuch wurde eigens spezielle Haltezangen für Zugversuche der verschiedenen Elastomersterngrößen konstruiert (Abbildung 1a)). Somit ist es möglich die maximale Kraft, die zum Abreißen eines Sternzackens benötigt wird, zu bestimmen. Für die Versuche standen Elastomersterne dreier verschiedener Shore-Härten zur Verfügung (Tabelle 1):

Tabelle 1: Materialdaten

Materialname	E-Modul [N/mm²]]	Shore-Härte
Material 1	25	85 (A)
Material 2	256	96 (A)
Material 3	948	98 (A)

Die Versuchsreihen hierzu wurden mit Hilfe einer ZWICK-Zugprüfmaschine durchgeführt (Abbildung 1a)). Die auf diese Weise ermittelten, so genannten technischen Spannungen beziehen sich jedoch auf den Ausgangsquerschnitt des Prüfteils, beziehen also nicht dessen Querschnittverringerung durch Einschnüren mit ein. Um dies zu Berücksichtigen müssen die Werte für die Simulation in wahre Spannung bzw. plastische Dehnung umgerechnet werden [2, 4]. Ferner wurden die Messdaten für die hyperelastische Materialmodellierung, bei der die im Wesentlichen die technischen Spannungen verwendet werden, normiert und angepasst. Die so berechneten Materialkennwerte sind in Abbildung 1b)-d) aufgetragen.

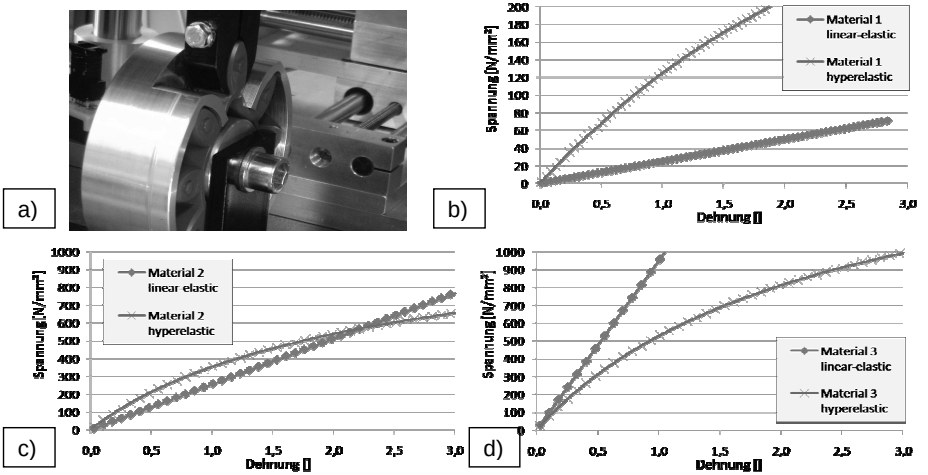


Abbildung 1: a) Spannvorrichtung für Zugversuche (oben links); Spannungs-Dehnungs-diagramm für b) Material 1 (oben rechts), c) Material 2 (oben links) und d) Material 3 (unten rechts)

3 Simulationsdurchführung

Methoden moderner Produktentwicklung umfassen in zunehmendem Maß den Einsatz computergestützter Werkzeuge. Schon vor der eigentlichen Fertigung kommen eine Vielzahl computergestützter Werkzeuge zum Einsatz. Durch immer detailliertere Simulationsmethoden kann das Verhalten von Werkstoffen bis zu einem gewissen Grad im Modell nachgebildet werden und für bestimmte Lastfälle vorausgesagt werden.

3.1 Aufbau eines FE-Modells

Zur Simulation des Bauteils unter Fliehkrafteinfluss wurde die Finite-Elemente-Berechnungssoftware ABAQUS 6.8-4 von SIMULIA verwendet, da sich damit nicht-lineare Materialdaten verarbeiten und elastisch-plastisches bzw. hyperelastisches Materialverhalten abbilden lassen.
Zunächst wurden die als CAD-Bauteile (aus dem CAD-Programm Pro/ENGINEER) vorliegenden Elastomersterne in das FE-Programm über die STEP-Schnittstelle importieren. Des Weiteren wurden die überarbeiteten Materialdaten in Form eines ABAQUS-Inputdecks in das Modell übernommen. Bei der anschließenden Vernetzung der Teile wurde ein quadratischer Tetraederansatz gewählt. Um die Einspannung zwischen den Klauen nachzubilden wurde der Stern mit einem virtuellen Fixpunkt gelagert [5].

3.2 Berechnungszyklen

Die Belastungen wurden gemäß der Datenblätter der Kupplungen aufgegeben. Hierbei wurden zwei Versuchsreihen simuliert. Bei der ersten wurde nur das Verhalten unter Fliehkraft simuliert, bei der zweiten zusätzlich das Nenndrehmoment als Drucklast auf die Sternzackenflanken aufgegeben. Das zugehörige FE-Modell ist in Abbildung 2 zu sehen. Es wurden Modelle der Sterne mit den drei verfügbaren Materialien simuliert. Es werden das linear-elastische, das elastisch-plastische und das hyperelastische Materialmodell aus Abaqus verwendet.

3.3 Berechnungsergebnisse

Zum Vergleich des Materialverhaltens werden bei Kunststoffen meist nur die Verformungen unter Last betrachtet [6]. Die zugehörigen Werte bei linear-elastischem Materialverhalten sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie die Berechnung zeigt, überwiegt bei derartig hohen Drehzahlen der Fliehkrafteinfluss und das zusätzlich aufgebrachte Drehmoment hat nur noch einen marginalen Einfluss auf das Endergebnis (Abbildung 2). Die Spannungswerte lagen für alle drei Materialien in einem unkritischen Bereich.

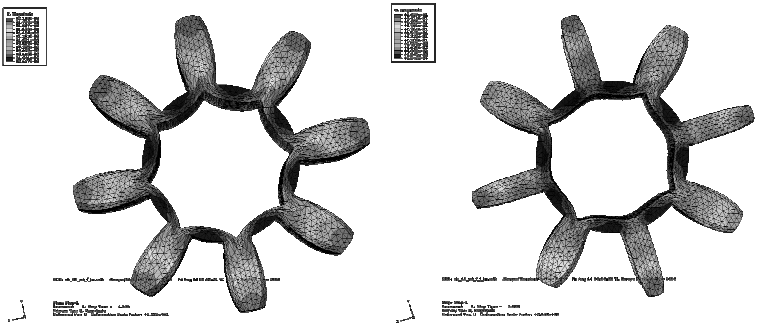


Abbildung 2: Verformungen ohne Drehmoment (links) und mit Drehmoment (rechts) (lineare FE-Berechnung)

Die vorhandenen Materialdaten aus den Zugversuchen wurden in ein elastisch-plastisches Materialgesetz in ABAQUS eingebunden. Auf Grund der hohen Belastungen in Kombination mit dem relativ weichen Material überschreitet jedoch Dehnungsinkrement fünfzig Mal die Dehngrenze des Materials, was beim elastisch-plastischen Materialmodell zu numerischen Instabilitäten führt.

Bei den hyperelastischen Materialgesetzen, welche gummiartige Materialien besser abbilden können, wurde zunächst die numerische Stabilität des Materialmodells geprüft. Hierbei erwies sich das Ogden-Modell der Ordnung 1 am stabilsten [4]. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Berechnungsergebnisse

Materialname	Verschiebung [mm] (nur Fliehkraft)		Verschiebung [mm] (Fliehkraft und Drehmoment)	
	linear	hyperelastisch	linear	hyperelastisch
Material 1	2,299	0,332	2,387	0,346
Material 2	0,218	0,089	0,264	0,106
Material 3	0,062	0,061	0,075	0,077

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die numerischen Instabilitäten des elastisch-plastischen Materialmodells können daher rühren, dass dieses Modell ursprünglich für Metalle gedacht ist, bei denen große Verzerrungen zu bleibenden plastischen Verformungen führen, während es bei gummiartigen Materialien zu keinen nennenswerten bleibenden Deformationen kommt.

Die Tatsache, dass das hyperelastische Modell bei Material 1 steifer rechnet als das lineare liegt darin begründet, dass bei diesem Material die hyperelastische Kurve weit unter der linearen Gerade liegt (Abbildung 1b)). Bei Material 2 schneidet die hyperelastische Kurve die lineare Gerade. Bis zu diesem Punkt (bei ca. 230% Dehnung) würde das hyperelastische Modell steifer rechnen, danach weicher. Da sich die Dehnungen jedoch weit unterhalb der kritischen Dehnung bewegen, ist auch hier ersteres der Fall (Abbildung 1c)). Bei Material 3 als steifstem der betrachteten Werkstoffe liegt die hyperelastische Kurve unter der linearen Geraden. Im Bereich der auftretenden, in diesem Fall sehr geringen, Dehnungen, liegen beide Kurven fast parallel, so dass die Ergebnisse sehr nahe beieinanderliegen (Abbildung 1d)).
Der Abgleich mit den tatsächlich gemessenen Verformungen zeigt, dass die Deformationen in derselben Größenordnung liegen, sich jedoch um den Faktor 2 bis 3 unterscheiden. Dies ermöglicht für das Einsatzgebiet der drehelastischen Kupplungen eine genügend genaue Vorhersage des Materialverhaltens, stellt jedoch die Verwendbarkeit der verfügbaren Materialmodelle für dieses Anwendungsgebiet in Frage.

4 Zusammenfassung

Bei derart weichen, wie den hier untersuchten Werkstoffen, sind elastisch-plastische Materialmodelle wenig geeignet, da die großen Dehnungen in Verbindung mit dem kleinen E-Modul zu numerischen Instabilitäten führen kann. Das hyperelastische Materialmodell ist für die Abbildung des Verhaltens von thermoplastischen Elastomeren besser geeignet, da sich hiermit auch große reversible Dehnungen berechnen lassen. Das rein lineare Hooke'sche Gesetz ist aufgrund der Nichtlinearität der Werkstoffe nicht ohne Einschränkungen anwendbar.
Weiterhin kann festgehalten werden, dass für die TPU-Sterne in den Bereichen maximaler Drehzahl der Einfluss des übertragenen Drehmomentes in keinem der betrachteten Fälle einen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis hatte.
Ferner ist es bemerkenswert festzustellen, dass bei TPUs, die sich nur über die Härte unterscheiden, derart unterschiedliches Materialverhalten zeigen. Daher können keine generellen Aussagen über die Eignung von hyperelastischen Materialmodellen für diese Werkstoffklasse getroffen werden und müssen für den Einzelfall separat untersucht werden. Die Möglichkeiten der in FE-Programmen implementierten Materialmodelle stoßen hierbei an ihre Grenzen. Für künftige Untersuchungen wäre die Entwicklung neuer Materialgesetze,

die das oben geschriebene Verhalten abbilden können ein zweckdienlicher Lösungsansatz. Die Berechnung thermoplastischer Polyurethane bleibt auch weiterhin ein interessantes Forschungsgebiet.

Literatur

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

[2] Alber-Laukant, Bettina: *Struktur- und Prozesssimulation zur Bauteildimensionierung mit thermoplastischen Kunststoffen: Validierung von Werkstoffbeschreibungen für den technischen Einsatz*. Diss., In: Fortschritte in Konstruktion und Produktion – Band 10, Aachen: Shaker-Verlag, 2008

[3] Roos, Eberhard; Maile, Karl: *Werkstoffkunde für Ingenieure*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2008

[4] o.V.: Getting started with ABAQUS. Providence: Dassault Systèmes, 2009

[5] Rieg, Frank; Hackenschmidt, Reinhard: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure – Eine leicht verständliche Einführung*. 3. Aufl. München: Hanser Verlag, 2009.

[6] Roos, Eberhard; Maile, Karl: Werkstoffkunde für Ingenieure. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2008

[7] Ehrenstein, Gottfried W.: Mit Kunststoffen konstruieren – Eine Einführung. 2. Aufl., München: Hanser Verlag, 2002

Einsatz von CAE Methoden zur Analyse und Verbesserung des Verhaltens eines Flächenportals bei der automatisierten Textilablage für Faser-Kunststoff-Verbunde

J.-H. Ohlendorf, Ch. R. König, M. Kochmann, D. H. Müller, K.-D. Thoben

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

Inhalt: *Die Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden, insbesondere von großflächigen Bauteilen wird heute mit einem hohen manuellen Anteil durchgeführt. Für die reproduzierbare Positionierung von technischen Hochleistungstextilien zur Fertigung von großflächigen Faser-Kunststoff-Verbunden wurde am BIK ein Demonstrator aufgebaut. Die Untersuchung besteht aus der Analyse von Ablagequalität und Ablagedauer in Bezug auf Vibrationen bzw. dem Schwingungsverhalten des Demonstrators. Dazu wird die Zykluszeit, mit den Parametern Geschwindigkeit, Beschleunigung und Nebenzeiten in Bezug zur notwendigen Abklingzeit für die Positioniergenauigkeit des abzulegenden Textils gesetzt. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung wird eine optimale Kombination von Geschwindigkeit und Beschleunigung in Bezug zu Nebenzeit, minimaler Abklingzeit und Positioniergenauigkeit ermittelt. Ebenfalls wird das Eigenschwingungsverhalten des Systems durch die Finite-Elemente-Methode untersucht. Aufbauend werden die durch eine experimentellen Modalanalyse ermittelten Werte mit dem realen System verglichen und so das Potential zur Verbesserung von Bahnkurven und Roboterstruktur gegeben.*

Abstract: *The manufacturing of fibre reinforced plastics is mainly a manual process, especially for extensive parts. At the BIK a demonstrator has been build up to test the positioning of the technical textiles for extensive parts in a repeatable way. The object under investigation is the achieved product quality and the production speed related to the vibration and the damping behavior of the system. The required process time is determined by kinematic parameters, i.e. speed, acceleration and nonproductive time of the system versus the positioning accuracy of the positioned textiles. The natural frequency has been analysed by the finite element analysis. To identify the possible potential of the robot path and the machine structure an experimental modal analysis has been compared with the real system behaviour.*

Stichwörter: *Technische Textilien, Faser-Kunststoff-Verbund, Automatisierung, CAE-Methoden, FEM, Modalanalyse, Statistische Versuchsplanung, Schwingungsverhalten, Positioniergenauigkeit*

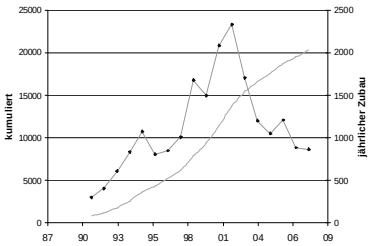
Keywords: *technical textiles, fibre reinforced plastics, automation, CAE-methods, FEA, modal analysis, design of experiments, vibration characteristics, positioning accuracy*

1 Motivation und Ausgangssituation

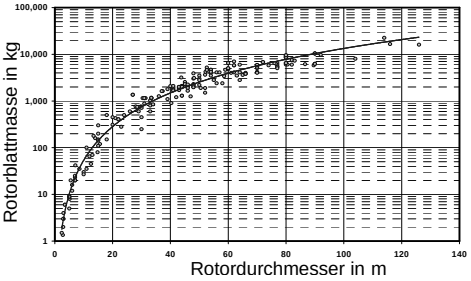
Um den CO_2-Ausstoß und damit die möglichen Konsequenzen der globalen Erwärmung nachhaltig zu reduzieren, ist der Einsatz von regenerativen Energieformen Voraussetzung. In der letzten Ausführung des „Erneuerbare-Energien-Gesetzes“ hat die Bundesregierung einen Anteil der regenerativen Energien im Jahre 2020 von mindestens 30 % festgelegt. [1] Der Anteil der Windenergie an den regenerativen Energien (Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen) soll mit 50 % den größten Teil ausmachen. Dazu ist eine Verdoppelung der aktuellen Leistung notwendig. [2]

Der Kostendruck bei der Investition in Windenergieanlagen führt zu der Notwendigkeit, wirtschaftlichere Fertigungsverfahren mit hoher Prozesssicherheit und Zykluszeit einzusetzen. Ein großes Potential zur Kostenreduktion besteht bei der Rotorblattfertigung.

Vor dem Hintergrund eines Einsatzes auf See sind wachsende Längen, aktuell wird von Längen von 65 m und mehr ausgegangen, bei steigender Stückzahl eines Blatttyps zu erwarten (vgl. dazu Bild 1 a). Dabei ist die Vergrößerung des Rotordurchmessers für eine Leistungssteigerung von Windenergieanlagen aufgrund der größeren überstrichenen Fläche maßgeblich. [3]



a)



b)

Bild 1: a) Anzahl der Windenergieanlagen von 1987 bis 2008, kumuliert (gelb) und jährlicher Zubau (grau) [4] b) Massen verschiedener Rotorblatttypen aufgetragen über den Rotordurchmesser [5]

Um die Sicherheitsfaktoren, die aufgrund der vorhandenen Streuungen in den Fertigungsprozessen notwendig sind, reduzieren zu können und damit das Gewicht eines Rotorblattes zu verringern, ist eine präzisere und reproduzierbare Fertigung Voraussetzung. Für die reproduzierbare Positionierung von technischen Hochleistungstextilien zur Fertigung von großflächigen Faser-Kunststoff-Verbunden wurde am BIK ein Demonstrator aufgebaut [6, 7, 8, 9] (vgl. Bild 2 a, b).

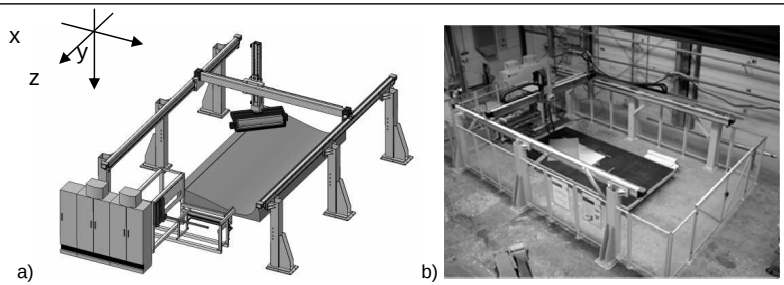


Bild 2: Demonstrator (Flächenportals) zur automatisierten Ablage von biegeschlaffen Materialien a) CAD-Modell b) umgesetzte Konstruktion [6, 7, 8, 9]

Die vorliegende Untersuchung besteht aus der Analyse von Ablagequalität und Ablagedauer in Bezug auf Vibrationen bzw. dem Schwingungsverhalten des Demonstrators. Dazu wird die Zykluszeit, mit den Parametern Geschwindigkeit, Beschleunigung und Nebenzeiten in Bezug zur notwendigen Abklingzeit für die Positioniergenauigkeit des abzulegenden Textils gesetzt. Die Eigenschaften des positionierten Textils, wie beispielsweise die positionierte Kante [9], die Bahnlänge [10] oder die Faserausrichtungen [11] werden zum Vergleich sowie nach Ablage bestimmt.

2 Versuchsplanung: Faktoren, Faktorstufen

Für die Festlegung der relevanten Versuchsparameter zur Bestimmung von Nebenzeit, minimaler Abklingzeit und Positioniergenauigkeit wurde ein Screening durchgeführt, welches die Faktoren „Effektorposition“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ als relevant identifiziert hat.

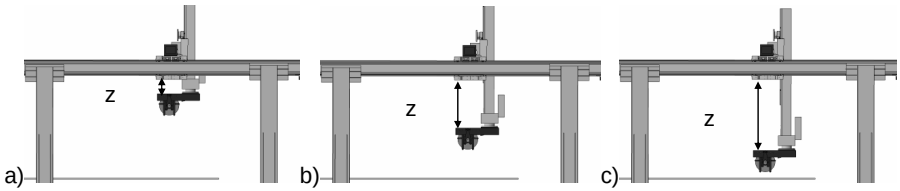


Bild 3: verschiedene Effektorpositionen für die Versuchsreihen a) z=-480 mm b) z=0 mm c) z=+480 mm

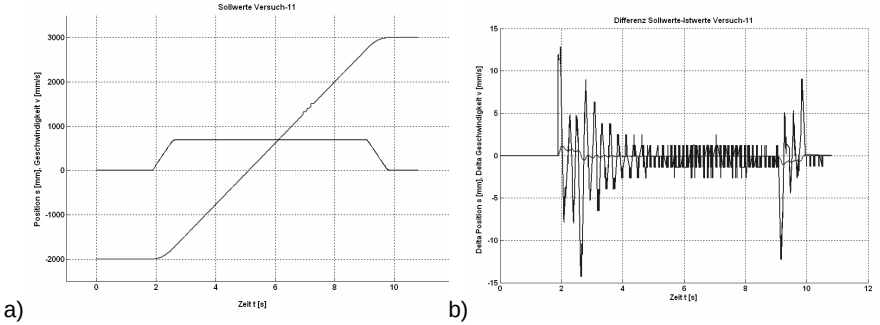
Diese Faktoren wurden mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Faktorstufen in einen 5x5x3 Versuchsplan [12, 13] überführt.

Tabelle 1: Faktoren und Faktorstufen, 5x5x3 mit n=5

Faktorstufen		1	2	3	4	5
Faktoren	Einheit					
Geschwindigkeit	[mm/s]	300	400	500	600	700
Beschleunigung	[mm/s^2]	600	800	1000	1200	1400
Effektorposition	[mm]	-480	0	480	-	-

Position und Geschwindigkeit des Demonstrators (Sollwerte und Istwerte)

Für die Versuchsreihe wurden die Fahrdiagramme (Position und Geschwindigkeit) über die Zeit sowie die Abweichung von den Sollwerten aufgenommen. Die Länge des Bewegungspfades von l=5.000 mm wurde ausschließlich mit einer Positionsveränderung der x-Achse sowie der Effektorhöhe (z-Achse) als Faktor durchgeführt.



a) b)

Bild 4: Exemplarisches Fahrdiagramm (v=700 mm/s, a=1200 mm/s^2) (Regeltakt Δt=0,002 s) a) Sollposition (rot) und -geschwindigkeit (blau) b) Abweichungen der Soll- und Istwerte von Position und Geschwindigkeit

Aufgenommen wurden die Fahrdiagramme durch die Auswertung der Encoder-Daten der Antriebe.

Prozesszeiten, Schwingungsverhalten und Eigenfrequenz des Demonstrators

Auf der Grundlage der gegebenen Genauigkeit bei der textilen Ablage, welche je nach Branche der späteren Faser-Kunststoff-Verbunde variiert, wurde ein Schwellwert S_{Amp}=0,25 mm für die Amplitude definiert, bei dem eine reproduzierbare Textilablage möglich ist. Exemplarisch ist in der folgenden Abbildung eine Prozessvariante (vgl. Tabelle 1) sowie ein exemplarisches Schwingungsverhalten und die Eigenfrequenz des Systems aufgetragen.

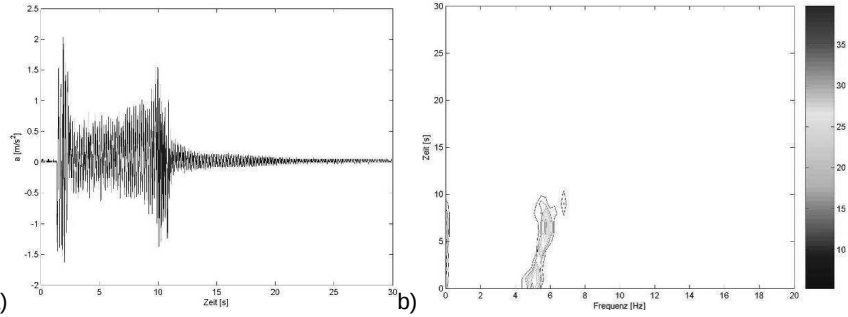


Bild 5: Obere Effektorposition z=480 mm, v=600 mm/s; a=600 mm/s^2 a) am TCP aufgenommene Schwingungen a in x-Richtung (blau), unterhalb von S_A (schwarz) b) schnelle Fourier-Transformation (FFT) zur Ermittlung der Eigenfrequenz (~5,5 Hz)

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die kürzeste Prozessdauer zum Verfahren (hohe Geschwindigkeit, hohe Beschleunigung) nicht zu einer minimalen Prozesszeit für den Beginn des Ablegeprozesses führt (vgl. exemplarisch in Bild 5a).

Experimentelle Modalanalyse und Finite Elemente Modellierung

Zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens wurde eine Modalanalyse durchgeführt. Dazu wurde die Quertraverse (y-Achse) sowie die z-Achse und der Effektor mit entsprechenden Markierungen für eine Schwingungsanregung versehen. Über diese definierten Punkte wurde das System zur Eigenschwingung angeregt. Die Messwerte wurden über den auch im vorherigen Versuch verwendeten, triaxialen Beschleunigungsaufnehmer im Tool Center Point (TCP) gemessen und in ein Modell überführt. Bild 6b stellt dies Modell des ersten Eigenschwingungsmodus dar.

Die Modalanalyse ergibt eine Eigenfrequenz des Systems bei z=-480 mm von f_e=4,89 Hz, bei einer Dämpfungsrate von D=0,99 %. Dieser Wert deckt sich mit den in der ersten Versuchsreihe gemessenen Eigenfrequenzen von f_e=3,9 - 4,7 Hz.

Zusätzlich wurde das Eigenschwingungsverhalten des Systems mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode untersucht (vgl. Bild 6c). Als Eigenfrequenz des Systems (z=-480 mm) ergab sich f_e=5,31 Hz mit einer Dämpfungsrate von D=1,11 %.

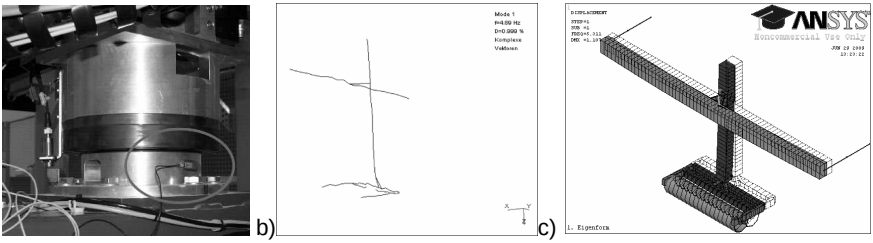
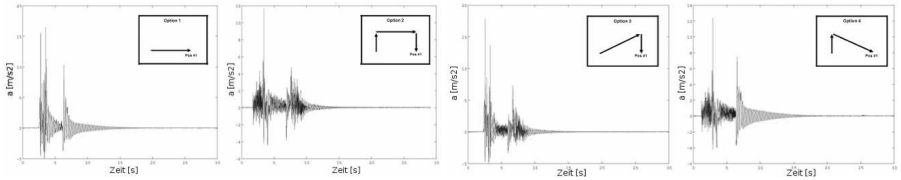


Bild 6: a) Beschleunigungsaufnehmer im TCP b) Mit PULSE^{TM}-System aufgebautes Modell, erster Eigenschwingungsmodus (z=-480 mm) c) FEM-Simulation des dynamischen Verhaltens, erste Eigenform mit 5,311 Hz mit z=-480 mm (unverformter Körper als Kontur sichtbar)

3 Auswertung und Optimierungen

Optimierte Bahnkurven

Um eine minimale Gesamtzeit aus Prozessdauer und Ausschwingdauer (S_{Amp}=0,25 mm) der Positionierfahrt zu erreichen, wurden ebenfalls verschiedene Bahnkurven experimentell untersucht. Die vier analysierten Bahnkurven sind mit Gesamtprozessdauer und Schwingungsverhalten in Bild 7 dargestellt.



t_{ges}=11,5 s	t_{ges}=7 s	t_{ges}=10,5 s	t_{ges}=13,5 s

Bild 7: alternative Bahnkurven zur Effektorpositionierung mit schematischer Darstellung der Bahnkurven sowie dem Schwingungsverhalten entlang der x-Achse des Demonstrators (blau, ab S_{Amp} schwarz)

Zu erkennen ist, dass die Bahnkurve mit der kürzesten Verfahrstrecke nicht die günstigste für eine minimale Gesamtprozessdauer ist. Als vorteilhaft hat sich Variante 2 herausgestellt, bei dem die Anregung des Systems im Bereich der Eigenfrequenz nach den durchgeführten Versuchen geringer ausfällt.

Konstruktive Optimierung, Roboterstruktur

Für eine weitere Optimierung der Prozesszeiten durch eine weitere Reduzierung der Ausschwingzeit bei gleichzeitiger Verringerung von S_{Amp} ist es sinnvoll, die Masse m der

Effektoreinheit zu verringern, so dass die Eigenfrequenz größer und eine stärkere Dämpfung ermöglicht wird. Für die Konzeptionierung der konstruktiven Änderungen zur Gewichtsreduzierung wurde ebenfalls die FEM genutzt. Dazu wurde die Effektormasse in der Simulation stufenweise reduziert. Zur Abschätzung kamen die in Tabelle 2 dargestellte Variante zum Einsatz.

Tabelle 2: Konzeptionsvariante zur Gewichtsreduzierung der Effektoreinheit

Gewicht der Effektoreinheit		[kg]
Aktueller Stand	-	187,5
Variante 1	Strukturtechnische Optimierung der Effektorhalterung, Austausch der Effektortrommel durch eine CFK Variante	~167,8

Die mit Hilfe eines CAD-Systems ermittelten Gewichte und Geometrien wurden in das bestehende FEM Modell integriert. Die Ergebnisse der FEM-Simulation haben gezeigt, dass die kritische erste Eigenfrequenz von 5,311 Hz auf 5,516 Hz (bei z=-48 mm) angehoben wurde.

4 Zusammenfassung

Zur Optimierung der Prozesszeiten bei der Ablage von technischen Textilien für Faser-Kunststoff-Verbunde wurde mit Hilfe von CAE-Methoden (CAD, FEM-Analysewerkzeug sowie der Modalanalyse) das Betriebs- und Schwingungsverhalten einer automatisierten Lösung analysiert.

Neben der Optimierung der Bahnkurven ist eine konstruktive Modifikation der Anlage angedacht (vgl. Tabelle 2). Primär soll die Masse der Effektoreneinheit reduziert werden. Dazu sind erste Konzeptstudien eines Effektors aus carbonfaserverstärktem Material entstanden, der die notwendige Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Masse besitzt. Diese Massenreduzierung soll die Eigenfrequenz des Systems verschieben, um die Belastungen zu reduzieren sowie die Dämpfung zu verstärken, um die Ausschwingdauer bis zum Erreichen von S_{Amp} weiter zu reduzieren. Dazu sind weitere experimentelle Versuche, wie eine erneute Durchführung der Dynamikversuche, vorgesehen.

Literatur

[1] BMU (Hrsg.): *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) 2009*, In: Bundesgesetzblatt Jg. 2008 Teil I, Nr. 49, Bonn : 31. Oktober 2008, S. 2074.

[2] BUNDESVERBAND WINDENERGIE E.V., http://www.wind-energie.de (Zugriff 22.06.2009).

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

[4] DEUTSCHES WINDENERGIE INSTITUT (HRSG.): Windenergie in Deutschland – Aufstellungszahlen für das Jahr 2008. http://www.dewi.de (Zugriff 22.06.2009).

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

[6] GEBAUER, I. ; MÜLLER, D. H. ; OHLENDORF, J.-H. ; KOCHMANN, M. ; WEIGEL, L.: *Quality Improvement of Rotor Blades.* In: Deutsches Windenergie Institut (Hrsg.), 8th German Wind Energy Conference (DEWEK 2006), Bremen : o. V., 2006.

[7] DÖRSCH, C. ; GEBAUER, I. ; MÜLLER, D. H.: *Process- and handling technologies for serial production of large composite parts*. In: International Conference on Applied Production Technology (APT), Bremen : o. V., 2007.

[8] DÖRSCH, C. ; OHLENDORF, J.-H. ; GEBAUER, I. ; MÜLLER, D. H. ; WEIGEL, L.: *Teilautomatisiertes preforming zur Qualitätssicherung und Verkürzung von Fertigungszeiten von Windenergieanlagen*. In: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik Jg. 38 (2007), Nr. 11, S. 915–921.

[9] MÜLLER, D. H. ; WEIGEL, L.: Gemeinsamer Technischer Abschlussbericht für das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte Verbundprojekt "preblade". Bremer Institut für Konstruktionstechnik, Abeking & Rasmussen Rotec GmbH & Co. KG, 2008

[10] MÜLLER, D. H. ; OHLENDORF, J.-H. ; ROLBIECKI, M. ; SCHRÖDER, K. ; THOBEN, K. -D.: *Measurement of length for textile pre-cuts in the automated production of rotor-blades*. In: Deutsches Windenergie Institut (Hrsg.), 9th German Wind Energy Conference (DEWEK 2008), Bremen : o. V., 2008.

[11] MÜLLER, D. H. ; OHLENDORF, J.-H. ; KOCHMANN, M.: *Measurement of fibre position and orientation in textiles for the production of fibre reinforced plastics.* In: Deutsches Windenergie Institut (Hrsg.), 9th German Wind Energy Conference (DEWEK 2008), Bremen : o. V., 2008.

[12] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren.* 2., erweiterte Auflage. München : Hanser Verlag, 2001.

[13] SCHEFFLER, E.: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung.* 3. neu bearbeitete und erweitere Auflage. Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997.

[14] DRESIG, H. ; HOLZWEIßIG, F.: *Maschinendynamik*. 9, bearbeitete Auflage, Berlin : Springer Verlag, 2009.

FE-Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlaufs von Kunststoff-Direktverschraubungen

Y. Yao[1], R. Renz[2]

[1] Abteilung für Dichtungstechnik und Kunststoffe, Schaeffler KG
IndustrieStr. 1-3, 91074 Herzogenaurach
Email: yuan.yao@schaeffler.com; Internet: http://www.ina.com
[2] Lehrstuhl für Ressourcengerechte ProduktEntwicklung (RPE), TU Kaiserslautern
Gottlieb-DaimlerStr. 44, 67663 Kaiserslautern
Email: renz@mv.uni-kl.de; Internet: http://recycling5.mv.uni-kl.de

Inhalt: *Für die lösbare Verbindung von Kunststoffbauteilen sind Direktverschraubungen das dominierende Fügeverfahren. Das kunststofftypische Verhalten bewirkt allerdings bei thermischer Belastung eine deutliche Abnahme der Vorspannkraft, die detailliert analysiert wird. Ein spritzgegossener Tubus aus PA6-GF30, der aufgrund der Faserverstärkung inhomogen und anisotrop ist, wird ortsaufgelöst untersucht. Hierauf aufbauend werden die lokalen Werkstoffparameter für die FE-Analyse ermittelt. Die FE-Analyse der Direktverschraubung (Einfluss von Zeit und Temperatur auf Vorspannkraft) selbst wird experimentell anhand des Vorspannkraftverlaufs sowie der Oberflächendeformation überprüft und optimiert.*

Abstract: *To obtain a detachable joint of plastic components, direct assembly using self-tapping screws can be seen as the most important joining technique. The typical behaviour of plastic materials under thermal load leads to a significant decrease of the clamp load, which is analyzed in detail. A PA6-GF30 boss (which exhibits inhomogeneity and anisotropy due to the fibre reinforcement) manufactured by injection moulding was investigated with a high spatial resolution to obtain the local material parameters for finite element analysis. The results of the finite element analysis of the direct assembly (especially the influence of time and temperature on the clamp load) were confirmed using experimentally obtained data from the clamp load changes as well as the surface deformation of the boss. Additionally, the experimental results were used to optimize the FE simulation.*

Stichwörter: *Direktverschraubung, Vorspannkraft, Relaxation, Simulation, optische Messtechnik.*

Keywords: *direct assembly, clamp load, relaxation, simulation, optical measurement.*

1 Einleitung

Die Vorteile der Direktverschraubungen sind die kostengünstige Befestigungstechnik und deren hohe Festigkeit. Allerdings wird durch das zeit- und temperaturabhängige Verhalten der Kunststoffe und deren größere Wärmedehnung gegenüber Metallen bei thermischer Belastung eine deutliche Abnahme der Vorspannkraft beobachtet. Dieser Mechanismus

wird bislang jedoch nicht vollständig verstanden. Aus der umfangreichen Literatur werden nur die wesentlichen Originalarbeiten zitiert [1-3]. Durch den gekoppelten Einsatz von experimentellen Verfahren (Vorspannkraftmessung, berührungslose optische Messverfahren zur ortsaufgelösten Deformationsanalyse) und FE-Simulation wird der Einfluss von Zeit und Temperatur auf den Vorspannkraftverlauf analysiert.

2 Probenmaterial und Versuchseinrichtungen

Die Untersuchungen bestehen aus einer Schraube vom Typ Delta PT-60 aus Vergütungsstahl und den Tuben aus glasfaserverstärktem Polyamid (PA6-GF30 Ultramid B3WG6 1,2 % Wassergehalt) mit zentralem Anguss am Tubusfuß. Weiterhin wurde die lokale Faserorientierung in Moldflow® simuliert (Abb. 1 rechts).

Der Verschraubungsprüfstand ermöglicht definierte Einschraubbedingungen, wo die Vorspannkraft mit kalibrierten Ringkraftmessdosen ermittelt wird. Die Montageparameter sind: Einschraubtiefe: 11,2 mm, Drehzahl: 500 U/min (Eindrehen); 50 U/min (Anziehen), Anfangsvorspannkraft: 1,5 kN. Die Temperaturversuche werden in einem programmierbaren Ofen durchgeführt, mittels Thermoelementen wird die Temperatur der Luft und eines Referenztubus gemessen.

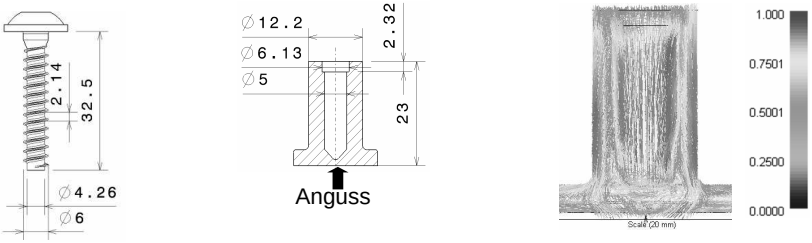


Abb. 1: links: Schraube (Delta PT-60 der Fa. EJOT); mitte: Tubus (PA6-GF30); rechts: Faserorientierung

3 Eingesetzte berührungslose optische Messverfahren

Zur ortsaufgelösten und zeitabhängigen Ermittlung des Deformationsverhaltens von Tubus und Direktverschraubung werden wegen der besonders hohen Orts- und Dehnungsauflösung das Digital Image Correlation (DIC) und das Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) [4] für Sonderfragen eingesetzt. Das DIC stellt ein einfach zu handhabendes Verfahren der Verformungsmessung dar [5]. Das zu erfassende Bauteil wird mit einer oder zwei CCD-Kameras während der Belastung beobachtet. Ein auf die Bauteiloberfläche aufgebrachtes zufälliges Strukturmuster wird in den unterschiedlichen Lastzuständen aufge-

nommen. Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung werden in den Bildern des Ausgangzustandes Facetten definiert, die in jedem weiteren Bild hochpräzise wiedergefunden werden. Über photogrammetrische Algorithmen erhält man für jeden Lastzustand 3D-Koordinaten der Facetten auf der Bauteiloberfläche. Aus den 3D-Koordinaten werden dreidimensionale Verschiebungen und ebene Dehnungen sowie die Kontur des Bauteils flächenhaft und hoch aufgelöst berechnet. Es können Dehnungen von 0,05 % bis zu mehreren 100 % gemessen werden.

4 Experimentelle Ermittlung der lokalen Eigenschaften des Tubus

Die Glasfaserverteilung des spritzgegossenen Tubus ist inhomogen, was mit inhomogenen mechanischen Eigenschaften verbunden ist. Daher ist für die FE-Berechnung die Ermittlung der lokalen Eigenschaften notwendig. Es wird vereinfachend von isotropem Verhalten ausgegangen. Der aus dem Druckversuch ermittelte E-Modul und der bei freier Wärmeausdehnung ermittelte Wärmeausdehnungskoeffizient zeigen das lokal extrem unterschiedliche Verhalten (Abb. 2 links).

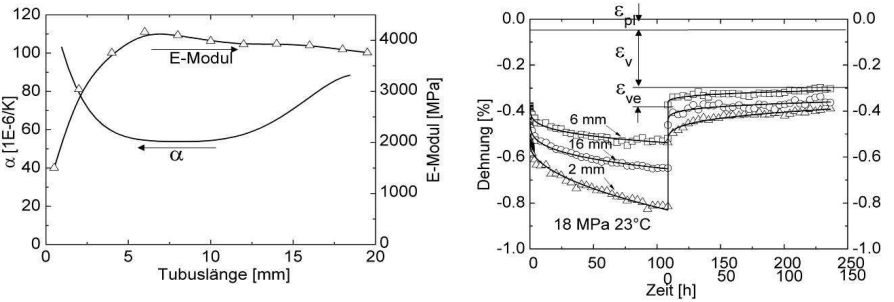


Abb. 2: links: lokale Werte von E-Modul (RT, 1,2 % lf.) und Wärmeausdehnungskoeff. des Tubus; rechts: lokale viskoelastische, viskose und plastische Verformungsanteile des Tubus

Für die zutreffende Beschreibung des zeit-, temperatur- und belastungsabhängigen Verhaltens des Tubus wird ein erweitertes Burgermodell gewählt. Es berücksichtigt die elastische, plastische und die Kriechdeformation. Zur lokalen Kennwertermittlung werden auf den Tubus unterschiedliche Belastungsformen aufgeprägt und das Dehnungsverhalten ermittelt (Abb. 2 rechts).

5 Experimentelle Untersuchungen der Direktverschraubung

5.1 Oberfläche Deformation

Zur Deformationsanalyse des Tubus im verschraubten Zustand wird eine verfeinerte Messtechnik eingesetzt, da beim verschraubten Tubus durch die zumeist nicht achsensymmetrisch wirkende Schraube ein über den Umfang unterschiedlicher Dehnungsverlauf auftritt. Durch eine Rundummessung des Tubus mittels einer Drehvorrichtung ist eine Mittelwertbildung der Tubusdehnung im verschraubten Zustand möglich (Abb. 3 links), was für die Ermittlung der repräsentativen Dehnungen zum Vergleich mit der FE-Berechnung wesentlich ist.

Beim Anziehen (RT) tritt eine deutlich negative Dehnung (Abb. 3 rechts) zum Schraubenkopf hin auf (0 mm). Eine Tubusstauchung liegt bis ca. 12 mm vor, dies entspricht ca. 5 Gewindegängen und charakterisiert den Kraftübertragungsbereich. Beim Erwärmen tritt, bedingt durch die Wärmedehnung des Kunststoffs, eine markante Dehnungszunahme unter dem Schraubenkopf auf. Bei dem Haltevorgang über 72 h fällt der Dehnungsverlauf kriechbedingt leicht ab. Nach dem Abkühlen liegt der Dehnungsverlauf deutlich unterhalb des Dehnungsverlaufs beim Anziehen/RT.

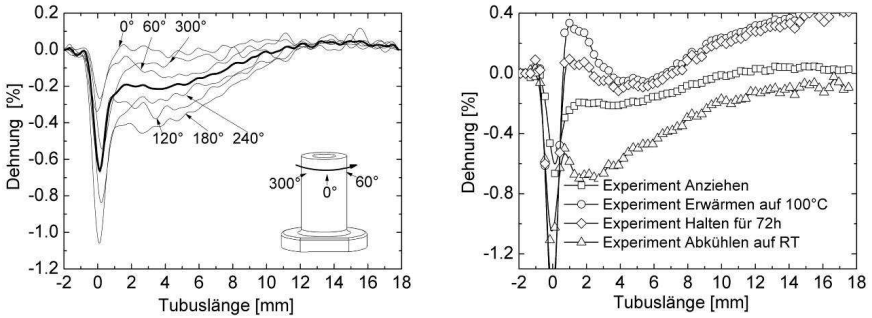


Abb. 3: links: vollständige Ermittlung des Dehnungsverlaufs über den Umfang des Tubus durch dessen Rotation und die Länge (Anziehen auf 1,5 kN, RT); rechts: gemittelter Dehnungsverlauf des Tubus

5.2 Vorspannkraftverlauf

Der Vorspannkraftverlauf des Tubus in den einzelnen Phasen Anziehen, Erwärmen, Relaxation bei T_{max} und Abkühlen, zeigt jeweils ein typisches Verhalten (Abb. 4 links). In der Erwärmungsphase steigt die Vorspannkraft zunächst bis 40 °C an. Danach tritt ein Abfall der Vorspannkraft auf, wobei die maßgebenden Faktoren Wärmedehnung, Abnahme des E-Moduls und zunehmendes Kriechverhalten sind. Bei der anschließenden konstanten

Temperaturlagerung bei 100 °C über 72 h liegt hauptsächlich Relaxation vor. Daneben sind auch jeweils auf die Vorspannung gegenläufig wirkende Einflüsse vorhanden (Abnahme Wassergehalt von 1,2 % auf ca. 0,3 % und Nachkristallisation). In der Abkühlungsphase sinkt die Vorspannkraft nahezu linear mit der Temperatur ab, da nur der quasi konstante Wärmeausdehnungskoeffizient und der temperaturabhängige E-Modul von Einfluss sind.

6 FE-Simulation

Die Direktverschraubung wird im FE-Programm ABAQUS axialsymmetrisch modelliert. Die Materialeigenschaften des Tubus werden vereinfacht als isotrop, jedoch inhomogen angenommen. Der Tubus wird hierbei in einer ingenieurmäßigen Vereinfachung in drei isotrope Zonen aufgeteilt. Schraube und Unterlagscheibe besitzen die Eigenschaften von Stahl.
Als empirisches Ersatzmodell wird das Kriechgesetz von Bailey-Norton verwendet, in dem die viskoelastischen und viskosen Dehnungsanteile in einer Potenzfunktion als Kriechdehnung zusammengefasst sind.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{cr}(t) = P_1 + P_2\sigma^{P_3}t^{P_4} \quad (1)$$

Für die Berücksichtigung des Einflusses der Feuchtigkeitsabnahme auf die Volumenabnahme wurde eine Subroutine in FORTRAN programmiert.

$$\varepsilon_{ii}^{sw} = r_{ii} \cdot \frac{1}{3}\varepsilon_{vol}^{sw}t^n = \frac{1}{3}P_1 \cdot t^{P_2} \quad (2)$$

Die Steifigkeitsveränderung durch Nachkristallisation und Feuchtigkeitsabnahme wurde während der Berechnung mit einer Variablen in ABAQUS je nach dem Materialzustand variiert.
Für die FE-Simulation werden die ortsaufgelösten Kennwerte der Werkstoffeigenschaften des Tubus (Kurzzeit E-Modul und Kriechverhalten) bei erhöhter Temperatur benötigt. Diese werden ingenieurmäßig mit Hilfe der Campus-Datenbank ermittelt. Ausführliche Erläuterungen dazu sind aus [6] zu entnehmen.

6.1 Simulation von Vorspannkraft und Tubusdeformation

Bei der Simulation des Verspannungssystems werden die einzelnen Belastungsphasen betrachtet. Aus programmtechnischen Gründen in der FE-Berechnung mit ABAQUS kann das Kriechen nur bei einer konstanten Temperatur berücksichtigt werden. Deshalb gibt es eine Beschränkung auf die relevanten Dehnungsanteile in den einzelnen Phasen. Die

Vorspannkraftsimulation ergibt leicht höhere Werte als das Experiment (Abb. 4 links). Der simulierte Kraftverlauf in den einzelnen Phasen stimmt gut mit dem Experiment überein. Die Restvorspannkraft beim Abkühlen wird mit guter Näherung simuliert.

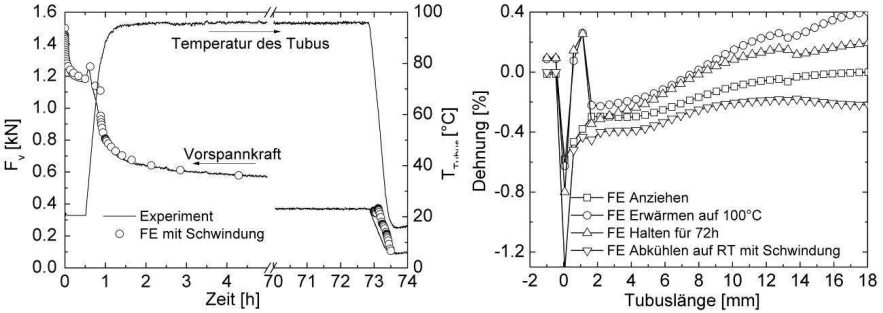


Abb. 4: links: Vorspannkraftverlauf, Experiment und Simulation (Anziehen auf 1,5 kN; T-t-Belastung: RT, 72 h/100 ℃, RT); rechts: Dehnungsverlauf des Tubus (FE-Simu lation)

Zum Vergleich zwischen Experiment und FE-Simulation der Direktverschraubung wird neben dem anwendungstechnisch wichtigen Vorspannkraftverlauf die Oberflächendehnung des Tubus herangezogen, die eine differenziertere Vergleichsmöglichkeit bietet. Allerdings kann der Dehnungswert an der Grenzfläche Tubus/Unterlagscheibe aus experimentellen Gründen nicht sicher angegeben werden.

Bei den einzelnen Phasen liegt eine unterschiedlich gute Übereinstimmung zwischen Experiment und FE-Simulation vor (Abb. 3 rechts und Abb. 4 rechts). Beim Anziehen (RT) ist die Übereinstimmung gut. Bei der Erwärmung auf 100 ℃ zeigen Simulation und Experiment eine ähnliche Dehnungsspitze bei ca. 1 mm Tubuslänge. Das Profil ist jedoch schärfer ausgeprägt, was auf die relativ grobe zonenweise Festlegung der Materialkennwerte zurückzuführen ist. Nach dem Haltevorgang (100 ℃, 72 h) liegt gegenüber der Aufheizphase nur eine geringe Veränderung vor, dies entspricht auch dem Experiment. Beim Abkühlen auf RT tritt eine deutliche Dehnungsabnahme in der Nähe des Tubuskopfes auf. Der weitere Verlauf entlang des Tubus entspricht jedoch der Situation beim Anziehen. Im Unterschied hierzu zeigt das Experiment eine deutliche Dehnungsabnahme. Bei der Tubuslänge von ca. 12-16 mm liegt eine Dehnungsabnahme von ca. 0,15 % vor, da hier im wesentlichen keine Schraubenkräfte übertragen werden, ist dieser Effekt auf Nachschwindung und in geringerem Maße auf Feuchtigkeitsverlust zurückzuführen [7-8].

6.2 Spannungs- und Lastverteilung im Gewinde

Die lokalen Spannungen im Kerbgrund des Tubusgewindes lassen sich genauer betrachten. Ein hoher lokaler Spannungszustand führt zu einer schnellen Relaxation der Spannung. Das Verschraubsystem unter Vorspannung hat einen geschlossenen Kraftfluss. Die Spannung im ersten Gewinde liegt bei 48 MPa, wobei sie im letzten Gewinde einen Wert von nur 13 MPa aufweist. Nach der Erwärmung bis 100 ℃ sinken die Spannungen jedes Gewindegangs auf fast den gleichen Wert von ca. 10 MPa. Nach 72 h bei einer konstanten Temperatur von 100 ℃ reduzieren sich diese Spa nnungen weiterhin auf Grund des Relaxationsvorgangs und betragen jeweils ca. 8 MPa. Nach der Abkühlung steigt die Spannung generell in jedem Gewindegang auf 14 MPa. Es gibt zwei Gründe dafür: erstens die Steifigkeitserhöhung unter RT und zweitens die Volumenschwindung des Materials im Gewindespitzebereich. Die Volumenschwindung verursacht eine Schrumpfkraft, wenn die Schwindung durch die Schraubeflanken verhindert wird (Abb. 5 links).

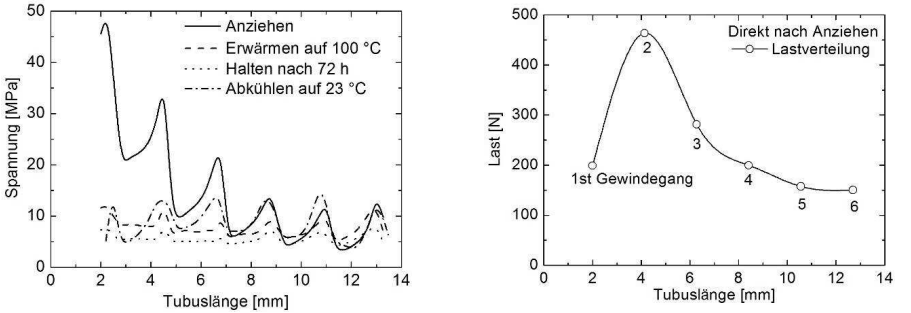


Abb. 5: links: Spannungsverteilung entlang der Messlinie bei verschiedenen Zustände; rechts: Lastverteilung nach dem Anziehen

Die Last wird durch die Kontaktpressung über Tragfläche mit Intergral berechnet. Die Unterschiede in der Lastverteilung entstehen dadurch, dass das erste Gewinde nicht die größte Last trägt, sondern der zweite Gewindegang. Erklärbar dadurch, dass im ersten Gewindegang eine maximale lokale Spannung vorhanden ist, im zweiten Gewinde jedoch eine größer wirkende Tragfläche auftritt.

7 Schlussfolgerung

Durch den gekoppelten Einsatz von experimentellen Verfahren (Vorspannkraftmessung, berührungslose optische Messverfahren zur ortsaufgelösten Deformationsanalyse) und FE-Simulation ist es gelungen, den Einfluss von Zeit und Temperatur auf den Vorspann-

kraftverlauf zu analysieren. In weitergehenden Untersuchungen der Spannungs- und Lastverteilung können Aspekte der geometrischen Gestaltung von Tubus und Schrauben sowie der Werkstoffwahl des Tubus aufgegriffen werden.

Literatur

[1] Ehrenstein, G. W.; Mohr, H.: Gewindeformende Schrauben für Kunststoffbauteile. Verbindungstechnik 10 (1978), 11, S. 13-19

[2] Großberndt, H.: Direktverschraubungen an thermoplastischen Kunststoffen. Kunststoffe 73 (1983), 11, S. 701-707

[3] Renz, R. et al.: Recyclinggerechte Befestigungstechnik bei Bauteilen aus thermoplastischen Kunststoffen. FKM-Forschungsvorhaben Nr. 216, 1998

[4] Yang, L.; Ettemeyer, A.: *Strain measurement by three-dimensional ESPI*. Optical Engineering 42 (2003) S.1257-1266

[5] Friebe, H. et al.: FLC Determination and Forming Analysis by Optical Measurement Systems. FLC-Zurich 06, March 15th-16th 2006, ETH Zurich

[6] Yao, Y.: Kunststoff-Direktverschraubungen: *Einsatz von Experiment und Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlaufs*, Diss. TU Kaiserslautern, demnächst

[7] Kaliske, G. et al.: Grundsätzliches zur Problematik der Maßänderungen bei glasfaserverstärkten Thermoplasten. Plaste und Kautschuk 25 (1978), S. 647ff

[8] Woebcken, W.: *Schwindung und Maßhaltigkeit von Plastformteilen*. Plaste und Kautschuk. 26 (1979) Nr. 5, S. 265-268

Anforderungen an eine Methode zur Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung

Daniel Roth, Hansgeorg Binz, Robert Watty

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

Inhalt: *Die Ressource Wissen entwickelt sich im dynamischen und komplexen Umfeld von Unternehmen immer mehr zu einem wichtigen Erfolgsfaktor. Damit einhergehend tragen der Bereich der Produktentwicklung und das damit mittelbar verbundene Wissen maßgeblich zum Erfolg der Produkte eines Unternehmens bei. Gelingt es, das Produktentwicklungswissen (PEW) zu bewerten, kann dieses nachfolgend zielgerichtet entwickelt werden. Herkömmliche Bilanzierungssysteme stellen jedoch keine adäquaten Methoden bereit, um Wissen zu bewerten. Neuere Bewertungsansätze in angrenzenden Bereichen versuchen diesem Umstand gerecht zu werden. Basierend auf der Analyse dieser Ansätze werden Anforderungen und Voraussetzung erarbeitet, die ein System erfüllen muss, um speziell das Wissen im Bereich der Produktentwicklung mess- wie auch bewertbar und damit im Folgenden steuerbar zu gestalten.*

Abstract: *The resource knowledge becomes more and more important in terms of a factor of production. Within the domain of product development this means, that product development knowledge (PDK) gains importance for the outcome of the development process, too. Creating a method for the evaluation of this knowledge, offers the possibility for a purposeful development. Traditional financial accounting methods are unfortunately not appropriate for the evaluation of PDK in this context. Newer approaches try to cope with this situation. Based on this, issues and prerequisites for the evaluation of PDK are defined in this paper.*

Stichwörter: *Wissensbewertung, Produktentwicklungswissen, Intellektuelles Kapital, Wissensmanagement.*

Keywords: *knowledge evaluation, product development knowledge, intellectual capital, knowledge management.*

1 Einleitung

Wissen entwickelt sich im dynamischen und komplexen Umfeld vieler Unternehmen vermehrt zum bestimmenden Faktor im Wertschöpfungsprozess. Der Fokus in Unternehmen wird hierbei nicht mehr auf die physische Arbeit oder das Kapital gerichtet, sondern auf das unternehmensinterne Wissen sowie dessen Vernetzung, Nutzung und Weiterentwicklung. Nach North 0 ist das Wissen eines Unternehmens von besonderer Bedeutung, wenn es messbar ist, denn nur so kann dieses anschließend bewertet werden. Hieraus lassen

sich entsprechende Maßnahmen zur Steuerung und Regelung der Ressource Wissen ableiten. In heutigen Unternehmen existieren jedoch vorwiegend Methoden der Kosten- und Leistungsrechnung bzw. des Controllings zur Sicherstellung der „Wirtschaftlichkeit“. Die Darstellung der finanz-/unternehmensrelevanten Aspekte erfolgt dabei vorzugsweise in Form von Kennziffern. Methoden zum „Messen“ von Wissen fehlen weitgehend.

Insbesondere die Produktentwicklung ist ein sehr wissensintensiver Bereich. Gemäß der These, dass der eigentliche Erfolg eines Produkts maßgeblich von der Güte und/oder der Qualität des Produktentwicklungswissens abhängt, lässt sich die Notwendigkeit eines zuverlässigen Bewertungsverfahrens für das Wissen in der Produktentwicklung ableiten. Ein solches Verfahren wird gegenwärtig am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design entwickelt. Die Erarbeitung von Anforderungen an eine Methode zur Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung stellt einen ersten wichtigen Arbeitsschritt dar.

2 Bewertungssysteme im Wandel der Zeit

Rückblickend auf die letzten Jahrzehnte, lässt sich gemäß Bodrow, Bergmann 0 ein deutlicher Wandel feststellen. Ausgehend vom klassischen Kennzahlensystem, dem Du-Pont-Kennzahlensystem zur Zeit der Industrialisierung, über das Human Ressource Management, den Shareholder Value und EVA (Economic Value Added) stehen heutige Bewertungssysteme vor der Aufgabe, auch Wissen zu bewerten. Nicht mehr die Erfassung der „harten“ Fakten der Finanzbuchhaltung, sondern vielmehr wissensbasierte Prozesse und immaterielle Investitionen sowie Ergebnisse wissensbasierter Produktionsprozesse sollen erfasst, bewertet und kommuniziert werden 0. Die so genannte Wissensbilanzierung („Intellectual Capital Report“) – als neue Form der Berichterstattung – dient damit als Instrument zur gezielten Darstellung und Entwicklung des intellektuellen Kapitals einer Organisation 0. Nach Bullinger, Wörner et. al gehört die Messung und Bewertung von Wissen zu den größten Schwierigkeiten, die das Wissensmanagement heute zu bewältigen hat. „Ein entscheidender Durchbruch konnte in diesem Bereich bisher noch nicht erzielt werden“ 0. North konstatiert, dass die Wissensbilanzierung ein recht junges „Steuerungs- und Messinstrument“ ist und sich viele Vorgehensweisen zu diesem Thema noch im Entwicklungsstadium befindet. „Ein alleingültiges Modell gibt es bislang noch nicht, jeder Ansatz weist sowohl Stärken als auch Schwächen auf“ 0.

Betrachtet man die Vielzahl der am Markt verfügbaren Modelle, so kann z. B. eine Unterteilung in deduktiv-summarische und induktiv-analytische Ansätze vorgenommen werden.

Steht die Bewertung von Wissen im Fokus, so kommen u. a. nach North 0 besser induktiv-analytische Ansätze – Wissensbilanzen (Intellectual Capital Reports) im eigentlichen Sinne – zum Einsatz. Ziel solcher Wissensbilanzen ist die Bewertung einzelner Wissensbasen unter Entwicklung etwaiger Handlungsempfehlungen. Der wesentliche Unterschied zu den deduktiv-summarischen Verfahren besteht dabei in der Beschreibung und Bewertung einzelner immaterieller Vermögenswerte, die im Folgenden Ansatzpunkte zu deren Entwicklung liefern.

Eine allgemeine Übersicht über bestehende Verfahren liefern u. a. Mertins et al. 0 und Andriessen 0. Es sei an dieser Stelle auf den von Sveiby entwickelten Ansatz des „Intangible Assets Monitor", den „Skandia Navigator" der schwedischen Versicherungsgesellschaft Skandia sowie das „Mehrstufige Indikatorenmodell" von North et al. verwiesen. Auf nationaler wie auch internationaler Ebene sind besonders das Wissensbilanzmodell des Austrian Research Centers (ARCS), die Arbeiten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) in Form der „Wissensbilanz – Made in Germany" sowie der „Intellectual Capital Research Reports" (ICR) gemäß der Danish Guideline zu erwähnen. Länderübergreifend beschäftigt sich u. a. das „MERITUM"-Projekt mit den erfolgskritischen immateriellen Vermögenswerten und „MAGIC" mit der Bewertung von Wissen unter besonderer Berücksichtigung des Forschungs- und Entwicklungsbereichs.

Diese Wissensbewertungssysteme lassen sich entsprechend ihrer Verfahren in zwei wesentliche Ansätze untergliedern. Zum einen in monetäre Gesamtbewertungen der Unternehmen, zum anderen in Management- oder Steuerungsansätze. Zweitgenannten liegt in der Regel ein Strukturmodell des intellektuellen Kapitals zu Grunde, dass sich meist in Human-, Struktur- und Beziehungskapital untergliedern lässt. Anhand dieser Grundstruktur kann die Beschreibung der immateriellen Vermögenswerte mit Hilfe von Indikatoren erfolgen. Zur Bewertung heutiger Unternehmen weisen diese Methoden und Ansätze vielversprechendes Potenzial auf.

Liegt der Fokus des Unternehmens auf einer der elementaren Ressourcen der Produktentwicklung – dem Produktentwicklungswissen an sich –, erfordert dies darüber hinausgehende Schritte. Diese sollen dazu beitragen, einen ganzheitlichen Ansatz zu schaffen, der die Prozesse der Erfassung, Transformation, Aufbereitung und Bewertung – speziell im Rahmen der Produktentwicklung – integriert. Bisher bieten hier die angrenzenden Methoden der benachbarten Bereiche keine adäquate Vorgehensweise der Bewertung, die eine anschließende zielgerichtete Entwicklung der Ressource Wissen im Produktentstehungs-

prozess ermöglicht. Das Fehlen einer allgemeingültigen Methode zur Bewertung von Wissen in diesem Umfeld führt im Umkehrschluss zu der Überlegung, welche Herausforderungen zu bewältigen sind, um diese Lücke in der Methodenwelt zu schließen. Wesentliche Herausforderungen liegen sicherlich in der bisher unzureichenden Identifikation der Bereiche, in denen das relevante Wissen für den Produktentwicklungsprozess vorliegt, in der „Greifbarkeit“ von Wissen (explizit und implizit), der starken Abhängigkeit von Wissen von seinem Verarbeitungskontext und dem Verfall von Wissen im Laufe der Zeit. Darüber hinaus spielt die Akzeptanz eines solches Verfahrens durch die Nutzer eine entscheidende Rolle bei der Anwendung. Dazu trägt die Berücksichtigung einer psychologischen Komponente („Wissen ist Macht“ oder „Will ich im Sinne einer Kennziffer bewertbar sein?“), aber auch die Abgrenzung von Subjektivität zu Objektivität im Bewertungsprozess bei. In 0 werden weitere Rahmenbedingungen und Barrieren aufgeführt, die es zu berücksichtigen gilt. Aufbauend auf den Erkenntnissen werden im folgenden Abschnitt Anforderungen definiert, die eine Methode zur Bewertung von Wissen im Kontext der Produktentwicklung erfüllen muss.

3 Anforderungen an eine Methode zur Bewertung von Wissen im Kontext der Produktentwicklung

Eine Methode, die Wissen im Bereich der Produktentwicklung bewerten soll, muss stark mit dem Bereich der Produktentwicklung korrelieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Modell des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl, Beitz et al. 0 verwendet. Dieser wird allgemein in vier Phasen unterteilt, in denen jeweils spezifisches Wissen für die Produktentwicklung benötigt wie auch generiert wird. Um das hier benötigte Wissen zu bewerten, muss eine Methode die einzelnen Phasen berücksichtigen. Des Weiteren wird das Modell des Ingenieurwissens nach VDI 5610 0 verwendet, das in Anlehnung an das Modell des Produktentwicklungsprozesses die wesentlichen Wissensbereiche – so genannte Wissensobjekte – definiert. Basierend auf diesen beiden Grundmodellen ergeben sich, wie in Bild dargestellt, wesentliche Themenbereiche und nachfolgend genannte Anforderungen an eine Methode zur Bewertung von Produktentwicklungswissen.

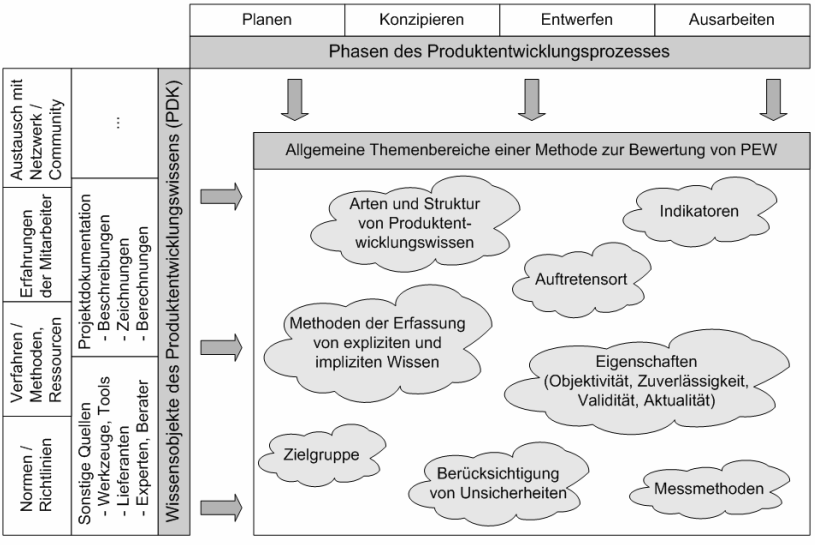


Bild 1: Allgemeine Themenbereiche einer Methode zur Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung im Kontext einer Phasen- und Wissensobjekte basierten Darstellung des Produktentwicklungsprozesses

Allgemeine Themenbereiche und zugehörige Anforderungen an eine Methode zur Bewertung von Produktentwicklungswissen (siehe Bild)

- **Arten und Struktur von Produktentwicklungswissen:** Thel 0 stellt Produktentwicklungswissen in einer übergeordneten Ontologie dar, die durch gegenseitige Verknüpfung von sechs untergeordneten Subontologien entsteht. Das Konzept bietet jedoch trotz des Detaillierungsgrades und der vorherrschenden Strukturierung aktuell keine Schnittstelle zur Bewertung von Wissen. Eine erfolgreiche Wissensbewertung setzt aus Sicht der Autoren weitere Schritte voraus. Diese beinhalten unter anderem die umfassende Betrachtung von Aspekten, unter denen sich Wissen in der Produktentwicklung strukturieren lässt. Dabei sollen allgemein existierende Arten der Einteilung, wie z. B. nach Probst, Raub et al. 0 und Reinisch 0, berücksichtigt werden.
- **Indikatoren:** Indikatoren (absolute oder relative Kennzahl zur Beschreibung eines Sachverhalts) können sowohl spezifisch wie auch unspezifisch für eine bestimmte Branche sein und müssen gleichermaßen berücksichtigt werden. Anzustreben wäre eine Methode, die lediglich einen einheitlichen Satz von Indikatoren verwendet. Erschwerend muss allerdings beachtet werden, dass z. B. für Produkte in der Automobil-

industrie eventuell andere Wissensinhalte (Fachwissen usw.) in der Produktentwicklung benötigt werden – bei gleicher bis ähnlicher Wissensstruktur - wie für Produkte in der Textilindustrie. Das Bestimmen eines solchen Indikatorensets für die Bewertung von PEW müsste einen Kompromiss zwischen dem angestrebten einheitlichen, standardisierten und dem eines individuell angepassten Sets an Indikatoren darstellen. Geeignete Algorithmen sollten den Auswahlprozess der relevanten Indikatoren für den jeweiligen Anwendungsfall in der jeweiligen Branche unterstützen.

- **Methoden der Erfassung von expliziten und impliziten Wissen:** Vereinheitlicht soll in diesem Beitrag von expliziten und impliziten Wissensinhalten im Produktentwicklungsprozess gesprochen werden – trotz des Diskurses bzgl. der Begrifflichkeiten „impliziten Wissens“ und „Informationen“ (vgl. 0). Ziel einer Methode zur Bewertung von Wissen muss damit die gleichermaßen zuverlässige Erfassung expliziter Wissensinhalte (Dokumente, Zeichnungen, Richtlinien usw.) wie auch impliziter Wissensinhalte (Erfahrungen, Zusammenhänge) sein. An dieser Stelle sei – ebenso wie für den Punkt „Berücksichtigung von Unsicherheit“ – darauf hingewiesen, dass Faktoren wie die Bereitschaft zur Wissensweitergabe (abhängig von psychologischen Aspekten) den Prozess der Akquisition und damit die Vollständigkeit der Datenbasis stark beeinflussen können und dies im Prozess der Erfassung berücksichtigt werden muss.
- **Auftretensort:** Im Rahmen der Bewertung stellt sich zudem die Frage, wo das Wissen im Unternehmen verteilt ist – z. B. bei verschiedenen Personen (mit verschiedenen Funktionen) oder in verschiedenen Abteilungen. Die Bewertung des Produktentwicklungswissens wird zudem noch komplexer, wenn ein spezifischer Wissensinhalt innerhalb des Produktentwicklungswissens seine Bedeutung bzw. seinen Wert für die Produktentwicklung verändert, wenn dieser in einem neuen Kontext steht. Wissen ist damit u. a. nach North 0 kontextabhängig, d. h. der Wert des Wissens korreliert mit dem Ort des Auftretens. Entsprechend dieser Kontextabhängigkeit muss eine zuverlässige Methode Vorgehensweisen aufweisen, die erstens Abhängigkeiten einzelner Wissensinhalte von ihren Auftretensorten erfassen und zweitens diese Abhängigkeiten im Rahmen der Bewertung berücksichtigen.
- **Eigenschaften:** Eine Methode zur Bewertung von PEW sollte folgende Eigenschaften besitzen: *Objektivität* – versichert, dass die Bewertung unabhängig von den ausführenden Instanzen ist. *Zuverlässigkeit* – fordert, dass die Bewertung fehlerfrei erfolgt und zu wiederholbaren Ergebnissen führt. *Validität* – bedeutet, dass die ausgewählten

Indikatoren auch die Ergebnisse hervorrufen, die sie hervorrufen sollen. In der Realität werden diese drei Aspekte oft nicht hinreichend berücksichtigt. Vielmehr können z. B. unter anderem subjektive Einflüsse jedes Ergebnis verfälschen und zu falschen Schlüssen führen. In Anlehnung an 0 hängt jede Bewertung zwangsläufig von der subjektiven Sichtweise und den eigenen Interessen ab. Der Ausschluss persönlicher Interessen im Prozess der Bewertung des Produktentwicklungswissens und damit ein Höchstmaß an Objektivität sind trotz allem anzustreben. *Aktualität* – als vierte Charaktereigenschaft verlangt, dass die Bewertungsmethode die Wissensinhalte berücksichtigt, die den gegenwärtigen PEW-Wert darstellen. Wissen ist dabei einem ständigen Wandel unterworfen, z. B. in der Anwendbarkeit, der Relevanz oder auch der Zeit.

- **Zielgruppe:** Die Ergebnisse müssen so aufbereitet werden, dass sie die für die verschiedenen Zielgruppen (Produktmanager, Personalwesen, Management etc.) relevanten Informationen bereithalten. Die Interpretation der Informationen ist mit geeigneten Darstellungen zu unterstützen.
- **Berücksichtigung von Unsicherheiten:** Methoden der Wissensbewertung basieren großteils auf nicht greifbaren Wissensinhalten. Dies legt nahe, dass die vollständige Erfassung des vorhandenen Wissens in der Produktentwicklung für die Bewertung nicht nachgewiesen werden kann 0. Eine falsche Datengrundlage kann jedoch zu falschen Schlüssen führen. Um dieses Risiko zu minimieren, sind Methoden, die solche Unschärfen abbilden und berücksichtigen können, in den Prozess der Wissensbewertung zu integrieren.
- **Messmethoden:** Geeignete Methoden zur Messung tragen erheblich zur Effektivität und Akzeptanz von Bewertungsmethoden bei. In Anlehnung an 0 können bezüglich des Bewertungsobjekts vier Arten der Messung („financial valuation“, „value measurement“, „measurement“ und „value assessment“) unterschieden werden. Eine „finanzielle“ Bewertung scheidet dabei von Anfang an aus. Nach Andriessen 0 eignen sich vielmehr nur Methoden, die den Wert des Wissens mit erkennbaren Kriterien messen oder bei fehlenden Kriterien den Wert des Wissens „abschätzen“. Die Bewertungsart, für den Fall der Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung, ist geeignet festzulegen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Bisher konnte kein Verfahren identifiziert werden, mit dem Produktentwicklungswissen hinreichend bewertet werden kann. Dieses Wissen trägt jedoch maßgeblich zum Erfolg des Produkts im Unternehmen bei. Im Rahmen dieses Beitrags werden deshalb Anforderungen definiert, die die Entwicklung eines einheitlichen und zuverlässigen Bewertungsverfahrens für Wissen in der Produktentwicklung ermöglichen sollen, um somit die zielgerichtete Entwicklung der Ressource Wissen zu unterstützen. Der wissensbasierte Entwicklungsprozess wird damit gleichermaßen unterstützt, wie auch effizienter gestaltet.

Literatur

[1] North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung – Wertschöpfung durch Wissen.* Wiesbaden: Gabler, 2005.

[2] Bodrow, W.; Bergmann, P.: *Wissensbewertung in Unternehmen – Bilanzieren von intellektuellem Kapital.* Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2003.

[3] Bornemann, M.; Leitner, K.-H. (2002): *Entwicklung und Realisation einer Wissensbilanz für eine Forschungsorganisation. In: Pawlowski, P.; Reinhardt, R.: Wissensmanagement für die Praxis –Methoden und Instrumente zur erfolgreichen Umsetzung.* Neuwied/Kriftl: Luchterhand, 2002.

[4] Bullinger, H. J.; Wörner, K. et al. (1998) : *Wissensmanagement – Modelle und Strategien für die Praxis. In: Bürgel, H. D.: Wissensmanagement.* Berlin: Springer, 2002.

[5] Mertins, K. et al.: *Wissensbilanzen – Intellektuelles Kapital erfolgreich nutzen und entwickeln*. Berl in/Heidelberg: Springer, 2005.

[6] Andriessen, D.: *Making Sense of Intellectual Capital – Designing a Method for the Valuation of Intangibles.* Oxford: Elsevier, 2004.

[7] VDI 5610 Blatt1: *Wissensmanagement im Ingenieurwesen – Grundlagen, Konzepte, Vorgehen.* Berlin: Beuth Verlag, 2009.

[8] Pahl, G.; Beitz, W. et al.: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung.* 7. Auflage Berlin: Springer, 2007.

[9] Thel, M.: *Wissenstrukturierung und –repräsentation im Produktentwicklungsprozess.* Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2007.

[10] Probst, G.; Raub, S. et al.: *Wissen managen – Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen.* Wiesbaden: Gabler, 2006.

[11] Reinisch, F.: *Die Köpfe sind das Kapital – Wissen bilanzieren und erfolgreich nutzen.* Heidelberg: Redline Wirtschaftsverlag, 2007.

[12] Hildreth P. M.; Kimble, C.: The duality of knowledge. http://informationr.net/ir/8-1/paper142.html. Information Research, Vol. 8, No. 1, October 2002.

[13] Roehl, H.: *Organisationen des Wissens – Anleitung zur Gestaltung.* Stuttgart: Klett-Cotta, 2002.

Potentiale einer eigenschaftsbasierten Produktbeschreibung

Christoph Westphal[1], Hartmut Krehmer[1], Kristin Paetzold[2], Sandro Wartzack[1] und Harald Meerkamm[1]

(1) Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen Nürnberg
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen
(2) Institut für Technische Produktentwicklung, Universität der Bundeswehr München
Werner-von-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
Email: westphal@mfk.uni-erlangen.de; krehmer@mfk.uni-erlangen.de;
Internet: www.mfk.uni-erlangen.de

Inhalt: *Moderne Produkte und somit auch deren Entwicklungsprozess werden zunehmend komplexer. Um dennoch im Spannungsfeld aus Qualität, Kosten und Zeit bestehen zu können, ist es daher unerlässlich, die Produktentwicklung anhand des Produktreifegrades sowie des Prozessfortschrittes zu überwachen und zu optimieren. Um dies während des Entwicklungsprozesses durchführen zu können, ist ein erweitertes Verständnis nötig, welches es erlaubt, das Gesamtprodukt mit all seinen Eigenschaften und seinem Verhalten ganzheitlich abzubilden. Darauf aufbauend können die notwendigen Absicherungsmethoden in den Entwicklungsprozess integriert werden sowie ein erweitertes Produktreifegradverständnis und eine effektive Iterationsverfolgung und -optimierung erarbeitet und umgesetzt werden.*

Abstract: *Modern products as well as their development process become more and more complex. But on the opposite the area of conflict existing of costs and quality and time forces the developer to display, to measure and to optimize the product degree of maturity as well as the product advance. To do this during development an enhanced understanding of the product is necessary which can represent the whole product with all its properties and its behavior. Thereupon the necessary validation methods can be integrated in the development process and an advanced understanding of the degree of maturity and an efficient tracing and optimization of iterations can be developed and realized.*

Stichwörter: *CAD-CAE-Integration, Iterationen, Produktmodell, Produktreifegrad*

Keywords: *CAD-CAE-Integration, Degree of maturity, Iterations, Productmodel*

1 Einleitung, Motivation und Zielsetzung

Moderne Produkte müssen einerseits effektiv entwickelt werden, andererseits technisch und qualitativ höchsten Ansprüchen genügen. Dem gegenüber steht eine immer weiter wachsende Variantenvielfalt, wie sie etwa im Bereich der Fahrdynamikregelsysteme deut-

lich wird [1]. Diese stetig wachsende Komplexität steht im starken Gegensatz zum Spannungsfeld aus Kosten, Qualität und Zeit. Um dennoch Kostenziele erreichen zu können, wurden besonders in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) arbeitstechnische, organisatorische, methodische und technologische Fortschritte erreicht [2]. Trotz der methodischen Weiterentwicklungen der vergangenen Jahre kann eine solche Variantenvielfalt nur durch weitgreifende Rechnerunterstützung erreicht werden [3]. So ist die vollständige Erprobung aller Varianten mittels Hardwareversuchen nicht mehr durchführbar und letztlich nur durch simulationsbasierte Verfahren möglich. Diese müssen nicht nur die zeitnahe Absicherung der Produkteigenschaften und -funktionalitäten garantieren, sondern auch den Produktreifegrad aufzeigen und damit den Entwicklungsfortschritt absichern. Im Rahmen des Beitrages wird ein Konzept zur eigenschaftsbasierte Produktbeschreibung vorgestellt und daraus resultierende Potenziale für die technische Produktentwicklung aufgezeigt.

2 Begriffsklärung

Im folgenden Kapitel werden grundlegende, in dieser Arbeit verwendete Begrifflichkeiten definiert und erläutert.

2.1 Produktmodell

Die virtuelle Produkt-Beschreibung basiert auf einem Produktmodell, welches aus unterschiedlichen Partialmodellen besteht. Diese dienen der Abbildung von Produktinformationen spezifischer Produktlebenszyklus-Phasen und ermöglichen neben der Informations-Verwaltung auch deren Austausch und Transformation [4]. Die Implementierung des wohl weitest reichenden und generischsten Ansatzes, die ISO 10303 „Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)“ [5] erfolgt durch Anwendungsprotokolle, die spezifische Anwendersichten abbilden (vgl. AP214) und dazu führen, dass bisher nur Teilaspekte des Produktes abgebildet wurden [6].

2.2 Funktion, Verhalten, Merkmale und Eigenschaften

In diesem Beitrag wird das Produktverhalten als der relevante Maßstab verstanden. Eine Beschreibung des Produktreifegrades auf Basis des Verhaltens wurde in [7] vorgestellt. Im Folgenden werden die Begriffe „Funktion“, „Merkmale“, „Eigenschaften“ und „Verhalten“ analog [7] definiert und von einander abgegrenzt. Die Funktion eines Produktes wird in diesem Beitrag als seine Aufgabe, Sinn und Zweck verstanden [8]. Sie beantwortet die

Fragen danach, wofür das System geschaffen wurde, welche Wirkung durch das System erreicht wird [8] und stellt so den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems dar. Unter Merkmalen werden nach [9] diejenigen Stellschrauben verstanden, mit denen das Produkt festgelegt und direkt beeinflusst werden kann. Sie definieren das Produkt in Form von Angaben über Struktur, Material und Gestalt und lassen sich in die Gruppen „physio-chemical form“ (Werkstoff) und „geometrical form“ (Geometrie & Struktur) einteilen [7][9]. Die Eigenschaften eines Produktes werden ebenfalls nach [9] verstanden und können nicht direkt vom Entwickler festgelegt werden, sondern ergeben sich aus den Merkmalen. Wie in [10] werden zwei Eigenschafts- Klassen unterschieden: „intensive properties“ und „extensive properties“. „Intensive properties“ sind spezifische Eigenschaften wie etwa Dichte und werden durch die „physio-chemical form“, also mit der Werkstoffwahl festgelegt. Aus diesen „intensive properties“ ergeben sich erst zusammen mit Festlegung der „geometrical form“ (Geometrie, Gestalt) die „extensive properties“, also die eigentlichen Eigenschaften [7]. Als Verhalten eines technischen Systems wird hier dessen Interaktion mit seiner Umwelt verstanden, also wie es etwas machen muss, um seinen Zweck (= Funktion) zu erfüllen. Das Verhalten ist so letztlich die Spezifizierung der Funktion, da aus dem Verhalten nicht nur hervorgeht, was die Aufgabe ist, sondern auch, wie diese erfüllt wird (Bild 1).

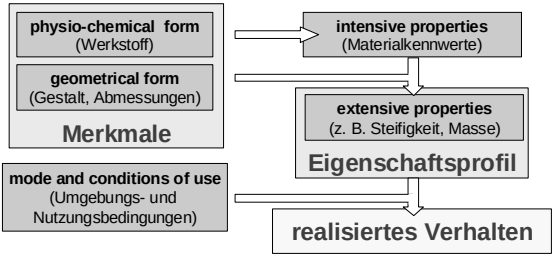


Bild 1: Zusammenhang zwischen Merkmalen, Eigenschaften und Verhalten

2.3 Prozessfortschritt und Produktreifegrad

Oft wird mit einem bestimmten Prozessfortschritt implizit ein bestimmter Produktreifegrad gleichgesetzt. Da sich der Produktreifegrad aber an anderen Kriterien als der Prozessfortschritt orientiert, ist die klare Trennung der Begriffe „Prozessfortschritt“ und „Produktreifegrad“ notwendig [7]. Zur umfassenden Beurteilung eines Entwicklungsprojektes bedarf es jedoch der ganzheitlichen Betrachtung des Prozessfortschritts und des Produktreifegrades. Beide werden anhand von Indikatoren bewertet, die es ermöglichen müssen, Trend-

verläufe zu ermitteln, Risiken frühzeitig zu erkennen und den aktuellen Stand der Entwicklung transparent aufzuzeigen [7].

2.4 Prozessfortschritt

Die Prozessfortschritt-Erfassung ermöglicht objektive Statusaussagen zum Entwicklungsprojekt sowie die Überwachung von Zeit und Kosten [2] und ermöglicht, bei unbefriedigendem Verlauf Warnmeldungen abzugeben und negative Trends frühzeitig zu stoppen. Typische für die Erfassung des Prozessfortschrittes herangezogene Messgrößen sind z.B. Meilensteine, Quality-Gates, Abstimmungspunkte, abgearbeitete Arbeitspakete sowie freigegebene Dokumente oder Bauteile [7].

2.5 Produktreifegrad

Aus der Erfassung des Prozessfortschritts anhand einer Termin- und Kostenüberwachung kann keinerlei Aussage zum Produkt selbst abgeleitet werden. Unter dem Produktreifegrad wird die „Einschätzung der verwendungsbezogenen Güte eines Produktes“ mit dem Ziel der objektiven „Bewertung der Güte eines Entwicklungsstandes“ verstanden [2]. Da - wie bereits oben aufgezeigt - das Verhalten bzw. die Eigenschaften des Produktes den für die Entwickler relevanten Maßstab darstellt, müssen auch der Erfassung des Produktreifegrades diese Eigenschaften zu Grunde liegen. Damit eine solche Überwachung des Produktreifegrades eines sich in der Entwicklung befindlichen Produktes möglich wird, ist daher eine multidisziplinär nachvollziehbare Repräsentation eben dieses Produktes auf Basis seiner Eigenschaften unbedingt notwendig. Um daraus einen Produktreifegrad ableiten zu können, sind zusätzlich zu den realisierten Eigenschaften des Produktes auch die geforderten Eigenschaften in diese Repräsentation zu integrieren.

3 Bausteine für ein Produktmodell zur multidisziplinären Beschreibung des Produktverhaltens und seiner Eigenschaften

Um die Thematik der CAD-CAE Integration sowie die Betrachtung des Produktreifegrades daten- und informationstechnisch zu unterstützen, ist ein Produktmodell notwendig, welches das Produktverhalten sowie die Eigenschaften und Merkmale des Produktes interdisziplinär nachvollziehbar beschreiben kann. Das Produktmodell besteht daher aus drei Partialmodellen, die im Folgenden genauer spezifisiert werden.

3.1 Anforderungs-Partialmodell

Die Absicherung von Produkteigenschaften und Funktionalitäten kann nur effizient durchgeführt und überwacht werden, wenn auch die Anforderungen an das Produkt klar definiert sind und entsprechend verwaltet werden. Dabei muss ein Anforderungsmanagement sowohl die eigentlichen Kundenwünsche wie Eigenschaften, Fähigkeiten und Leistungen des Produktes, als auch die Einflüsse des Design for X auf den PEP darstellen können. Zusätzlich dient es zur Unterstützung des Lastenheft-Erstellungsprozesses, bei dem abstrakte Kundenwünsche in Produkteigenschaften und -funktionalitäten übersetzt und interpretiert werden. Durch die Positionierung des Produktes am Markt und die Berücksichtigung der Anforderungen, welche aus dem Produktlebenszyklus resultieren, können aus den Eigenschaften anschließend konkrete Zielwerte ermittelt und festgelegt sowie zugehörige Validierungsmethoden zugeordnet werden, welche im Lastenheft festgeschrieben werden.

3.2 Konstruktions-Partialmodell

Die anforderungsgerechte Realisierung bzw. Umsetzung des Lastenheftes ist die Kernaufgabe des Entwicklers. Die von ihm bzw. von Zulieferern oder Systemlieferanten erstellten Konstruktionsdaten wie z.B. CAD-Dokumente können durch klassische PDM-Systeme verwaltet werden. Zusätzlich werden Produktkonfigurationen und -varianten verwaltet. Dadurch können komplette geometrische Modelle eines Produktes aufgebaut bzw., untersucht (vgl. Digital-Mock-Up) und Stücklisten der einzelnen Produktvarianten ausgeleitet werden. Weiterführend müssen allerdings auch Produkteigenschaften in das Produktmodell integriert werden, die im weiteren Verlauf der Entwicklung von Interesse sind. Dazu gehören neben der Verbindungstechnik auch Eigenschaftsdaten, wie etwa die Angabe einer Getriebeübersetzung oder die Masse eines Bauteils, einer Baugruppe oder des gesamten Produktes.

3.3 Simulations-Partialmodell

Um geforderte Eigenschaften und Funktionalitäten simulationsbasiert absichern zu können, ist eine ganzheitliche Verwaltung von Simulationsdaten notwendig. Dabei müssen aus der Konstruktion stammende Datensätze umstrukturiert, überarbeitet und durch zusätzliche Parameter erweitert werden (z.B.: Steifigkeiten bei Mehrkörper-Simulationen, etc.). Weiterhin müssen die Berechnungseinstellungen sowie die verschiedenen Lastfälle und Manöver im Simulationspartialmodell bzw. Simulationsproduktdatenmanagement ab-

gebildet werden. Schließlich müssen auch Analysedefinitionen und deren Ergebnisse strukturiert verwaltet und archiviert werden.

4 Potentiale der aufgezeigten Produktbeschreibung

Durch das in Bild 2 aufgezeigte Zusammenwirken der erläuterten Partialmodelle ergeben sich interessante Möglichkeiten, die Entwicklung technischer Produkte zu unterstützen: Einerseits die Integration zwischen CAD und CAE, andererseits die entwicklungsbegleitende Erfassung des Produktreifegrades.

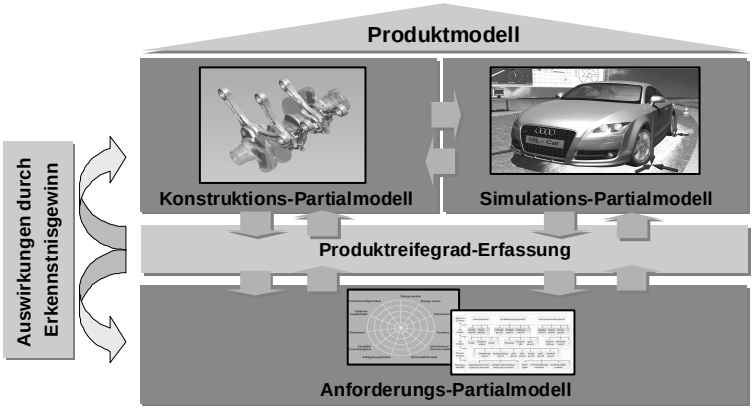


Bild 2: Zusammenwirken der Partialmodelle

4.1 CAD-CAE Integration

Darauf basierend kann im Folgenden die Integration zwischen Konstruktions- und Berechnungsfraktionen beschrieben werden: Um die Berechnung im PreProcessing mit Daten zu versorgen ist zuallererst ein Datenaufbereitungsschritt notwendig, in welchem die Konstruktionsdaten transformiert, zusammengefasst und erweitert werden. Dabei muss mittels konsequenten Anforderungsmanagements festgelegt werden, welche Eigenschaften welcher Bauteile zu welchem Zeitpunkt im PEP in welcher Produktkonfiguration und in welcher Datengüte der Berechnung zur Verfügung gestellt werden sollen. Erst wenn diese Parameter bekannt sind, kann ein Referenzprozess installiert werden, bei dem konstruktionsseitig Daten aus einem Konstruktions-Partialmodell gespiegelt, in einem Simulations-Partialmodell bereitgestellt und von dort aus weiterverarbeitet werden. Ist eine Simulationsmethode - wie in Kapitel 3.1 beschrieben - einer oder mehreren Produkteigenschaften bzw. -funktionalitäten als gültige Validierungsmethode zugeordnet, so ist es im Umkehr-

schluss möglich, Berechnungsergebnisse an das Anforderungsmanagement zurückzuführen und somit den Grad der Erfüllung der Anforderungen zu bewerten.

4.2 Produktreifegraderfassung und Vermeidung unnötiger Iterationen auf Basis des aufgezeigten Produktmodells

Durch die konsequente Verknüpfung der drei oben vorgestellten Bestandteile des Produktmodells „Anforderungs-Partialmodell", „Konstruktions-Partialmodell" und „Simulations-Partialmodell" ergeben sich über die Integration von CAD und CAE hinaus noch weitere Vorteile, die einer zielgerichteten Entwicklung zu Gute kommen:

Durch den Abgleich der im Anforderungs-Partialmodell hinterlegten Soll-Eigenschaften mit dem im Simulations-Partialmodell abgelegten Ist-Eigenschaften wird eine Erfassung und Bewertung des Produktreifegrades des momentanen Konstruktionsstandes möglich. Wird im Anforderungs-Partialmodell auch die Historie der Anforderungsänderungen abgelegt, wird eine Aussage über den Verlauf des Produktentwicklungsprozesses möglich, was wiederum in eine ganzheitliche Absicherung einbezogen werden muss. Dadurch, dass mit diesem Produktmodell der Produktreifegrad entwicklungsbegleitend erfasst werden kann, wird es möglich, die Folgen jeder Konstruktionsstands-Änderung auf den Produktreifegrad abzuschätzen und nur solche Änderungen durchzuführen, welche in Summe positiven Einfluss auf den gesamten Produktreifegrad haben. Somit hilft dieses Produktmodell nicht nur, CAD und CAE zu verknüpfen, sondern hilft darüber hinaus auch bei der Erfassung des Produktreifegrades sowie der Vermeidung unnötiger Iterationen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz vorgestellt, wie auf Basis virtueller Validierungsmethoden und deren sinnvollen Verknüpfung die Entwicklung durch Überwachung des Produktreifegrades gelenkt werden kann und unnötige Iterationsschleifen verhindert werden können. Dazu ist ein erweitertes Produktverständnis nötig, das Produkteigenschaften bzw. Funktionalitäten sowie das resultierende Produktverhalten in den Fokus der Produktbeschreibung stellt. Hierfür wurde ein Produktmodell aus den Bausteinen Anforderungsmangement, Konstruktionsdatenmanagement und Simulationsdatenmangement vorgestellt, welches durch einen übergeordneten Referenzprozess ganzheitlich verknüpft wird. Kern des Produktmodells ist das Anforderungs-Partialmodell, auf das sich die beiden an-

deren Partialmodelle beziehen und welches die Produkteigenschaften und -funktionalitäten verwaltet.

Im Rahmen weiterer Forschungsarbeit müssen diese Partialmodelle weiter untersucht und detailliert werden, um schließlich den kompletten Prozess vom Kundenwunsch bis zum konsolidierten Produkt abbilden zu können. Darauf aufbauend steht die Weiterentwicklung des Referenzprozesses im Fokus, um zielgerichtet sämtliche Informationen zwischen den Partialmodellen zu kommunizieren.

Literatur

[1] Bewersdorff, S., Pfau, J., Roeder, S.: *Simulation und Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich*, Automotive Engineering Partners, 2007.

[2] Müller, M.: *Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen*, Saarbrücken, Universität des Saarlandes, 2007.

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

[4] Anderl, R., Trippner, D.: STEP Standard for the exchange of product model data Eine Einführung in die Entwicklung, Normung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP), Stuttgart, 2000.

[5] Norm DIN EN ISO 10303 AP 214 Standard for the exchange of product model data.

[6] Wartzack, S.: Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriterliellen Analyse alternativer Produktkonzepte, Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.

[7] Krehmer, H.; Paetzold, K: Eine Betrachtung zur ganzheitlichen Abschätzung des Produktreifegrades auf Basis des Verhaltens, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, In: Meerkamm, H. (Hg.): Design for X. 19. Symposium Neukirchen 2008,

[8] Hubka, V.: Theorie technischer Systeme – Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1984

[9] Weber, C.: CPM/PDD - An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In: Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on advances in methods and systems for development of product and processes. TU Berlin IPK, Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2005.

[10] Chakrabarti, A.: Engineering Design Synthesis – Understanding, approaches and tools. London: Springer Verlag, 2002.

Anforderungen an eine Wissensrepräsentationsform zur Darstellung von Konstruktionswissen in neuartigen wissensbasierten Systemen

Martin Kratzer, Hansgeorg Binz, Robert Watty

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

Inhalt: *Aufgrund zunehmender Interdisziplinarität müssen Konstrukteure bei ihren Tätigkeiten über immer mehr Konstruktionswissen verfügen. Eine Hilfestellung bieten ihnen wissensbasierte Systeme. Neuartige wissensbasierte Systeme, wie z. B. Softwareagentensysteme, gehen noch einen Schritt weiter, überzeugen mit einer dezentralistischen Sichtweise auf die Konstruktion und bieten eine verteilte Lösungssuche. Um jedoch Softwareagentensysteme in Verbindung mit CAD-Systemen in der Konstruktion einzusetzen, bedarf es einer zielgerichteten Abbildung des Wissens, auch Wissensrepräsentation genannt. Für herkömmliche wissensbasierte Systeme liegen hierfür mehrere Möglichkeiten vor. In diesem Beitrag werden die Anforderungen an eine Wissensrepräsentationsform zur Abbildung von interdisziplinärem Konstruktionswissen in Softwareagentensystemen beschrieben.*

Abstract: *Due to increasing multidisciplinarity, design engineers have to dispose of more design knowledge. Assistance could be knowledge-based systems. Novel knowledge-based systems like software agent systems proceed from this point, convince with a peripheral perception on the design and support with distributed solutions. A problem when using software agent systems in connection with CAD-systems is the specific mapping of knowledge. This translation process is also called knowledge-representation. There are several possibilities to represent knowledge in conventional knowledge-based systems. In this paper requirements on the representation of multidisciplinarity design knowledge in software agent systems are discussed.*

Stichwörter: *Wissensbasierte Systeme, Wissensrepräsentation, Softwareagentensysteme, Konstruktionswissen*

Keywords: *Knowledge-based systems, knowledge representaion, software agent systems, design knowledge*

1 Einleitung

In der Produktentwicklung und Konstruktion nehmen Interdisziplinarität und Komplexität der Produkte stetig zu. Unerfahrene Konstrukteure müssen aus diesem Grund

intensive Literaturrecherchen betreiben, sich in neue Methodiken einarbeiten und neue Verfahren erlernen. Diese Tätigkeiten können zeitlich gesehen bis zu 70% des gesamten Konstruktionsprozesses einnehmen [1]. Die wertschöpfende, kreative Arbeit rückt somit in den Hintergrund, was wiederum eine sinkende Qualität der Produkte zur Folge hat. In Pahl/Beitz [1] werden diese Tätigkeiten als *indirekte Konstruktionstätigkeiten* bezeichnet, zu denen die Informationsbeschaffung und -aufbereitung, Besprechungen und die Koordinierung von Konstruktionsprozessen gezählt werden können. In Anlehnung an die Wissenslogistik muss dem Konstrukteur das richtige Wissen, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und mit der richtigen Qualität bereitgestellt werden [3].

Wissensbasierte Systeme nehmen sich genau dieser vorgestellten Problematik an und offerieren dem Konstrukteur Wissen, das dieser für seine konstruktive Tätigkeit benötigt. Nach Beierle [4] sind wissensbasierte Systeme Computersysteme, welche in einer gegebenen Wissensdomäne menschliche Expertise abbilden. Sie werden in Verbindung mit CAD-Systemen zur Unterstützung des Konstrukteurs im Konstruktionsprozess eingesetzt. Aus diesem Grund kann in diesem Fall von Unterstützungssystemen gesprochen werden.

In den letzten Jahren kamen in der Forschung neuartige wissensbasierte Systeme zur Anwendung. Ein Beispiel hierfür sind Softwareagentensysteme, die sich durch Autonomie und ein bestimmtes zielführendes Verhalten auszeichnen. Im Bereich der Konstruktionstechnik ist allerdings bisher nicht weit reichend erforscht, wie Wissen von menschlichen Experten und Wissensobjekten in Softwareagentensysteme überführt werden kann. Die Repräsentation von Wissen, d. h. die Abbildung von zunächst unformalisierten Objekten, wird im Sprachgebrauch der künstlichen Intelligenz als Wissensrepräsentation bezeichnet [3]. In diesem Beitrag werden zunächst die generellen Anforderungen an eine solche Wissensrepräsentationsform beschrieben.

2 Wissensmanagement im Konstruktionsprozess

Der Konstruktionsprozess ist nach Pahl/Beitz [2] ein informationsgetriebener Prozess, der aus den Teilbereichen Informationsgewinnung, Informationsumsetzung und Informationsausgabe besteht. Für die tägliche Konstruktionsarbeit müssen zunächst Informationen aus Anforderungslisten, Fachliteratur, Konstruktionskatalogen, Berechnungen, Normen etc. extrahiert werden. Diese werden im nächsten Schritt durch Analyse der Informationen, Synthese, Ausarbeiten von Konzepten und Entwürfen verarbeitet. Im letzten Schritt erfolgt schließlich die Informationsausgabe in Form von Skizzen, normgerechten Zeichnungen,

Stücklisten etc. Bei allen drei vorgestellten Schritten können wissensbasierte Systeme aufgrund der Integration von Wissen eine Unterstützung für den Konstrukteur darstellen [2]. Dem gegenüber bezeichnet Koller den Konstruktionsprozess als einen Wissenserzeugungs- und Wissensverarbeitungsprozess [5].

2.1 Einführung in wissensbasierte Systeme

Ein wissensbasiertes System ist ein System, das in einer eng begrenzten Wissensdomäne zu spezifischen Problemen Lösungen sucht [6]. Bereits entwickelte wissensbasierte Systeme können jedoch aufgrund ihrer Komplexität nur auf zuvor festgelegte Anwendungsszenarien angewendet werden. Eine Ausweitung auf weitere Problemstellungen ist damit schwierig zu realisieren. Der Aufbau eines wissensbasierten Systems ist in der gängigen Literatur einheitlich definiert. Der wichtigste Aspekt bei wissensbasierten Systemen ist die strikte Trennung von *Wissensbasis* und der *Wissensverarbeitung*, oft auch Schlussfolgerungsmechanismus oder Inferenzmechanismus genannt [4, 6, 7].

Neuartige wissensbasierte Systeme, wie z. B. Softwareagentensysteme, unterscheiden sich gegenüber herkömmlichen Systemen vor allem durch ihre dezentralistische und logische Aufteilung im System. Darüber hinaus eignen sie sich hervorragend zur verteilten Lösungssuche und für Anwendungen, die einen erhöhten Kommunikations- und Koordinationsaufwand erfordern [8]. In Wagner et. al. [8, S. 6] wird eine Definition verwendet, die auch dem Ziel des vorliegenden Beitrags dient: „In der agentenorientierten Softwareentwicklung ist das Konzept des Agenten eine abgrenzbare Softwareeinheit mit einem definierten Ziel. Ein Agent versucht, dieses Ziel durch autonomes Verhalten zu erreichen und interagiert dabei kontinuierlich mit seiner Umgebung und anderen Agenten“.

Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich Softwareagentensysteme zur wissensbasierten Problemlösung in der Konstruktionstechnik. Mit einem Softwareagentensystem wäre es z. B. möglich, einen Querpressverband auf Inkonsistenzen hin zu untersuchen und dem Konstrukteur Lösungsmöglichkeiten vorzuschlagen [9]. Um jedoch Softwareagentensysteme in der Konstruktionstechnik einzusetzen, muss zunächst geklärt werden, was Konstruktionswissen ist und wie es definiert werden kann [5]. Das nächste Unterkapitel beschäftigt sich mit dieser Fragestellung.

2.2 Der Wissensbegriff im Konstruktionsprozess

Im Konstruktionsprozess werden Wissen bzw. Informationen umgesetzt, erzeugt und verarbeitet. Nach Koller [5] kann Konstruktionswissen als Wissen definiert werden, welches

zur erfolgreichen Durchführung von Konstruktionsprozessen notwendig ist und welches bei diesem Prozess neu gewonnen werden kann.

Konstruktionswissen wird in diesem Beitrag zunächst in die beiden Wissensarten *deklaratives Konstruktionswissen* (Wissen über Fakten in der Konstruktionstechnik) und *prozedurales Konstruktionswissen* (Wissen über Vorgänge, Methoden und Abläufe in der Konstruktionstechnik) unterteilt [3, 6]. Wird ein regulärer Konstruktionsprozess betrachtet, so muss der Konstrukteur in Normen, Büchern, Tabellenbüchern, wissenschaftlichen Beiträgen etc. nach Informationen suchen, die ihn bei dessen Tätigkeit unterstützen.

Um Wissen mittels eines Repräsentationsformalismus in einem wissensbasierten System darzustellen, wird eine dynamische Wissensstruktur benötigt. Diese Wissenstruktur sollte das Wissen aus interdisziplinären Fachbereichen zuvor ordnen und klassifizieren. Anschließend erfolgt die eigentliche Repräsentation des Wissens. Die tatsächliche Möglichkeit bzw. die Wahl der Form zur Repräsentation von Konstruktionswissen ist nicht tiefgehend erforscht. Aus diesem Grund werden im Weiteren zunächst die Formen zur Repräsentation von Konstruktionswissen vorgestellt.

2.3 Relevante Wissensrepräsentationsformen im Konstruktionsprozess

Unter der *Wissensrepräsentation* wird eine symbolische, formelle und operationale Darstellung einer Wissensdomäne in einem informationsverarbeitenden System verstanden [7]. Die Repräsentation der Schlussfolgerungsmechanismen ist hierbei ebenso so wichtig wie die der Wissensbasis, um überhaupt aus dem abgebildeten Wissen Schlüsse zu ziehen [4, 7].

Da Experten häufig ihr Wissen in Regeln formulieren, sind *regelbasierte Ansätze* zur Repräsentation von Konstruktionswissen am meisten verbreitet. Sie werden auch als Produktionssysteme bezeichnet. Den eigentlichen Aufbau der Wissensbasis übernehmen übliche Wenn-Dann Beziehungen, diese bestehen aus einer Vorbedingung und einer Aktion. Die Inferenzmechanismen zur Schlussfolgerung aus der Wissensbasis sind die Vorwärts- und die Rückwärtsverkettung [3, 6, 7].

Eine weitere Möglichkeit zur Wissensrepräsentation ist der *objektorientierte Ansatz*. Er wird häufig auch *framebasierter Ansatz* genannt. Der objektorientierte Ansatz unterscheidet sich vom regelbasierten durch eine strukturierte Darstellung der Objekte einer Wissensdomäne. Formal besteht dieser Ansatz aus einer formularähnlichen Objektbeschrei-

bung, in der das Objekt über Attribute und dazu gehörige Werte beschrieben werden kann [6, 7].

Eine dritte Möglichkeit zur Wissensrepräsentation stellt der *constraintbasierte Ansatz* dar. Mit ihm ist es möglich, eine beschriebene Problemstellung durch Constraints - also Zwänge, Beschränkungen, Restriktionen - so einzuschränken, dass der Lösungsraum auf nur eine Lösung reduziert wird. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die konkrete Problemlösung nicht zuvor festgelegt werden muss [3, 7].

Die letzte hier vorgestellte Möglichkeit zur Repräsentation von Konstruktionswissen ist das *semantische Netz*, z. T. auch *Ontologie* genannt. Mit einem semantischen Netz kann über Knoten (Objekten) und Kanten (Relationen) ein kleiner Ausschnitt einer Wissensdomäne dargestellt werden [3].

3 Anforderungen an eine Wissensrepräsentationsform

Aufbauend auf den vorgestellten Möglichkeiten der Wissensrepräsentation von Konstruktionswissen werden in diesem Kapitel Anforderungen an Wissensrepräsentationsformalismen vorgestellt. Wichtig ist hierbei der bilaterale Ansatz, der die Seite der Wissenserhebung und die Seite der Repräsentation des Wissens in Softwareagentensystemen betrachtet. Es muss zum einen festgestellt werden, wie Experten und Konstrukteure ihr Wissen natürlich nutzen bzw. damit umgehen (Wissenserhebung) und zum anderen, in welcher Form das Wissen zur Integration in Softwareagentensysteme vorliegen muss (Wissensrepräsentation). Um Wissen von Experten und Konstrukteuren in das Softwareagentensystem zu überführen, müssen beide Seiten mit integriert werden.

Bild 1 zeigt eine Übersicht über den Weg des Wissens von den natürlichen Wissensorten bis hin zur Integration in das Softwareagentensystem. Natürliche Wissensorte sind in diesem Fall der Experte, in welchem zunächst das Wissen in einer unformalisierten, impliziten Art vorliegt und die Norm, in welcher zumindest teilweise vorformalisiertes, aber explizites Wissen vorliegt. Ein Ansatz, um das implizit vorhandene Wissen im Experten in explizites (siehe *Wissensspirale* nach Nonaka/Takeuchi [10]) zu überführen ist jedoch nicht Teil dieses wissenschaftlichen Beitrages. Beide Wissensarten aus unterschiedlichen Wissensorten werden schließlich über einen oder mehrere Repräsentationsformalismen in Wissen übersetzt, welches im Unterstützungssystem zur Interaktion mit CAD-System und Konstrukteur verwendet wird.

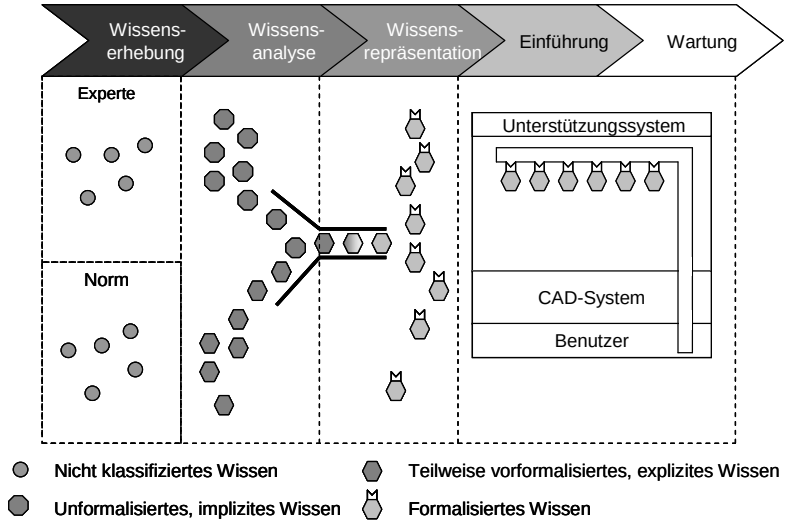


Bild 1: Bilateraler Ansatz zur Überführung von Konstruktionswissen

Im Folgenden werden die Anforderungen an einen Wissensrepräsentationsformalismus aufgezählt und kurz erklärt. Zudem werden die Anforderungen mit Forderung (F) und Wunsch (W) gekennzeichnet.

Anwendungsgebiet Konstruktionstechnik (F): Die Wissensrepräsentation muss Wissen aus der Konstruktion und Produktentwicklung in formalisiertes Wissen überführen.

Relative Allgemeingültigkeit (W): Der Formalismus sollte auf verschiedene Problemstellungen in der Konstruktionstechnik anwendbar sein.

Abbildung eines Grundwortschatzes (F): Eine Anforderung ist es, einen gebräuchlichen Wortschatz eines Konstrukteurs bzw. Produktentwicklers zu integrieren, um Chancen auf eine breite Nutzung des späteren Unterstützungssystems zu haben.

Integration in Softwareagentensysteme (F): Die Wissensstruktur und die nachgeschaltete Wissensrepräsentation müssen das Wissen in einer Form repräsentieren, so dass es von den Softwareagenten verwendet werden kann (siehe Bild 1).

Repräsentation der dynamischen Wissensstruktur (F): Im Gegensatz zur vorherigen Forderung, müssen zudem unterschiedliche, zunächst unformalisierte Wissensarten mit einer Wissensrepräsentationsform in formal lesbare Strukturen überführt werden.

Repräsentation von verschiedenen Wissensorten und -formen (F): Neben den Wissensarten muss zudem Wissen aus unterschiedlichen Wissensorten (Normen, Richtlinien, Bücher, etc.) und unterschiedlichen Wissensformen (Abbildungen, Tabellen, Formeln, Regeln, Begriffe, Graphen, etc.) abgebildet werden.

Modulare Abspeicherung des Wissens im Softwareagentensystem (F): Das Konstruktionswissen muss in einer Form abgespeichert werden, die es dem Wissensingenieur erlaubt, weiteres Wissen hinzuzufügen, Wissen zu löschen und Wissen anzupassen.

Modularität und Modifizierbarkeit der Formalismen (F): Der Wissensrepräsentationsformalismus muss an sich auf veränderte Randbedingungen anpassbar sein. Darüber hinaus müssen Teilaspekte der Formalismen austauschbar gehalten werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund von zunehmender Interdisziplinarität und Komplexität im Konstruktionsprozess muss der Konstrukteur übermäßig viel Zeit für Recherche, Informationsbeschaffung und letztendlich Wissensaneignung aufwenden. Eine Hilfestellung können wissensbasierte Systeme in Verbindung mit CAD-Systemen sein. Sie können bereits formalisiertes Wissen über Produkte und Technologien dem Konstrukteur zur richtigen Zeit, in der richtigen Qualität bereitstellen. Neuartige wissensbasierte Systeme, z. B. Softwareagentensysteme, heben sich durch ihre dezentralistische Sichtweise und deren verteilten Lösungssuche von klassischen wissensbasierten Systemen ab. Handlungsbedarf zeigt sich hierbei bei der fehlenden Integration von Konstruktionswissen. Für diese Integration werden Wissensrepräsentationsformalismen benötigt, die unformalisiertes bzw. teilweise vorformalisiertes Wissen in ein für Softwareagentensysteme lesbares Format überführen. In diesem Beitrag wurden dazu erstmals Anforderungen an eine Wissensrepräsentationsform definiert. Der nächste Schritt ist die Analyse der vorliegenden Wissensrepräsentationsformen, um Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede heraus zu arbeiten. Darauf hin folgen ein Vergleich und die letztendliche Auswahl. Ein weiteres Aufgabenfeld wird die intensive Betrachtung des Konstruktionswissens und dessen Strukturierungsmöglichkeiten sein (siehe [5]).

Literatur

[1] VDI-Gesellschaft: Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.

[2] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung. 7. Auflage Berlin: Springer, 2007.

[3] Rude, Stefan: *Wissensbasiertes Konstruieren.* Habilitationsschrift Technische Universität Karlsruhe: Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion, 1998.

[4] Beierle, Christoph; Kern-Isberger, Gabriele: *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen.* 1. Auflage Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2000.

[5] Koller, Rudolf: *Strukturierung von Konstruktionswissen*. In: Konstruktion, 42, 1990, S. 85-90.

[6] Lehmann, Clemens: *Wissensbasierte Unterstützung von Konstruktionsprozessen.* Dissertation Technische Universität Berlin: Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, 1989.

[7] Puppe, Frank: *Einführung in Expertensysteme*. 1. Auflage: Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1991.

[8] Wagner, Thomas; Göhner, Peter: *Softwareagenten: Einführung und Überblick über eine alternative Art der Softwareentwicklung.* In: atp Automatisierungstechnische Praxis, H. 4 Sonderdruck, 2003, S. 1-31.

[9] PROKON: *Proaktive Unterstützung von Konstruktionsprozessen durch Softwareagentensysteme*. Antrag zur Förderungen eines Projekts durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 2008.

[10] Nonaka, I.; Takeuchi, H.: The Knowledge-Creating Company: How Japanes companies create the dynamics of innovation. New York: Oxford University Press, 1995.

FSEC – Konstruktionen als Ergebnis aus Labor- und Freilanduntersuchungen

Jana Hadler, Klaus Brökel, Christian Semlow*

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik,
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, *Lehrstuhl für Meerestechnik
Albert-Einstein-Straße 2, D-18059 Rostock
Email: jana.hadler@uni-rostock.de; klaus.broekel@uni-rostock.de; christian.semlow@uni-rostock.de
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de/ktc; *http://www.fms.uni-rostock.de/lmt

Inhalt: *Die Ergebnisse der Untersuchungen im Kleingerinne und nachfolgend im Freiland belegen die Notwendigkeit der Annäherung an eine Grobgeometrie über experimentelle Analysen. Unterstützend sind vereinfachte numerische Berechnungen vorgenommen worden. Unter Beachtung der natürlichen und der an das Projekt gebundenen Restriktionen, wie die der Fließgeschwindigkeit der zu nutzenden Gewässer von 1 – 1,5 m/s, der Anzahl der Umdrehungen des Wasserrades von 10 – 15 min^{-1} und der Forderung nach Mobilität, sind die Experimente durchgeführt worden. Aus diesen ergaben sich ein optimales Spaltmaß zwischen Bodenplatte und Wasserradschaufel, die Position des Rades innerhalb des Kanals, die Schaufelgeometrie sowie die Gestaltung des Kanals im Ein- und Ausströmbereich.*

Abstract: *The results of the investigations in the small tank followed by the outdoor experiments allocate the necessity of the approximation to a basic geometry by experimental analyses. In addition, numerical calculations have been done. Considering the natural and the restrictions addicted to the project like the flow velocity from 1 to 1.5 m/s, the number of revolutions of the water wheel and the demand of mobility numerous tests were done. These tests showed an optimum gap between floor panel and water wheel blade. The positions of the wheel inside of the channel, the shape of the blade and the design of the channel in the inlet and outlet area have been determined.*

Stichwörter: *Kleinwasserkraft, geringe Fallhöhe, freischwimmender Energiewandler*

Keywords: *Small hydro power, low head differences, free stream energy converter*

1 Einleitung

Das innerhalb des 7. Europäischen Rahmenprogramms geförderte Projekt ***HYLOW***, dessen Teilprojekt – die Konstruktion eines Free Stream Energy Converters (FSEC) – am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD der Universität Rostock realisiert wird, hat vor über einem Jahr begonnen. Ziel ist es, einen freischwimmenden Energiewandler zu entwickeln, der aus geringen Energiepotentialen von fließenden Gewässern Strom erzeugt. Vor allem in entlegenen Orten und in Entwicklungsländern kann der FSEC in Wasserläufen installiert

werden, was eine kostengünstige und robuste jedoch trotzdem effektive Gestaltung erfordert. Materialeinsatz und Reparaturaufwand müssen demzufolge minimal veranschlagt werden. Gestaltung und Aufbau der Anlage wird in Abhängigkeit ihres Einsatzes einfachen geometrischen Formen entsprechen, wobei zu deren Gunsten auf eine strömungstechnische Optimierung verzichtet wird.

2 Modellversuche

Gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Meerestechnik wurden an der Universität Rostock und im Freiland in der Nähe von Rostock Vorexperimente mit selbstentwickelten Modellen mit dem Ziel durchgeführt, im Ergebnis grundlegende Aspekte zur Gestaltungsmöglichkeit eines FSEC zu liefern. Diese Modellexperimente, unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt, führen zu sicheren und verwertbaren Ergebnissen. Ebenso zutreffend ist dieses für die Findung einer optimalen gestalterischen Lösung durch Variation von Elementen einer modular aufgebauten Wasserkraftanlage. [1]

2.1 Messungen im Gerinne

Mit dem Versuchsaufbau (siehe Bild 1) wurden Widerstandsmessungen an einer Platte im Gerinne, die dreiseitig von einer Kulisse (bestehend aus Boden und Seitenwänden) umgeben war, durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, festzustellen, welchen Einfluss eine in Längsrichtung veränderte Position der Platte innerhalb der Kulisse auf die Widerstandskraft hat. Diese Positionsänderung wurde kombiniert mit einer Spaltmaßveränderung zwischen dem Boden und der Unterkante der Platte.

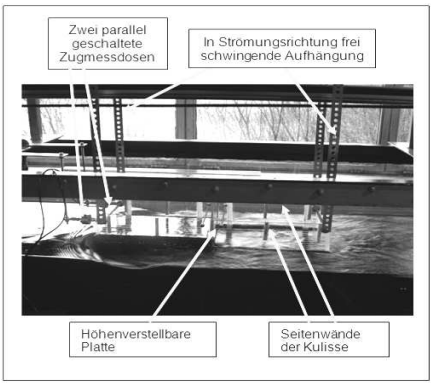
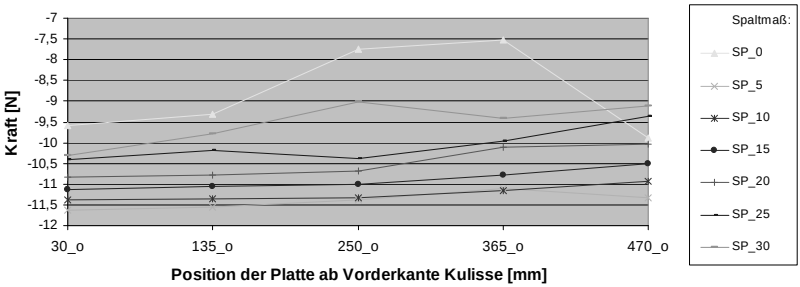


Bild 1: Versuchsaufbau im Gerinne

Die Versperrung des Gerinnes durch den Versuchsaufbau mit der Platte betrug etwa ein Drittel der Gerinnebreite und ca. 40 % der Wasserstandshöhe. Im Ergebnis der durchgeführten Versuche wurde festgestellt, dass die größten Widerstände bei Spaltmaßen von 5 – 10 mm (SP_5 und SP_10), was ca. 10 % der Tauchtiefe des Modells entsprach, sowie bei einer Plattenposition im vorderen Bereich (30_o und 135_o) der Kulisse auftraten (Diagramm 1).

Diagramm 1: Widerstand an einer Platte in einer Kulisse bei unterschiedlichen Spalthöhen an unterschiedlichen Positionen



Bei den Experimenten unter diesen Versuchsbedingungen war zu beobachten, dass auf Grund des hohen Versperrungsgrades die Durch- und Umströmung des Versuchsmodells nicht die zu erwartenden Gegebenheiten bei einem realen Einsatz mit deutlich freierer Umströmung widerspiegelt.

2.2 Freilandexperimente mit dem Small Scale Model

Das Small Scale Model (Bild 2 links) bietet auch als nicht schwimmendes Modell zahlreiche Erprobungsmöglichkeiten. Umfangreiche Experimente wurden im März 2009, also in der abflussreichsten Zeit, in einem Flusslauf nahe Rostock durchgeführt. Über eine Aufhängung ist das Modell stufenlos in der Höhe zu justieren, was zur Simulation unterschiedlicher Schwimmlagen genutzt wird bzw. einen gleichbleibenden Tiefgang gewährt.

Bei dieser Versuchsreihe wurde der Widerstand der Platte in der Strömung durch eine Widerstandsmessung an einem gebremsten Wasserrad ermittelt (Bild 2 rechts). Die gemessenen Kräfte wurden mit den geometrischen Modelldaten zur Leistungsermittlung genutzt.

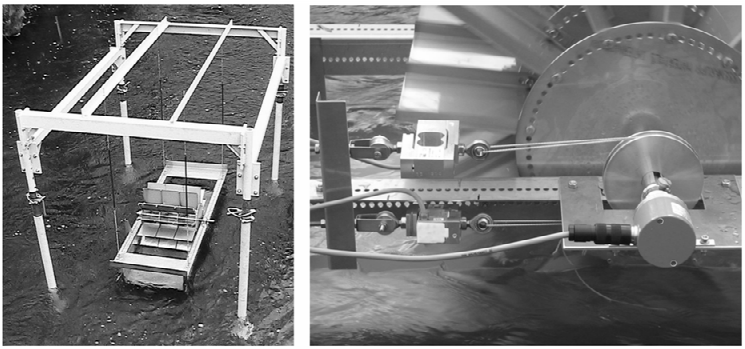


Bild 2: links: Small Scale Model im Freilandversuch, rechts: Kraftmessung

Hierbei ergab sich als Ergebnis ebenfalls ein optimales Spaltmaß von ca. 10 % der Tauchtiefe, allerdings stellte sich unter diesen Freilandbedingungen mit einer deutlich freieren Umströmungsmöglichkeit des Wassers um das Modell heraus, dass eine Position des Wasserrades im hinteren Bereich der Kulisse eine größere Leistung ermöglichte.

Zusätzlich zu diesen vergleichenden Versuchen wurden Untersuchungen zum Einfluss einer Volumengestaltung der Kulissenseitenwände durchgeführt.

Dabei wurden Volumenkörper mit einfacher geometrischer Struktur (Quader und Keile) so kombiniert, dass sie an den Seitenwänden der Kulisse außen bzw. innen bestimmte, in sich geschlossene Volumina bildeten. Dafür wurden im Innenbereich der Kulissenwände zwei unterschiedliche Breiten verwendet, um auch den Einfluss einer unterschiedlich starken Einengung des Durchströmungskanals zu untersuchen (Bild 3).

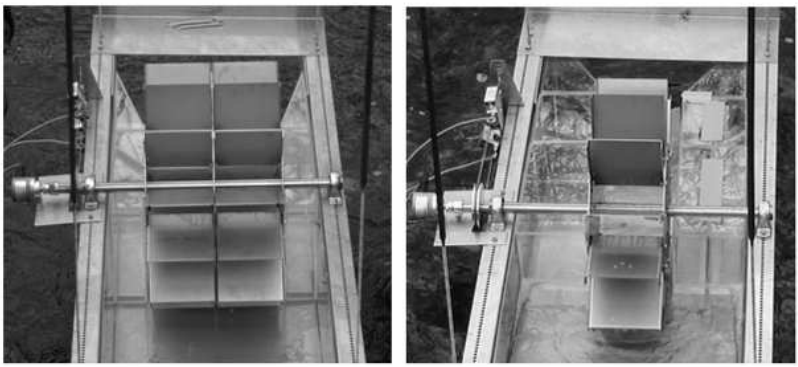
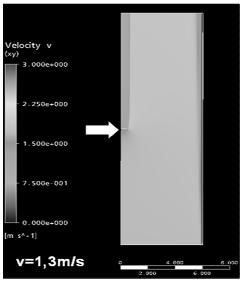
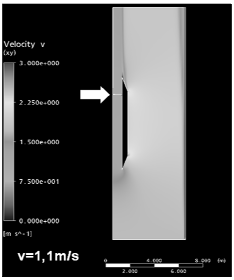
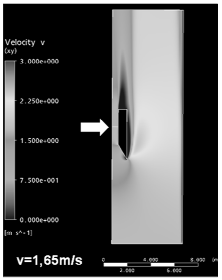


Bild 3: Unterschiedliche Ausführungen der Kulissengeometrie

2.3 Numerische Analysen

In der Planung des HYLOW-Projektes wurden numerische Analysen nicht berücksichtigt, da detaillierte Untersuchungen mit Strömungssimulationsprogrammen als zu aufwändig gelten. Dennoch sind mittels vereinfachter Annahmen, minimierter Parameter und Randbedingungen numerische Berechnungen erfolgt. Mit der Maßgabe, den FSEC in der Mitte des Flusses zu positionieren, beschränkten sich die Berechnungen auf die halbe Flussbreite des ersten Ausbringungsortes. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes ist mit ca. 20000 Zellen in einem 2D - Gitter gerechnet worden. Beispielsweise wurden das Ufer als raue Wand, die Wassertemperatur mit 10℃ und die Anströmgeschwindigkeit mit v = 1,7 m/s definiert. Die Wasserradschaufel ist als poröses Medium mit einer Porosität von 0,9 angenommen worden und durch den weißen Pfeil gekennzeichnet (Tabelle 1). Es wurden verschiedene Pontongeometrien (Pontons mit variierenden Innen- und Außenkonturen) sowie unterschiedliche Positionen des Mediums innerhalb der Kulisse numerisch untersucht. Nachfolgend sind einige ausgewählte Beispiele dargestellt.

Tabelle 1: Beispielhafte Darstellung der numerischen 2D - Analysen

Medium ohne Kulisse/ Ponton im freien Strom, v = 1,3 m/s hinter dem Medium	Medium mit Pontonaußenkontur, Kanalisierung der Strömung, v = 1,1 m/s hinter dem Medium	Medium mit Pontoninnenkontur, Kanalisierung der Strömung, v = 1,65 m/s hinter dem Medium
		

2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Energiedichte durch eine Einengung des Einströmkanals in einem bestimmten Umfang von Vorteil ist. Weiterhin ermöglicht das abrupte Öffnen des durchströmten Querschnittes kurz hinter der vertikalen Position der unteren Schaufelradblätter eine höhere Leistung. Mit den numerischen Analysen können die experimentellen Untersuchungen weitgehend bestätigt werden.

3 Skizzieren der Grobgeometrie

Ein erster Ansatz zur Geometriefindung eines Large Scale Models (LSM) des FSEC ist vorhanden. Neben den Vorgaben, eine Kombination aus tief- und unterschlächtigem Wasserrad (Wasserradkulisse aus zwei Pontons, die mittels einer Bodenplatte verbunden sind) zu entwickeln, fließen die Erfahrungen aus den Vorexperimenten in die Designfindung hinein. Aus den Tests im Kleingerinne, den Freilandexperimenten und den numerischen Analysen ergab sich, dass die Position des Wasserrades in Längsrichtung nur einen minimalen Einfluss auf das zu erwartende Leistungspotential hat und somit mittig im Kanal angeordnet werden sollte, um der Stabilisierung der Schwimmlage zu entsprechen. Außermittiges Positionieren kann durch partielles Fluten einzelner Pontonsektionen austariert werden.

Mit einer Pontoninnengeometrie sind die höheren Leistungen ermittelt worden. Es ist darauf zu achten, dass ein paralleler Abschnitt zwischen dem angeschrägten Einströmbereich und dem Wasserrad zu gestalten ist, da eine Beruhigung der Strömung nach ihrem kurzzeitigen Beschleunigen notwendig ist, um entstandene Verwirbelungen zu reduzieren (Bild 4 links).

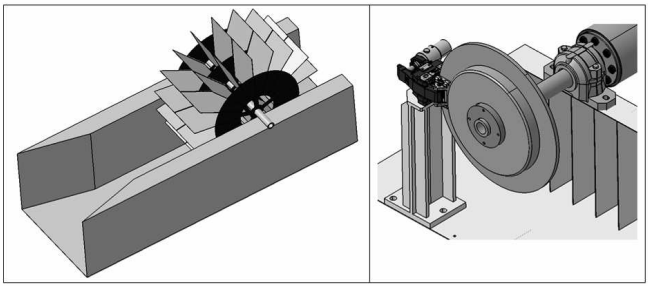


Bild 4: links: Entwurf der Grobgeometrie, rechts: Komponenten der Lagerung und Lastabnahme

Als Komponenten für die Lagerung sind zwei Pendelrollenlager vorgesehen, um einen optimalen und stabilen Rundlauf gewährleisten zu können.

Das LSM wird noch nicht zur Energiegewinnung genutzt; es werden die erreichbaren Leistungen vorerst festgestellt.

Aufgrund des Einsatzes des Modells in einem Flora - Fauna - Habitat - Gebiet erfolgt die Lastabnahme zunächst rein mechanisch, ohne hydraulische Flüssigkeiten bei 10 – 15 min^{-1}. Die Voreinstellung der Drehzahl wird über eine Konstruktion aus Bremsscheibe und

Bremszange manuell realisiert (Bild 4 rechts). Die Kraftmessung erfolgt über die Befestigung eines Kraftaufnehmers mit Verstärker an der Bremsanlage.

4 Ausblick

Abgesehen von einigen weiteren Tests mit einem schwimmenden Modell, welches hier nicht näher beschrieben wurde, sind die Grundlagenversuche weitgehend abgeschlossen. Die Fertigungsunterlagen für das LSM des FSEC werden erstellt und im Sommer 2009 an das im Projekt involvierte Stahlbauunternehmen übergeben. Bevor das LSM mit einer Gesamtlänge von 6 - 8 m und einer Breite von fast 2,5 m in einem Fluss nahe Rostock ausgebracht wird, ist jegliche Messtechnik zur kontinuierlichen sowie temporären Datenaufnahme zu installieren. Das sind Fixpunkte, die in die Konstruktion des Gesamtmodells zu integrieren sind. Ab Februar 2010, in der Zeit der wasserreichsten Abflüsse, beginnt die Testphase im Freiland. Mögliche Änderungen werden vorgenommen, bevor das LSM unter dem Einfluss von Tide und Schiffsverkehr in der Weser ausgebracht wird.

Definiertes Projektziel ist die Entwicklung eines Free Stream Energy Converters für geringe Strömungsgeschwindigkeiten mit einer optimalen Leistungsgewinnung. Dabei steht die Bestimmung des Wirkungsgrades zunächst ohne den Einsatz von Generator und Getriebe im Vordergrund.

Ein weiteres, den Entwurf und die Fertigung des LSM betreffendes Teilziel ist die Vereinbarkeit der zu entwickelnden freischwimmenden Wasserkraftanlage mit der EU-Wasserrahmenrichtlinie. Einerseits sind Unterbrechungen der Flussdurchgängigkeit und des Sedimenttransportes zu berücksichtigende Faktoren; auf der anderen Seite ist eine öl- und schmiermittelfreie Anlage zu realisieren, die den Umweltschutzansprüchen am Ausbringungsort genügt.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

Literatur

[1] Hadler, Jana; Brökel, Klaus; Paschen, Mathias; Semlow, Christian: *Freistromenergiekonverter geringer Leistung – strömungstechnische und konstruktive Betrachtungen.* Dresdner Wasserbaukolloquium 2009. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 3. – ISBN 978-3-86780-101-0

Investigation of stressed state of elastic element of elastic clutch from reinforced polymer material with the change of the strain

Vilhelm Hadzhiyski, Zviatko Atanasov *

University of Food Technologies, Plovdiv, 26 „Maritza“ 4000 Plovdiv, Bulgaria
*Technical University Varna, 1 „Stydentska“ 9010 Varna, Bulgaria
Email: vil_hadzhiyski@yahoo.de

Abstract: *In the present paper is investigating the State and Stain of elastic element of elastic clutch. The computer program is created for determination of the Stress in the elastic element in case of changing of the Strain, caused by the displacement between the connecting shafts.*

It is realized algorithm for a force loading when on each step is given changing of the Strain. It is presented the reaching of limit State of loading and the condition of a fracture with respect to the Stress. The paper gives the Limit Surface and the diagram of the Stressed State for various cases of reinforcement of the elastic element. It is presented the one dimensional Stressed State: compression and tangential loadings.

Keywords: Elastic clutch, reinforced composite material.

1 Introduction

Reinforced composite materials are construction materials, to improve the mechanical characteristics of which are used fibers. Key role in the physical and mechanical properties of reinforced composite has the matrix material. Elastic elements, with bar structure of the arrangement of the fibers, are defined as multi- layer systems (fig.1). Each layer represents reinforced subsystem which is based on the basic structure which is formed by uniform one-layer fiber.

The characteristics of multi-layer composite materials is essential geometry and structure of individual layers. In this case, in central one-directional compression system of power lines match. Then the construction of reinforced material should consist of one or more one-directional systems composed of fiber. This reinforced structure can only assume across stresses of compression, therefore, one elementary layer reinforced structure works only pure compression and therefore fibers must be oriented toward the main vector

of compression, i.e. to coincide with the system in the direction of the power line of compression stress. This reinforced one-directional organization is called reinforced one-layer.

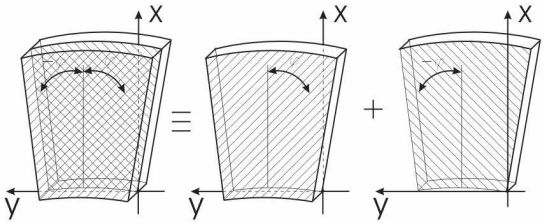


Fig.1 Elastic element from multi- layer composite materials

In two-dimensional deformation and stress state structure of elastic element must be composed of two one-dimensional composite subsystems.

Each of these subsystems will be oriented in the direction of the principal vector of stress (in the orthogonal organization-fig.2) or in the direction of the lines of maximum tangential stress (in diagonal organization – fig.3).

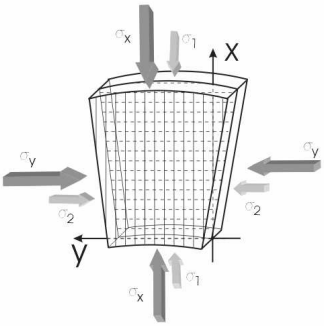


Fig.2 Orthogonal organization of the reinforced composite material

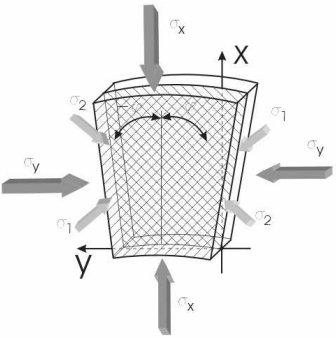


Fig.3 Diagonal organization of the reinforced composite material

The constructions of the elastic element of the elastic clutches are usually with complicated stress and deformation state, which is why the power lines in the structure represents a combination of two or more subsystems with a different direction (fig.4).

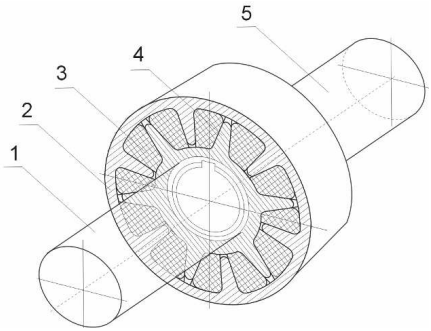


Fig.4 Transmission with elastic clutch (1 - shaft I, 2 - half-clutch I, 3 – elastic element from reinforced composite material, 4- half-clutch II, 5- shaft II)

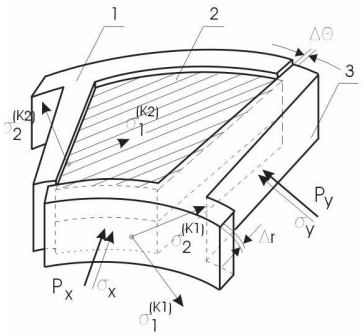


Fig.5 Stresses and strains acting on the elastic element

Reinforced composite must repeat / coincides with the trajectory of power lines that occur in structures during operation.

2 Statement

In one central compression state the fibers are oriented in the direction of the vector of the current load and uniformly distributed aspects in relation to the central axis (fig.5, 6). The relationship between strength

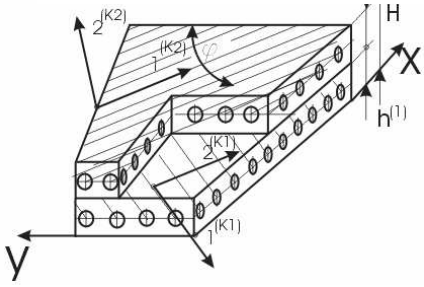


Fig.6 Global (axes x and y) and local (axis 1 (ki) 2 (ki)) coordinate system of the elastic element.

of the reinforced composite under compression and structural and mechanical characteristics are determined by the equation [1, 2]:

$$\sigma_c = \frac{2H}{3(1-H)}\sqrt{H.E_f.(1-H).E_m}\,, \qquad (1)$$

where: E_f - Modulus of linear deformation of the reinforced fiber, E_m - Modulus of linear deformation of the matrix, H - thickness of the composite.

The relationship between strength of the reinforced composite under compression and structural and mechanical characteristics for the case of Fig. 3 is determined by the equation:

$$\sigma_c = \frac{2}{\sin 2\varphi}\left[\sum_{i=1}^{n} \nu_i H_i(\tau_f \sin 2\varphi - \tau_m) + \tau_m\right], \quad (2)$$

where: τ_f - strength of the reinforced fibers in the tangential load, τ_m - strength of the matrix in the tangential load, ν_i - coefficient of performance of reinforced, $h^{(i)}$ - thickness of the composite layer, n - numbers of layers, φ - angle of deviation of the axis of the reinforced fiber from the vector of the load.

In flat stress state Hook law of materials with one direction of reinforcement is [1]:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}^0 & g_{12}^0 & 0\\ g_{12}^0 & g_{11}^0 & 0\\ 0 & 0 & g_{66}^0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \gamma_{12}\end{Bmatrix}, \quad (3)$$

where: $[\mathrm{G}^0]$ - the matrix of stiffness of composite materials $[G^0] = [S^0]^{-1}$.

In the one-dimensional stress state the relationship between average stress and deformation is:

$$\{\varepsilon_{12}\} = [S^0]\{\sigma_{12}\}. \quad (4)$$

Using the equality for the matrix of reformation:

$$[\mathrm{T}_1] = \begin{bmatrix} \cos^2(\varphi) & \sin^2(\varphi) & \sin(\varphi)\cos(\varphi)\\ \sin^2(\varphi) & \cos^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi)\\ -2\sin(\varphi)\cos(\varphi) & 2\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi)-\sin^2(\varphi)\end{bmatrix} \quad (6)$$

and

$$\{\varepsilon_{12}\} = [T_1]\{\varepsilon_{xy}\} \quad (5)$$

It is created a program for analysis of stress and deformation state and destruction of the layers of the non-metal reinforced elastic element of the elastic clutch. A study of two-layers reinforced composite materials with reinforcement cross is investigated. Adopted model implies a perfect correlation between the layers of composite, i.e. deformation of individual layers in the global coordinate system (x, t – fig.6) are the same.

Model and developed a program allowing determination, the type of stress state of the layers of the composite, taking into account the stiffness set of materials in mechanical and strength characteristics of the composite.

In the study of the behavior of elastic clutch with non-metallic elastic element is of interest for practical implementation of the algorithm with successive change of deformation. This state meets the condition of the elastic element in the transmission of a moment be-

tween rotary shafts and compensation of the displacement through connected shafts (axle, radial, angular and combined displacement).

Fig. 7 is presented a program of the determination of stress and deformation of reinforced non-metallic composite material, with increase in deformation in the work process of the elastic component of elastic clutch.

3 Results

On Fig. 8, 9, 10 is presented numerical results obtained in the radial displacement (deformation in the direction of the x-axis) for angle of reinforcement $\varphi = \pm 30^0;\ \pm 45^0; \pm 60^0$, respectively.

Fig. 11, 12,13 present numerical results obtained in the deformation in the direction of the axis y ($\Delta\theta$) and for angle of reinforcement $\varphi = \pm 30^0;\ \pm 45^0; \pm 60^0$, respectively.

Fig. 14, 15 present numerical results obtained in the deformation $\Delta r + \Delta\theta$ (for angle of reinforcement $\varphi = \pm 30^0; \pm 60^0;\ \pm 45^0$), respectively.

4 Analysis of the results

The elastic element is destroyed when $\sigma_x = -80.5\ MPa$ because after this value $\sigma_1 = \sigma_{\lim it-1}$ (fig.8). For stress $\sigma_x = -59.7\ MPa$ the elastic element loses its entirety due to the tangential stress τ_{12}, which value equal to the limit stress $\tau_{\lim it12}$ (fig.9).

In this case, initial elastic component of the connector in reaching lost integrity $\sigma_x = -52.6\ MPa$ (due to a large tangential stress), then upon reaching $\sigma_x = -88.4\ MPa$ destruction occurs because of the layer 1 exceeded the limit compression stress across the fibers of the reinforcement (fig.10).

The elastic element (when $\sigma_y = -19.6\ MPa$) loses its entirety because of stress, which reaches the limit value of compression in cross direction of the reinforced fiber (fig. 11).

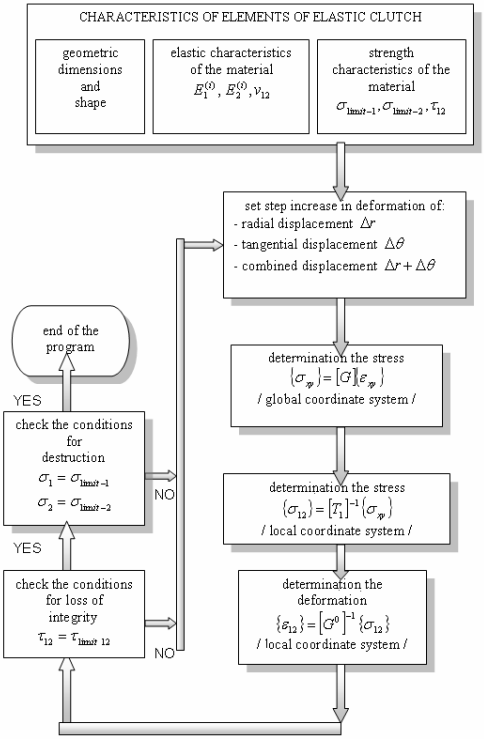
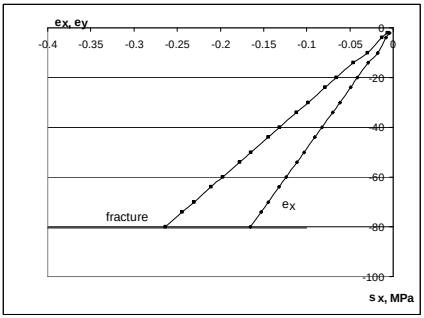


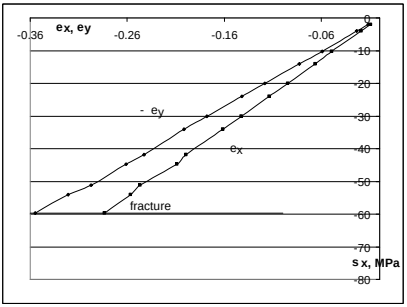
Fig.7 Algorithm of the Program.

For stress $\sigma_y = -60.3\ MPa$ loss of entirety occurs in the elastic element due to $\tau_{12} = \tau_{limit\ 12}$ (fig.12). The elastic element reaches the lost of integrity when $\sigma_y = -140.0\ MPa$ (due to a large tangential stress), then upon reaching $\sigma_y = -280.0\ MPa$ destruction occurs because of the layer 1 exceeded the limit compression stress across the fibers of the reinforcement (fig.13). For stresses $\sigma_x, \sigma_y = -130.0\ MPa$ a destruction of the layer 1 occurs due to exceedance of compression stress across the fibers of the reinforcement (fig.14 $\varphi = \pm 30^0$).

Once destruction of the layer 1 occurs ($\sigma_x, \sigma_y = -190.0\ MPa$) due to overshoot of limit compression stress across the fibers of the reinforcement (fig.15).

The lost of integrity of the layer 1 is caused by reaching the stress $\sigma_x, \sigma_y = -84.2\ MPa$ (due to the large tangential stress), then upon reaching $\sigma_x, \sigma_y = -130.0\ MPa$ destruction occurs,

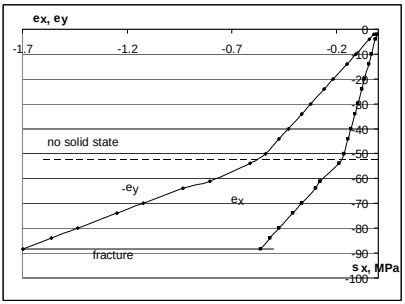




because exceeded the limit compression stress across the fibers of the reinforcement (fig.14 $\varphi = \pm 60^0$).

Fig.8 Radial displacement and angle reinforcement $+30^0$, -30^0.

Fig.9. Radial displacement and angle reinforcement $+45^0$, -45^0.



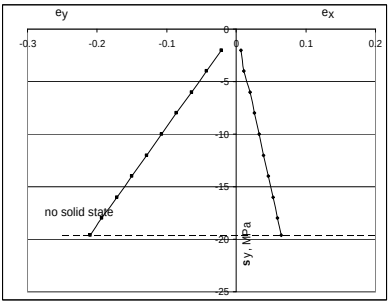


Fig.10 Radial displacement and angle reinforcement +60°, -60°.

Fig.11 Angular displacement and angle reinforcement +30°, -30°.

5 Conclusions

1.It is proposed a model of non-metal reinforced composite material for the production of elastic components of clutches in condition of radial, tangential displacement and the connected through elastic clutch shafts.

2.The distorted and stress state of elastic element under different angle of orientation of the reinforced fibers (30^0, 45^0 and 60^0) is investigated.

3. In Action of a deformation caused by radial and tangential displacement is most advantageous elaboration of elastic elements with angle reinforcement 60^0.

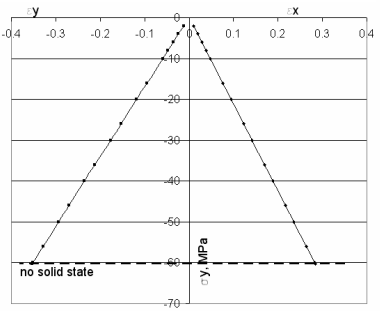


Fig.12. Angular displacement and angle reinforcement $+45^0$, -45^0.

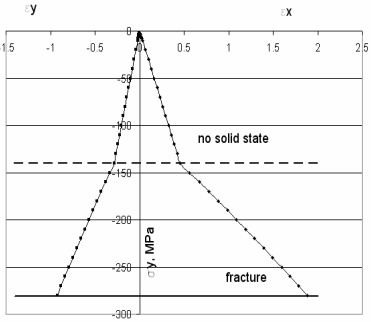


Fig.13. Angular displacement and angle reinforcement $+60^0$, -60^0.

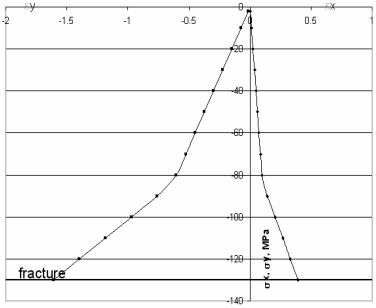


Fig.14. Radial and angular displacement and angle reinforcement $+30^0$, -30^0 and $+60^0$, -60^0 .

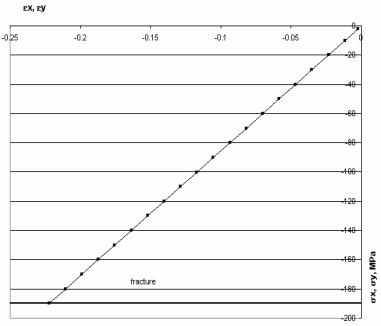


Fig.15 Radial and angular displacement and angle reinforcement $+45^0$, -45^0.

4. Defining a loss of integrity (the occurrence of cracks), because of the occurrence of large tangential stress ($\tau_{12} = \tau_{\lim it12}$). Destruction is dominant in pressure across the direction of reinforcement of the elastic element ($\sigma_2 = \sigma_{\lim it-2}$).

References:

[1] Choo V.K.S. - Fundamentals of composite materials, Knowen, 1990.

[2] Jones, R. M.Mechanics of composite materials.2nd Edition.Taylor&Francis. Philadelphia, USA, 1999.-519pp.ISBN: 1-56032-712-X.

[3] Tong, L.,Mouritz,A. P., Banuister M. K.3D-Fiber Reinforced Polymer Composites, Elsevier Science, Oxford,UK, 2002. –241pp. ISBN: 0-08-043938-1.

Einfluss der DfX-Strategie auf Produktentwicklungskriterien

Christina Stöber, Harald Meerkamm

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

Inhalt: *Der Beitrag soll aufzeigen, welche Beeinflussungen von der Wahl der DfX-Strategie auf Kriterien in der Produktentwicklung ausgehen. Dazu werden Anforderungen betrachtet, die ein Produkt erfüllen muss. Ferner werden die Produktentwicklungskriterien spezifiziert. Es wird erläutert, auf welche Weise die DfX-Strategie diese Kriterien beeinflusst. Abschließend wird darauf eingegangen, welchen Einfluss die DfX-Strategie auf die Bereitstellung einer prozessorientierten DfX-Unterstützung hat.*

Abstract: *This paper points out, which influences come from the choice of the DfX-strategy to criteria in product development. In addition requirements are regarded, which a product must have. Furthermore the product development criteria are specified and it is described, how the DfX-strategy affects these criteria. Finally the influence of the DfX-strategy is shown to supply of a process orientated DfX-support.*

Stichwörter: *Design for X, DfX-Unterstützung, Entwicklungskriterien, Produktentwicklungsprozess*

Keywords: *design for X, DfX-support, development criteria, product development process*

1 Einleitung

Eine detaillierte DfX-Unterstützung findet man beim Ausgestalten von Produkten in den späten Phasen der Produktentwicklung. Den Produktentwicklern werden Hilfestellungen in Form von Elementaranweisungen zur Verfügung gestellt, beispielsweise bei der Entwicklung von Keramikbauteilen Hilfestellungen wie „auf möglichst gleichmäßige Wanddicken achten“ oder „Querschnittssprünge vermeiden“ 0. Aufgrund der getroffenen Entscheidungen können sie diese Erkenntnisse in ihre Entscheidungsfindung und beim Ge-stalten von Bauteilen mit einfließen lassen und somit das Optimum für das Produkt und für alle davon abhängigen Prozesse erzielen, wie der Fertigung oder der Montage. Um unnötige Iterationen, Kosten und Mehraufwand zu vermeiden, ist es deswegen notwendig, den „Design for X“-Ansatz in den Produktentwicklungsprozess (PEP) auch in die frühen Phasen der Produktentwicklung einzubetten und so durch die Verfolgung der DfX-Strategie eine frühzeitige Beachtung von wichtigen Entwicklungsbedingungen zu ermöglichen.

2 Anforderungen an ein Produkt

Die Entwicklung und Umsetzung von komplexen technischen Systemen stellt eine Herausforderung an alle beteiligten Fachleute dar, da es eine stetig steigende Anzahl von Anforderungen umzusetzen gilt. Es lassen sich Einflüsse vom Kunden (Anwender) (z.B. elegantes Design oder ein angemessenes Preis-Leistung-Verhältnis), vom Produktlebenszyklus (z.B. fertigungs- oder montagegerecht) und interne und externe Unternehmenseinflüsse (wie Gesetze oder Kapazitäten bei der Fertigung) auf ein Produkt ableiten 0.

Am Anfang eines jeden Entwicklungsprozesses steht die Klärung von Anforderungen, die aus der Aufgabenstellung abgeleitet werden. Unter einer Anforderung wird die knappe und präzise Formulierung eines gewünschten Sachverhaltes in der Sprache des Konstrukteurs verstanden 0. Die Anforderungen lassen sich in Forderungen und Wünsche einteilen 0. Als Hilfsmittel zur systematischen Zusammenstellung aller Daten und Informationen, die zur Entwicklung eines Produktes gebraucht werden, stehen den Produktentwicklern das Lasten-, Pflichtenheft und die Anforderungsliste zu Verfügung. Das Produktentwicklungsteam erhält vom Kunden das Lastenheft, in dem der potentielle Auftraggeber alle Anforderungen und Randbedingungen an das gewünschte Produkt aus seiner Sicht zusammenstellt. Dabei werden die Fragen „Was ist zu lösen?“ und „Wofür ist es zu lösen?“ behandelt. Das Lastenheft dient als Grundlage für Ausschreibungen und Angeboten. Wie und womit die gestellten Anforderungen vom Kunden zu realisieren sind, werden vom Produktentwicklungsteam im Pflichtenheft festgehalten. Dieses gilt als Vertragsgrundlage und muss somit vom Auftraggeber genehmigt werden. Als erweitertes Pflichtenheft dient den Produktentwicklern die Anforderungsliste, die alle Daten und Informationen beinhaltet, die für die Konstruktion des Produktes notwendig sind. Die VDI/VDE 3694 definiert eine Anforderungsliste als „eine systematisch erarbeitete Zusammenstellung aller Daten und Informationen durch den Konstrukteur für die Konstruktion von Produkten“ 0. Sie beinhaltet alle Angaben über Menge, Stückzahlen, Abmessungen und Leistungen. Das Pflichtenheft und die Anforderungsliste, müssen während des gesamten PEP aktualisiert werden. Als weiterer Schritt in der Entwicklung müssen nun die Anforderungen durch das Produktentwicklungsteam umgesetzt werden, wobei diese in Eigenschaften und Merkmale 0 übersetzt werden müssen. Im normalen Produktentwicklungsablauf sind Eigenschaften vorgegeben, die ein Produkt besitzen soll, wie z.B. das Gewicht, Sicherheit oder die verschiedenen Gerechtheiten (fertigungs-, montage-, recyclinggerecht, …), um das Produkt frühzeitig an die Randbedingungen des Produktlebenszyklus anzupassen.

Dazu steht der DfX-Ansatz zur Verfügung. Unter Design for X werden alle Methoden, Strategien und Werkzeuge zusammengefasst, die es Produktentwicklern ermöglichen, verschiedene Aspekte und Einflüsse, die für ein Produkt in den verschiedenen Lebensphasen von Bedeutung sind, gleichzeitig in der Produktentwicklung zu berücksichtigen 0. Dazu ist es notwendig, den Ansatz im gesamten PEP zu verankern. Gerade in den späten Phasen ist eine konkrete DfX-Unterstützung mit DfX-Richtlinien (Elementaranweisungen) bei der Ausarbeitung von spezifischen Bauteilen sehr hilfreich 0. Wird z.B. ein Keramikbauteil benötigt, wird den Produktentwicklern spezifisches Wissen für dessen Gestaltung bereitgestellt, wie „Materialanhäufungen vermeiden“ oder „großflächig Kräfte einleiten“ 0. Ferner ist es für Produktentwickler hilfreich, Methoden an die Hand zu bekommen, durch die die gewünschten Eigenschaften eines Produktes umzusetzen sind. In den frühen Phasen ermöglicht die Einbindung des DfX-Ansatzes durch die Verfolgung der DfX-Strategie eine frühzeitige Beachtung von wichtigen Entwicklungsbedingungen. Durch diese ist es möglich, die Zielsetzungen bei der Entwicklung eines Produktes mithilfe der Auswahl und Gewichtung von geeigneten Kriterien zu formulieren 0. Liegt in einem Bereich eine Anhäufung von DfX-Kriterien vor, ist es sinnvoll, diese als Schwerpunkt für eine Strategie zu wählen. Die Bildung einer Strategie, sowie die Vorstellung einer Rechnerunterstützung auf diesem Gebiet wird in 0 verdeutlicht.

3 Einfluss der DfX-Strategie auf den Produktentwicklungsprozess

Bei der Betrachtung der Einflüsse auf die Anforderungsliste ist festzustellen, dass sich die Einflüsse bzw. Kriterien, die auf die Festlegung der Eigenschaften eines Produktes einwirken, sich in Randbedingungen, Grundkriterien und Entwicklungskriterien kategorisieren lassen. Ein entscheidender Punkt bei der Definition der Anforderungsliste ist die Klärung der Randbedingungen, die an ein Produkt gestellt werden. Die Randbedingungen werden stark durch die Anwender, das Unternehmen und den Produktlebenszyklus beeinflusst. Für die Erfassung der möglichen Anforderungen stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung, wie Kano-Modell, Conjoint-Analyse oder Marktanalysen 0. Ferner lassen sich Grundkriterien ermitteln, die bei jeder Entwicklung und Konstruktion unabhängig von dem Produkt zu beachten sind. Diese Grundkriterien beinhalten die Grundregeln zur Gestaltung, die von der Erfüllung der technischen Funktion, der wirtschaftlichen Realisierung und der Sicherheit für Mensch und Umgebung abzuleiten sind. Die Grundregeln der Produktentwicklung sind in drei Schlagwörtern zusammenzufassen 0: einfach, eindeutig und si-

cher. Diese Grundkriterien besitzen stets ihre Gültigkeit und dienen als Grundlage für das Entwerfen eines Erzeugnisses. Bei Nichteinhaltung sind die Schäden und die daraus entstehenden Konsequenzen für Mensch, Maschine und Umwelt nicht abzusehen. Deswegen ist es notwendig, dass die Grundkriterien immer vor allen anderen Kriterien in der Produktentwicklung den obersten Stellenwert einnehmen. Damit ein einwandfreies Durchlaufen des Produktlebenszyklus für das zu entwickelnde Objekt gewährleistet werden kann, müssen im PEP frühzeitig Entwicklungskriterien beachtet werden. Dazu zählen Größen wie die Geometrie, die Kinematik, die Fertigung, die Montage und der Transport des Produktes 0, die vom Produktentwicklungsteam umgesetzt werden müssen. Dabei beinhalten die Entwicklungskriterien auch die Forderungen, die vom Kunden gestellt werden, wie die Leistung einer Maschine oder das Design. Bei der Aufstellung einer neuen Anforderungsliste ist es hilfreich, entsprechende Checklisten für die Entwicklungskriterien durchzugehen, um Anstöße für das neue Produkt zu erhalten. Beispielsweise ist es notwendig, bei der Fertigung das bevorzugte Fertigungsverfahren zu beachten, genauso wie die mögliche Qualität, die gefertigt werden kann. Für eine eindeutige Beschreibung der Entwicklungskriterien sind alle technischen Daten, Werte, Angaben und Randbedingungen eines technischen Produktes festzuhalten 0, die teilweise aus den Randbedingungen abgeleitet werden können.

Liegen dem Produktentwicklungsteam die benötigten Kriterien vor, muss nun entschieden werden, welches Gewicht welchem Kriterium bzw. welcher Anforderung zugewiesen wird. Dazu ist der Einsatz der DfX-Strategie hilfreich, bei der eine Gewichtung einzelner Kriterien erfolgt. Im Folgenden wird der Einfluss der DfX-Strategie auf die Kriterien erläutert (Bild). Die Randbedingungen werden von verschiedenen Quellen beeinflusst, von denen Anforderungen auf ein Produkt ausgehen können. Diese umfassen die Gesamtheit aller Platzhalter „X“ des Design for X. Der Kunde legt beim Erstellen des Lastenhefts fest, welche Eigenschaften und Merkmale ein Produkt aufweisen soll. Durch die Festlegung der Randbedingungen wirkt sich dies auf bestimmte Xe aus. Der Einsatz eines Produktes bei tiefen Temperaturen beeinflusst z.B. die Werkstoffwahl und wirkt sich somit auf die Fertigung und die Montage aus. Dabei muss auch die DfX-Strategie z.B. DfCost mit einer kostengünstige Montage umgesetzt werden. Die Beeinflussung der DfX-Aspekte durch die Festlegung der Randbedingungen schlägt sich somit indirekt auf die Wahl und Umsetzung der DfX-Strategie nieder. Wie bereits erwähnt, müssen die Grundkriterien, einfach, eindeutig und sicher, unter allen Umständen bei der Produktentwicklung eingehalten werden. Sie

besitzen gegenüber den anderen Kriterien den höchsten Stellenwert in der Umsetzung. Deswegen dürfen die Grundkriterien nicht von der jeweils gewählten DfX-Strategie abhängen. Bei dem Ziel, Kosten zu sparen (DfCost-Strategie), würde eine Beeinflussung der Grundkriterien durch Kosteneinsparmaßnahmen verheerende Folgen haben, die nicht verantwortet werden können. Die Entwicklungskriterien stellen die Leitlinie der gesamten Entwicklung dar, nach denen alle wichtigen Entscheidungen in der Produktentwicklung ausgerichtet werden. Durch die Einteilung in Forderungen und Wünsche erhalten die Entwicklungskriterien bereits eine Gewichtung.

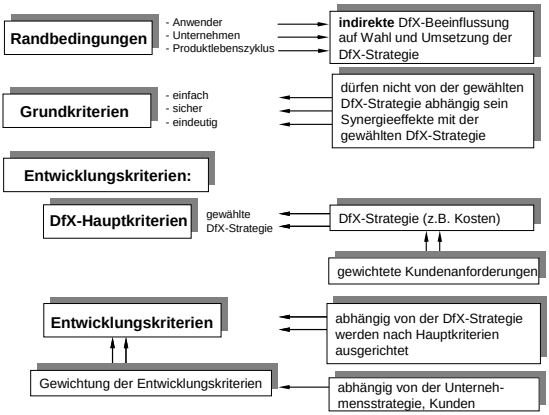


Bild 1: Einfluss der DfX-Strategie auf Kriterien in der Produktentwicklung

Durch den Einsatz der DfX-Strategie ergeben sich unterschiedliche Beeinflussungen auf die Entwicklungskriterien, wobei manche Entwicklungskriterien (DfX-Entwicklungskriterien) durch die verfolgte DfX-Strategie höherer gewichtet werden. Die DfX-Strategie wird gemäß der ermittelten und gewichteten Kundenanforderungen gewählt 0. So werden die Entscheidungen alle auf der Basis der gewählten DfX-Strategie getroffen. Fällt die Wahl auf die DfCost-Strategie, werden die Kosten (DfC-Hauptkriterium) die Festlegung aller anderen Kriterien beeinflussen. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich, dass die Entwicklungskriterien hervorgerufen durch die gewählte DfX-Startegie DfX-Hauptkriterien aufweisen, die Kriterien mit höherer Gewichtung durch die DfX-Strategie beinhalten. Die Umsetzung der Entwicklungskriterien ist gegenüber den DfX-Hauptkriterien weniger gewichtet, wobei dies stark von der jeweils verfolgten DfX-Strategie (DfX-Hauptkriterium) abhängt. Soll ein Produkt kostengünstig sein, wirkt sich dies auf Entwicklungskriterien wie das Material (Kunststoff statt Stahl) und somit auf die Fertigung (Spritzguss statt Tiefzie-

hen) aus. Bei dem DfEnvironment-Hauptkriterium „Recycling“ wird auch die Materialwahl beeinflusst, so dass z.B. eine sortenreine Verwendung von Materialien statt Verbundbauteile angestrebt werden soll 0. Für das Umsetzen aller Entwicklungskriterien muss der Produktentwickler die entsprechenden Merkmale eines Produktes identifizieren, über die er die gewünschten Eigenschaften des Erzeugnisses einstellen kann. Die Entwicklungskriterien untereinander können in unterschiedlichem Verhältnis zueinander stehen. Sie können nach 0 unabhängig, unterstützend, gegenläufig oder widersprüchlich sein. Zur Bewältigung dieses Sachverhaltes ist der Einsatz von Rechnerunterstützung hilfreich, wie beispielweise das Programm Balance 3D 0. Bei der Gewichtung der Nebenkriterien spielen aber auch noch weitere Aspekte eine Rolle, wie die Unternehmensstrategie und die Kundenwünsche, nach denen Entscheidungen getroffen werden. Sieht ein Unternehmen beispielsweise seinen Schwerpunkt in der Fertigungstechnologie, so wird dieser Punkt über die übrigen Nebenkriterien gestellt, wobei dies mit den Forderungen und Wünschen des Kunden abzuklären ist.

4 Einfluss der DfX-Strategie auf Bereitstellung von prozessorientierten DfX-Unterstützung

Es ist enorm wichtig, zum richtigen Zeitpunkt im PEP die richtigen Informationen und Unterstützungen bereitzustellen, damit das Entwicklungsteam schnell und effektiv arbeiten kann. Um die Komplexität und die Fülle von DfX-Kriterien und zur Verfügung stehenden Methoden handhabbar zu machen, wurden Ansätze erarbeitet, die den DfX-Ansatz und seine Hilfestellungen in den PEP einzubinden 0. Ziel dabei ist es, das Produktentwicklungsteam bei seinen Tätigkeiten zu unterstützen. Einen Beitrag dazu leistet die prozessorientierte Aufbereitung von Methoden, indem sie als Black-Box dargestellt werden 0. Die Kopplung der Methoden mit DfX bildet die Grundlage für die prozessorientierte Eingliederung und Bereitstellung der DfX-Unterstützung in den PEP. Wie im letzten Kapitel gezeigt, hat die DfX-Strategie einen bedeutenden Einfluss auf die Wahl der Kriterien, die in der Produktentwicklung umzusetzen sind, und auch auf ihre Gewichtung. Diese Kriterien stellen Eigenschaften und Merkmale des Produktes dar. Zur Umsetzung dieser Kriterien in der Produktentwicklung benötigen das Entwicklungsteam Hilfestellungen, wie Elementaranweisungen, die gemäß der Gewichtung der mit ihnen gekoppelten Kriterien eine Priorisierung erhalten müssen. Die Gewichtung bzw. die Rangfolge der Anzeige dieser Hilfestel-

lungen hängen von den in Bild 1Bild gezeigten Beeinflussungen der Kriterien in der Produktentwicklung von der DfX-Strategie ab.

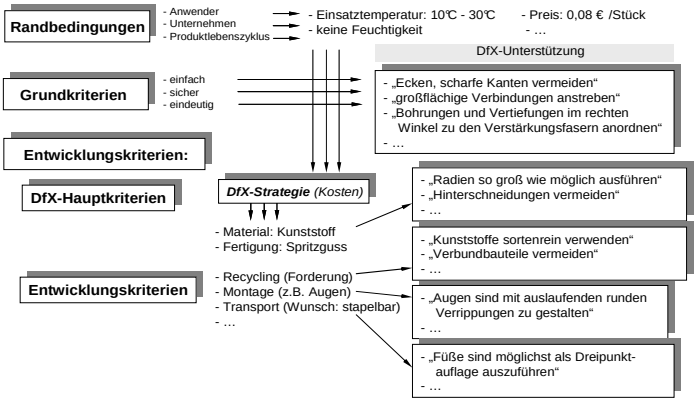


Bild 2: DfX-Unterstützung unter Einfluss der DfCost-Strategie

Bild zeigt eine solche Bereitstellung beispielsweise an einem Spritzgussteil mit verfolgter DfCosts-Strategie. Dabei haben Hilfestellen, die von den Grundkriterien abzuleiten sind, die höchste Priorität. Die Beeinflussung der DfX-Aspekte durch die Festlegung der Randbedingungen schlägt sich indirekt auf die Wahl und Umsetzung der DfX-Strategie nieder und somit auf die Auswahl und Rangfolge der Hilfestellungen. Die DfX-Hauptkriterien (DfX-Strategie) besitzen neben den Grundkriterien die höchste Gewichtung, was sich in der Priorisierung der Hilfestellungen widerspiegelt. Die Gewichtung der Entwicklungskriterien ist geringer als die Gewichtung der DfX-Hauptkriterien abhängig von der jeweils verfolgten DfX-Strategie. Weiterhin müssen in der Bereitstellung von einer DfX-Unterstützung für Entwicklungskriterien die Aspekte Forderung und Wunsch, die von den Kundenwünschen abhängig sind, sowie der Einfluss der Unternehmensstrategie und die sich daraus ableitende Rangfolgen für die Kriterien berücksichtigt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde gezeigt, wie die DfX-Strategie die Festlegung von Kriterien in der Produktentwicklung beeinflusst. Die Einbettung des „Design for X“-Ansatzes in die frühen Phasen der Produktentwicklung durch die Verfolgung der DfX-Strategie ermöglicht eine frühzeitige Beachtung von wichtigen Entwicklungsbedingungen. Es wurden Einflüsse bzw. Kriterien, die auf die Festlegung der Eigenschaften eines Produktes einwirken, beleuchtet.

Zur Bewältigung dieses komplexen Sachverhaltes ist der Einsatz von Rechnerunterstützung hilfreich. Um die Entscheidungsfindung des Produktentwicklers zu unterstützen und somit das Optimum für das Produkt und für alle davon abhängigen Prozesse zu erzielen, wurde abschließend auf den Einfluss der DfX-Strategie auf Bereitstellung von einer prozessorientierten DfX-Unterstützung eingegangen. Im Weiteren muss untersucht werden, welche Synergieeffekte und Wechselwirkungen die Wahl der DfX-Strategie mit anderen Einflüssen auf die Produktentwicklung wie z.B. die vorhandenen Prozesse in einem Unternehmen, die Unternehmensphilosophie oder die Marktpositionierung hervorruft.

Literatur

[1] Brevier: http://www.keramverband.de/brevier_dt/brevier.htm, Stand: 25.06.2009.

[2] Meerkamm, M.; Paetzold, K.: *2. Ergebnissbericht FORFLOW*, Bay. Forschungsverbund für Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung, 2008.

[3] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre, Methoden und Beispiele für den Maschinenbau, Hanser-Verlag, 2005.

[4] N.N.: VDI/VDE-Richtlinie 3694: System requirement/specification for planning and design of automation systems, Beuth Verlag, 2008-01.

[5] Weber, C.; Deubel, T.: VDD-Value Driven Development In: *Konstruktion*, Ausgabe 11/12 2007, Springer Verlag, Düsseldorf , 2007

[6] Stechert, C.; Bauer, S.; Franke, H.-J., Meerkamm, H.: requirements management in early stages of mechatronic design by visualization of interdependencies, In: *10th International Design Conference DESIGN 2008*, Dubrovnik, Croatia, 2008, paper no. 501.

[7] Faerber, M.; Stöber, C.; Jochaud, F.; Jablonski, S.; Meerkamm, H.: Knowledge oriented process management, In: *10th International Design Conference DESIGN 2008*, Dubrovnik, Croatia, 2008.

[8] Fiksel, J.: Design for Environment: Creating Eco-Efficient Products and Processes, McGraw-Hill, United States of America, 1996.

Feuer- und brandschutzgerechtes Konstruieren als Baustein für das Design for X

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar, University of Applied Sciences: Technology, Business and Design,
Fakultät für Ingenieurwissenschaften, FB Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik
Email: henrik.schnegas@hs-wismar.de; Internet: http://www.hs-wismar.de

Inhalt: *Betrachten wir die Entwurfsphase im methodischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, dann werden vordergründig mechanische Belastungen numerisch erfasst. Korrosion und Verschleiß gehen gewöhnlich als Zuschläge bzw. werkstoffbezogen in den Entwurf mit ein. Nahezu unberücksichtigt bleiben im klassischen Maschinenbau thermische Einflüsse, wobei gerade durch den Einsatz von Kunststoffen und Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium und Magnesium veränderte Brandsituationen auftreten und auch die Fertigungsprozesse durch höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten und feinere Späne das Brandrisiko ansteigen lassen. Vorgestellt wird im Beitrag eine Gefahrenanalyse und besonders für Konstrukteure ein Handlungskatalog, mit dem Brände erkannt, vermieden oder zumindest bewusst gesteuert werden können.*

Abstract: *It's normal to consider mechanical stress in design process.On the other side thermical stress isn't a standard failure situation in mechanical engineering. But in modern machines and apparatusses we use more and more plastics and lightweight materials with a higher danger of fire. So we need rules to identify dangerous constructions and to find better products without danger by fire in design process. In this paper you can find some informations about fire risk analysis and methods for fire protection in design process.*

Stichwörter: *Thermischer Ausfall, Gefahrenanalyse, Brandgefahr, Brandschutz, Feuerschutz, Design for X*

Keywords: *Thermical Failures, Risk analysis, Fire Protection, Design for X*

1 Einleitung und Motivation

„Deutschland ist auch zu Beginn des 21. Jahrhunderts eines der wenigen Industrieländer ohne einheitliche nationale Brand- und Feuerwehrstatistik“[01]. Dennoch lassen sporadisch auftauchende Zahlen erahnen, welche Schäden mit einem Brand einhergehen. In einschlägiger Literatur wird von jährlich 200.000 Wohnungsbränden mit 600 Todesfällen, 400.000 Kfz-Bränden oder 600 Busbränden gesprochen. 50 Flugzeug-abstürze oder 120 Windradunfälle mit ca. 10% Brandanteil ergänzen die Statistik. Aus technischer Sicht werden Ingenieure hellhörig, wenn Pkws, Agrartechnik, Flugzeuge, Windräder, Werkhallen, Werkzeugmaschinen oder Sensoren brennen. Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, sind moderne Produkte vieler Branchen heute brandgefährdet, was an-gesichts fehlender Fach-

bücher zu einem Handeln hinsichtlich der Schaffung einer Richt-linie für feuer- und brandschutzgerechtes Konstruieren anregt.

Abb.1: Aktuelle Brandbeispiele [02]

Betrachten wir die Brandfälle, erscheint zunächst eine breite Vielfalt von unterschiedlichen Brandsituationen vorzuliegen. Beim genaueren Analysieren bleibt jedoch nur ein Brandmodell übrig, welches in Abbildung 2 dargestellt ist.

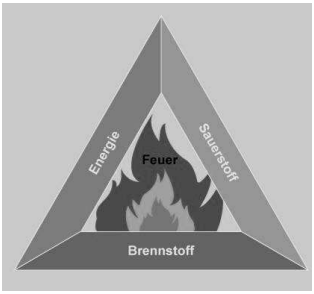


Abb. 2: Feuerfördernde Kriterien [03]

Ein Brand tritt ein, wenn drei Bedingungen zusammentreffen. Gemäß Abb. 2 sind das die Existenz eines *brennbaren Stoffes, einer Zündenergie und eines Oxidationsmittels*.

Brennbare Stoffe im Maschinen- und Fahrzeugbau sind heute vordergründig die meisten Kunststoffe, die bereits bei niedrigen Temperaturen brennbare Gase freisetzen. Weiterhin ist ein Trend nach Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium oder Magnesium zu erkennen, die bedingt durch ihre chemische Zusammensetzung und das hinzukommende leichtbaubedingte „ungünstige“ Massen-Oberflächen-Verhältnis auch als Metall leicht ent-zündbar sind. Auch bei der Fertigung moderner Produkte tritt verstärkt eine Brandgefahr auf. Mo-

derne Maschinen setzen durch ihre Schmier- oder Betriebsstoffe brennbare und oft auch explosive Gase frei. Zu nennen wären ebenfalls die verstärkt verwendeten niedrigviskosen Kühlschmierstoffe (KSS), die wegen der höheren Temperaturen infolge der höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten eingesetzt werden, aber bei falscher Dosierung auch brennbare Dämpfe bilden.

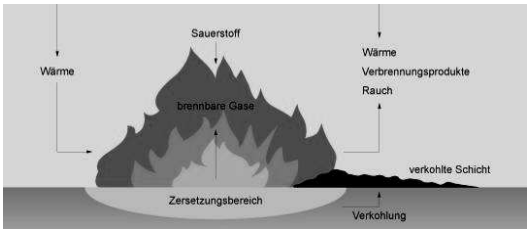


Abb. 3: Feuersystem für Kunststoffe [03]

Zündenergie steht nicht nur durch offene Flammen (Streichholz, Schweiß- oder Schneidflamme, Lötlampe), Glut (Schweißspritzer, Schleiffunken) oder Schlagfunken (Schleifen, Schmirgeln) zur Verfügung, sondern auch durch heiße Oberflächen (Motor-gehäuse, Glühlampen, Heizgeräte, überlastete elektrische Leitungen), Schaltfunken, Rei-bungswärme (z.B. in Lagern), Kompressionswärme oder chemische Reaktionsenergie.

Als **Oxidationsmittel** dient im klasssichen Sinn primär der Sauerstoff. Aber auch Kaliumnitrat, Kaliumpermanganat, Perchlorsäure, Wasserstoffperoxid oder Stickstoff-monoxide, wie sie in Nitrolacken, Kunstharzlacken, Gießharzen oder Dichtwerkstoffen vorkommen, wirken brandauslösend.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in modernen Maschinen- und Anlagen neue Werkstoffe verbunden mit neuen Fertigungstechnologien ein erhöhtes Brandrisiko erzeugen, welches durch Konstrukteure im allgemeinen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess unbedingt berücksichtigt werden muss.

2 Feuer- und brandschutzgerechtes Konstruieren in der Gesetzgebung

Am 29.12.2009 wird die alte Maschinenrichtlinie 98/37/EG durch die Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlamentes ersetzt, womit ein erweitertes einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen beim Inverkehrbringen im europäischen Handelsraum Gesetz wird. Die nationale Umsetzung der Richtlinie geschah in Deutsch-land durch die 9. Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSGV) vom 18.6.2008. Wie

bereits in der Vorgängerverordnung dürfen Maschinen nur in den Umlauf gebracht werden, wenn sie sicher sind und die von ihnen ausgehenden Risiken kleiner sind als die maximal zulässigen Risiken. Die Risiken beziehen sich auf das in der Abb. 3 dargestellte Risikosystem, wozu auch die Wärme als Wärmestrahlung durch erhitzte Bauteile und auch eine Gefährdung durch Feuer gehören.

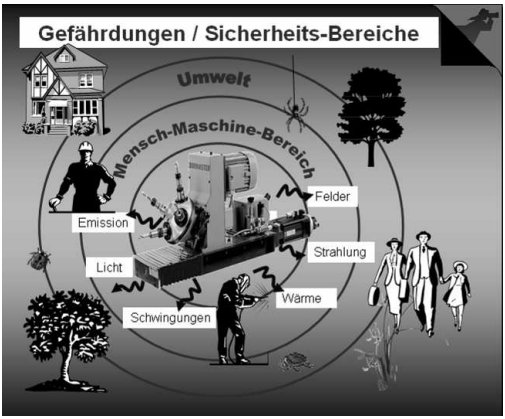


Abb. 4: Risikobereiche und –kriterien

Für die Risikobetrachtungen und Bewertungen stehen die DIN EN ISO 14121 Teil 1 (12/2007) Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung und die DIN EN ISO 12100 Teil 1 und 2 (03/2009) Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze, Risikobeurteilung und Risikominderung zur Verfügung. Neu in der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ist die Pflicht und die Forderung an die maschinenherstellenden Betriebe, mögliche Risiken, die von den hergestellten Maschinen ausgehen können, bereits bei der Auslieferung schriftlich offenzulegen. Eine Maschine darf ab Dezember nur noch ausgeliefert werden, wenn eine Risikoanalyse und Risikobeurteilung durchgeführt und dargelegt wurde. Somit besteht eine zweite Motivation, sich im Umfeld der Risikobeschreibung auch mit dem Thema Feuer- und Brandschutz im Maschinenbau auseinanderzusetzen.

3 Umsetzung einer feuer- und brandschutzgerechten Konstruktion

Nach der Europäischen Maschinenrichtlinie muss eine Maschine so konzipiert und gebaut sein, dass jegliche von der Maschine selbst oder durch Gase, Flüssigkeiten, Stäube, Dämpfe und andere freigesetzte oder verwendete Substanzen verursachte Brand- oder Überhitzungsgefahr vermieden wird. Für Konstrukteure bedeutet das in erster Linie die

Schaffung einer inhärent sicheren Konstruktion. Aktivitäten für eine bewusste feuer- und brandschutzgerechte Konstruktion sind in allen Entwicklungsphasen durchzuführen, wobei jedoch der Entwurfsphase eine besondere Bedeutung zukommt. In der Entwurfs-phase steht das Design for X im Vordergrund. Unter dem Teilprinzip „Sicherheitsgerechtes Konstruieren“ (Design to safety) sind geeignete brand- und feuerspezifische Maßnahmen vorzusehen, die im Folgenden auszugsweise beschrieben werden.

3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Risikoabschätzungen für mögliche Brandszenarien sind für die Bereiche Fertigung, Lagerung, Transport Zusammenbau, Installation, Inbetriebnahme, Betrieb, Außerbetriebnahme, Demontage und Entsorgung vorzunehmen. Konstruktiv sollten die Stichworte aus Abbildung 5 zwecks Anwendung überprüft werden.

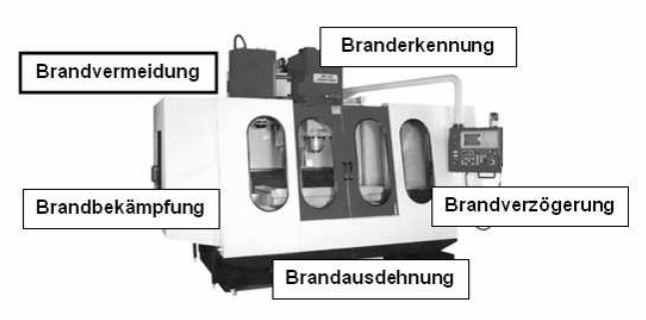


Abb. 5 Konstruktive brandschutzrelevante Maßnahmefelder

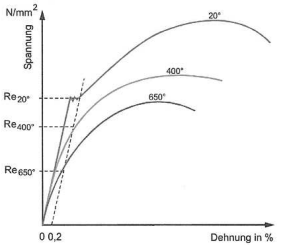
In den folgenden Punkten werden einige Details eines konstruktiven Maßnahme-kataloges aufgelistet, die allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da sich der Katalog noch im Aufbau befindet.

3.2 Konstruktive Brandvermeidung

- Feuerspezifische Werkstoffauswahl und Dimensionierung

Im Rahmen der Dimensionierung sind geeignete Werkstoffe auszuwählen. Auswahlkriterien sind Entzündbarkeit, Entflammbarkeit, Brennbarkeit, brandfördernde Wirkung, Beinflussung von Nachbarkomponenten (chem. Reaktion) oder Toxizität im Brandfall. Bei Brandgefahr sind auch die Strukturen, vor allem das Massen-Oberflächen-Verhältnis relevant. Wurden entsprechende Werkstoffe ausgewählt und ein Temperatur- und Brand-

szenarium analysiert, müssen bei der Bauteildimensionierung temperaturspezifische Werkstofffestigkeiten verwendet werden. Beispiele sind in Abb. 6 und 7 dargestellt.



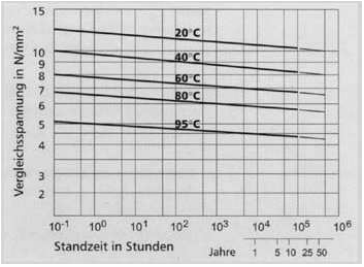


Abb. 6: Statische Werkstofffestigkeitswerte Abb. 7: Dynamische Werkstofffestigkeitswerte

Weitere Maßnahmen zur Vermeidung von Bränden sind:

Unbrennbare Materialien verwenden, definierte Anordnung der Bauteile (Zündquellen, Brandmaterial), Versorgungsleitungen außerhalb des Arbeitsraumes, Selbstentzündung vermeiden (Späne, Staub, Öldämpfe), Absaugvorrichtungen für Dämpfe, Gase,… Absaugung von Spänen bzw. deren Brikettierung, sichere Lagerung der Späne, chemische Reaktionen vermeiden (z.B. Magnesium/Luft), nebelarme Öle, Schmiermittel verwenden, emissionsarme Kühlschmierstoffe verwenden, Prozessparameter (v, T, KSS) optimieren, Werkzeugbruch vermeiden, Werkzeugkollision vermeiden, kurzschlusssichere Elektroinstallationen.

3.3 Kennzeichnung gefährdeter Bereiche (DIN 4844)

In der Ausarbeitungs- und Dokumentationsphase sind alle erforderlichen Kennzeichnungen vorzunehmen. Von links nach rechts sind dargestellt: Telefon, Feuerlöscher, Löschschlauch, Leiter, Fluchtwege, feuergefährliche Stoffe, leicht entflammbar, selbst entflammbar, feuerfördernde Stoffe, explosionsgefährdete Stoffe, Feuer-, Rauchverbot.

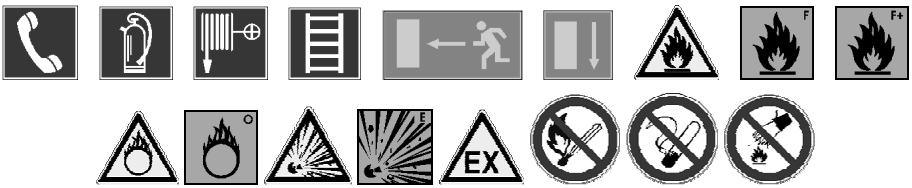


Abb. 8: Warn- und Hinweisschilder für Maschinen und Anlagen

Im Rahmen einer Risikobewertung sollten auch verwendete Werkstoffe eingruppiert werden. Nach DIN EN 2 stehen die folgenden Klassen zur Verfügung

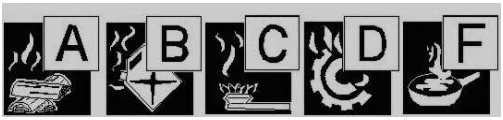


Abb. 9: Brandklassen

Für Maschinen- und Anlagen sind die Klasse B (brennbare Flüssigkeiten), C (brennbare Gase) und D (brennbare Metalle) interessant. Die Klasse A (natürliche Brennstoffe) kann in Bezug auf Versand- und Packmaterial (Holz, Holzwolle, Papier, Pappe) angewendet werden.

3.4 Konstruktive Branderkennung

Für die Erkennung und Entdeckung von Bränden ist der Einsatz von Wärmesensoren, Feuersensoren, Brandmeldern (akustisch, optisch) oder Sichtfenstern vorzusehen.

3.5 Konstruktive Brandverzögerung

Eine Verzögerung des Brandes gelingt durch die Verwendung von brandhemmenden Materialien (Anstriche, Beschichtungen) mit einem Feuerwiderstand F30 bis F180, einer Reduzierung der Sauerstoffzufuhr oder einer Wärmeisolierung des Arbeitsraumes.

3.6 Konstruktive Verhinderung der Brandausdehnung

Verwendung flammendurchschlagsicherer Gehäuse, Rauchdichtigkeit der Anlage, konstruierte Brandabschnitte, Schotte, Sicherheitsklappen, Tragfähigkeit für erlaubte Brandzeit, automatisches Versperren von Versorgungs-, Entsorgungsleitungen, Revisionstüren, Wartungsklappen verhindern eine Brandausdehnung.

3.7 Konstruktive Brandbekämpfung

Automatische Notabschaltung (Antrieb, Betriebsmittel,…), Verriegelung, Blockierung von Türen, Klappen,….aufschäumende Brandschutzfarbe verwenden, Hochtemperaturisolierungen, keramische Brandschutzmassen, keramisierende Elastomere, Unterbindung der Sauerstoffzufuhr, Feuerlöschanlage (Sprinkler, Düse,…) für entsprechende Brandklasse

4 Zusammenfassung

Die vorgestellten Maßnahmen für eine feuer- und brandschutzgerechte Konstruktion stellen erst einen Anfang für einen möglichen Konstruktionskatalog dar. Gerade im Bereich der temperaturabhängigen Werkstofffestigkeitswerte gibt es noch einen erheb-lichen

Nachholbedarf, bis dementsprechende Werte in einem Standardkatalog abgerufen werden können.

Literatur

[1] Klenz,F., Glüder,R., Schnegas, H.: *Erarbeitung eines Konstruktionskataloges für Brandschutz- maßnahmen im Maschinen- und Anlagenbau.* Projekt C: Hochschule Wismar, 2009

[2] Jawinski, S., Höcker, C., Schnegas, H.: *Untersuchung thermischer Spannungen auf das Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe.* Projekt C:Hochschule Wismar, 2009

Simulation zur Unterstützung der Produktentwicklung von Beveloidverzahnungen

Prof. Christian Brecher, Tobias Röthlingshöfer, Christof Gorgels

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen
Steinbachstraße 19, D-52074 Aachen
Email: T.Roethlingshoefer@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

Inhalt: *Beveloidverzahnungen, auch als Beveloid, Konusverzahnungen, konische Verzahnungen oder kegelige Verzahnungen bezeichnet, gewinnen in der industriellen Praxis immer mehr an Bedeutung. Dabei werden Beveloids in Schiffsgetrieben und spielarmen Robotergetrieben bereits seit längerem eingesetzt, erhalten aber auch seitens der Automobilindustrie ein verstärktes Interesse. Diese basieren auf zylindrischen Verzahnungen, haben aber eine veränderliche Profilverschiebung über der Zahnbreite.*

Obwohl es sich bei konischen Verzahnungen um ein nicht ganz junges Bauteil handelt, ihre Vorzüge wurden bereits 1954 von A. S. Beam aufgezeigt, sind bisher kaum Erfahrungen bezüglich der Analyse des Laufverhaltens vorhanden.

Deshalb werden am WZL die vorhandenen Werkzeuge zur Beurteilung des Einsatzverhaltens durch eine Herstellsimulation von Beveloiden und eine sich anschließende allgemeine Zahnkontaktanalyse ergänzt. Mit der Herstellsimulation werden zunächst die resultierenden Geometrien errechnet und deren Einsatzverhalten anschließend in der Zahnkontaktanalyse ermittelt. Diese Werkzeuge können also bereits in der Produktentwicklung zur Modellierung der Beveloidverzahnungen und zur Simulation des Einsatzverhaltens verwendet werden. Der vorliegende Bericht beschreibt die Herstellsimulation sowie die lastfreie Zahnkontaktanalyse und die FE-basierte Zahnkontaktanalyse unter Last von Beveloidverzahnungen. Diese Simulationswerkzeuge dienen der Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses von Beveloidverzahnungen.

Abstract: *Beveloid gears, also known as conical involute gears, gain more and more importance in industrial practice. They are based on cylindrical gears but have a variable addendum modification along their tooth width. For marine transmissions beveloids are already deployed for a longer period, but there is a growing interest in this type of gears on the part of the automobile industry. Even though that beveloid gears are not a very young machine element, their advantages have already been shown by A. S. Beam in 1954, the behaviour of beveloid gears is not as well understood as the behaviour of spur or bevel gears.*

Therefore at the WZL the existing tools for the evaluation of beveloid gear behaviour are supplemented by a simulation of the continuous generating grinding of beveloid gears and a general tooth contact analysis. The manufacturing simulation calculates the resulting geometry which can be used in the tooth contact analysis to determine the running behaviour. Thus an evaluation of beveloid gearing by taking the finishing process into account shall become possible. This paper shows the manufacturing simulation, the load free tooth con-

tact analysis software and a FE-based loaded tooth contact analysis for beveloid gears. These simulation tools assist in the product development process of beveloid gears.

Stichwörter: *Konisches Stirnrad, Beveloid, Einsatzverhalten, Herstellsimulation, Zahnkontaktanalyse*

Keywords: *Conical Gears, Beveloid Gears, Rolling Behaviour, Tooth Contact Analysis, Manufacturing Simulation*

1 Einleitung

Beveloidverzahnungen basieren auf zylindrischen Verzahnungen, haben aber eine variable Profilverschiebung über der Zahnbreite [1, 2]. Diese Änderung der Profilverschiebung erfolgt linear und kann somit über einen Profilverschiebungswinkel θ beschrieben werden. Daraus resultiert auch die charakteristische kegelige Form, aufgrund derer dieser Verzahnung den Namen „Beveloid“ („beveloid gear“) erhalten hat. Mögliche Paarungen mit Beveloidrädern, wie Roth [2] sie darstellt, sind links in Bild 1 aufgelistet.

Diese Kombinationen werden für die unterschiedlichsten technischen Problemstellungen eingesetzt [3, 4, 5]. So werden mit sich schneidenden Achsen beispielsweise die Propellerwellen von Schiffsmotoren unter die Wasseroberfläche gelenkt oder in Allrad getriebenen Automobilen das Antriebsmoment abgegriffen. Für diese Achsanordnung kann ein Beveloid mit einem zylindrischen Stirnrad gepaart werden. Eine solche Anordnung wird später im Bericht noch näher betrachtet. Bei parallelen Achsen wiederum bieten Beveloids die Möglichkeit durch axiale Verschiebung das Flankenspiel zu minimieren. Dies wird beispielsweise bei der Auslegung spielarmer Robotergetriebe genutzt.

In der Literatur zeigt sich, dass eine Berechnung von Tragbild und Drehwegabweichung lastfrei und unter Last sowie des Ease-Offs, der Pressungen und der Zahnfußspannungen unter Berücksichtigung der herrschenden Räderanordnung, Mehrfacheingriff und der tatsächlichen Flankengeometrie konischer Stirnräder mit Modifikationen in diesem Umfang noch nicht durchgeführt wurde. Es ist anzustreben, das rechts in Bild 1 abgebildete Vorgehen für Beveloidverzahnungen umzusetzen. Mittels einer Herstellsimulation wird die Geometrie der Verzahnung erzeugt. Diese wird dann in einer Zahnkontaktanalyse lastfrei und unter Last abgewälzt und analysiert. Anschließend werden die Ergebnisse numerisch und in verzahnungstypischen Diagrammen dargestellt. Dieses Simulationsvorgehen unterstützt somit den Produktentwicklungsprozess von Beveloidverzahnungen.

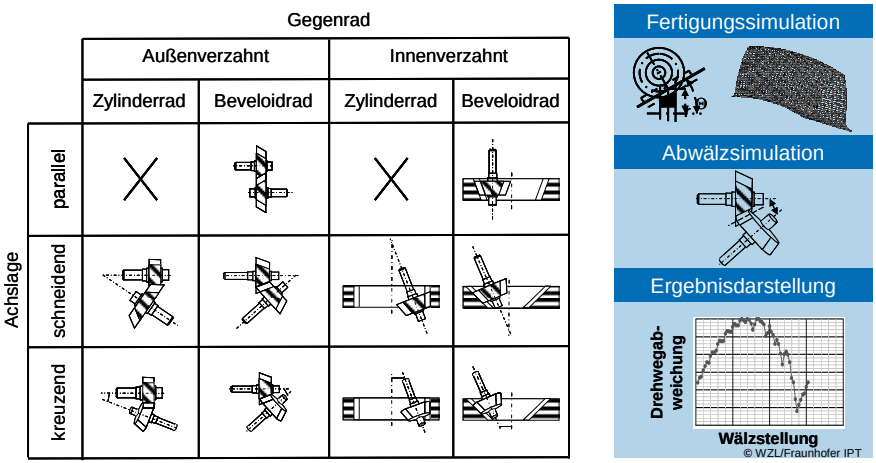


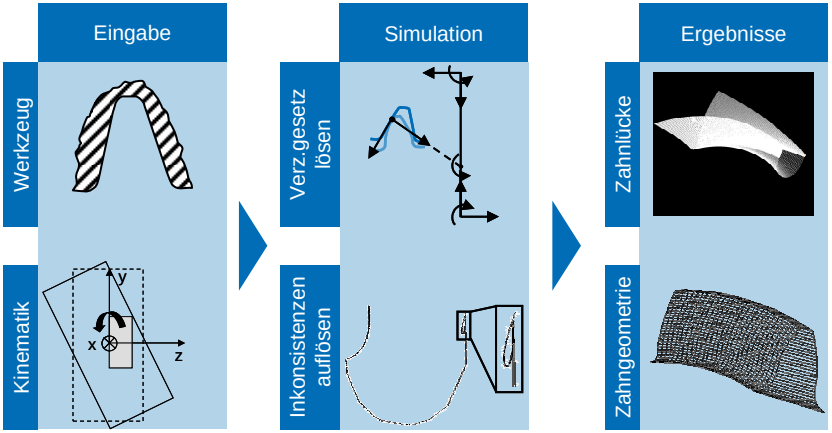
Bild 1: Einsatzmöglichkeiten von Beveloidverzahnungen [2] und notwendiges Simulationsvorgehen

2 Herstellsimulation

Bei der Simulation der Herstellung von Beveloidverzahnungen sind ausschließlich wälzende Verfahren zu berücksichtigen, da nur diese zur Fertigung konischer Stirnräder geeignet sind [2]. Die Geometrieerzeugung erfolgt durch die Simulation des Abwälzvorganges des Werkzeuges relativ zum Werkstück auf Grundlage des Verzahnungsgesetzes. Damit ein Werkzeugpunkt einen Werkstückpunkt fertigt, muss die Erzeugungsbedingung in der Gleichung 1, welche auf dem allgemeinen Verzahnungsgesetz basiert, erfüllt sein [6].

$$f(t) = \vec{N} \cdot \vec{v}_{rel} = 0 \tag{1}$$

Es wird der in Bild 2 dargestellte Simulationsablauf realisiert. Als Eingabe sind die Werkzeuggeometrie und die Relativbewegung von Werkstück zu Werkzeug notwendig. Damit ist nun die Erstellung einer kompletten Beveloidlücke inklusive Zahnfußgeometrie möglich. Die so generierte Geometrie eignet sich vor allem auch für eine Abwälzsimulation mittels einer Zahnkontaktanalyse.



© WZL/Fraunhofer IPT

Bild 2: Resultierender Simulationsablauf für die Herstellsimulation

Um die Kinematik korrekt vorgeben zu können, müssen die einzelnen Achsbewegungen einer Wälzschleifmaschine nachgebildet werden. Für die Positionierung des Werkstücks sind hierbei teilweise Zusatzbewegungen notwendig. Während der Simulation kann es im Bereich starker Profilverschiebungen bei schrägverzahnten Beveloids zu Inkonsistenzen in der erzeugten Geometrie kommen (Bild 2, Mitte). So werden Punkte als Werkstückpunkte erkannt, welche nicht zur Geometrie gehören können. Es kommt zur Schleifenbildung. Diese Schleifenbildung ist darauf zurückzuführen, dass die betroffenen Werkstückpunkte zwar tatsächlich gebildet werden, in einem nächsten Schritt von der nachfolgenden Schneidkante aber wieder abgenommen werden würden. Dieser Prozess lässt sich mit der Erzeugungsbedingung nicht abbilden. Die betroffenen Punkte müssen daher in einem nachgelagerten Schritt erkannt und aussortiert werden. Das gesamte Vorgehen zur Herstellsimulation wird in [7] eingehend beschrieben.

3 Lastfreie Zahnkontaktanalyse von Beveloidverzahnungen

Die Durchführung einer Zahnkontaktanalyse mit Beveloidverzahnungen stellt aus unterschiedlichen Gründen eine Herausforderung dar. Zum einen ist die Lage der Achsen zueinander sehr frei konfigurierbar, zum anderen soll in einer solchen Simulation die tatsächlich gefertigte Geometrie, aus Messung oder Herstellsimulation, berücksichtigt werden. Dadurch ergibt sich das Problem, dass der Kontakt zwischen den Wälzpartnern an den

unterschiedlichsten Stellen auftreten kann. Da die idealen Wälzpartner einer solch freien Konfiguration allgemein als Rotationshyperboloiden anzusehen sind, ist bei der Verwendung von evolventischen Beveloiden in dem Kontakt nicht grundsätzlich von Linienkontakt auszugehen. So zeigt Roth, wie sich mathematisch zumeist nur Punktkontakt ergibt [2]. Sowohl Mitome als auch Liu beschreiben, wie sich aus diesem einzelnen Kontaktpunkt eine Kontaktellipse ausprägt [8, 9]. Es ist somit von einem Flächenkontakt auszugehen. Deshalb wird hier ein Flächenkontaktmodell gewählt, wie es Hemmelmann beschreibt [10]. Dieses wird im Simulationssystem „ZaKo3D“, welches seit einigen Jahren am WZL entwickelt wird, umgesetzt. Die Ein- und Ausgabegrößen von ZaKo3D sind in Bild 3 aufgelistet.

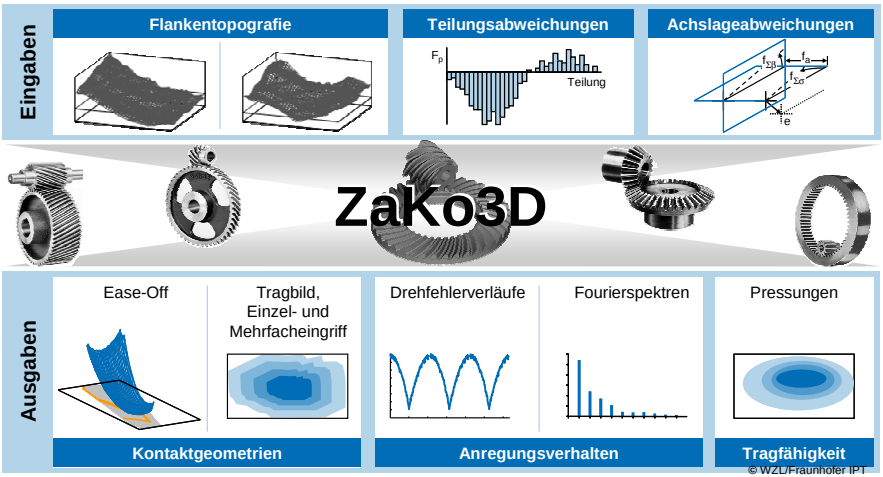


Bild 3: Leistungsumfang der Zahnkontaktanalysesoftware ZaKo3D

Bisher wurde es hauptsächlich für Kegel- und Stirnradverzahnungen eingesetzt, aber auch für Beveloidräder hat es lastfrei bereits Anwendung gefunden [7]. Für diese Kontaktanalyse sind die Zahngeometrien von wenigstens einem Zahn je Rad in Form einer Punktwolke und die Anordnung der Räder vorzugeben. Dabei kann die Geometrie eine beliebige Form haben und z.B. aus Messdaten importiert werden. Diesen Daten können sowohl Teilungs- als auch Achslageabweichungen aufgeprägt werden. Nach dem Abwälzen können der Ease-Off, das Tragbild für Mehrfach- und Einzeleingriff sowie der Drehfehler ausgegeben werden. Die Ausgabe des Fourierspektrums wird aktuell erarbeitet und in die Benutzeroberfläche eingefügt. Prinzipiell ist auch heute schon eine Berechnung unter Last möglich,

welche sowohl den Drehfehler und das Tragbild unter Last als auch die Pressungen als Ausgabegrößen hat [10].

Um die Ergebnisse der lastfreien Zahnkontaktanalyse bewerten zu können, wurden Simulationsergebnisse mit den Tragbildern einer real durchgeführten Einflankenwälzprüfung verglichen. Für die Berechnungen sind die Räder topografisch vermessen worden. Je Rad wird die Messung eines Zahnes für die Simulation verwendet. Die Grunddaten der Paarungen Beveloidrad/ zylindrisches Stirnrad sind links in Bild 4 aufgeführt. In Bild 4 ist außerdem der Vergleich zwischen den simulierten und den im Versuch aufgenommenen Tragbildern an der Zugseite der einen Variante dargestellt.

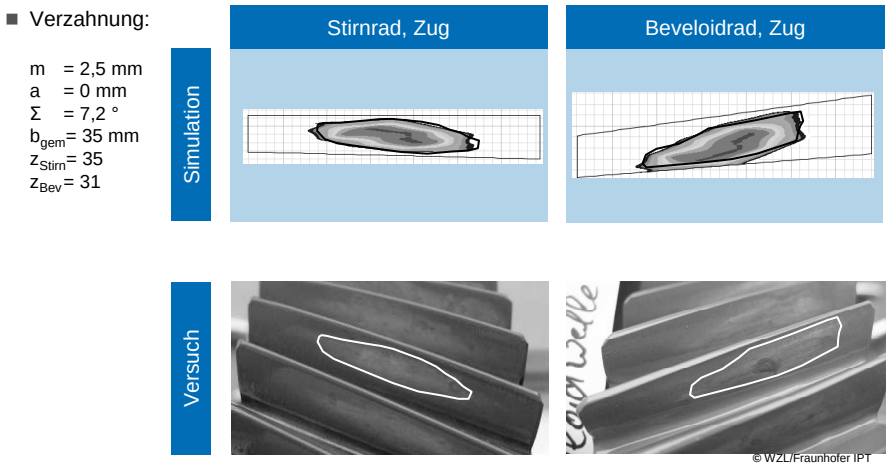


Bild 4: Vergleich von Versuchstragbildern mit simulierten Tragbildern

Das Stirnrad weist eine Flankenhohlballigkeit c_β, ein Profilballigkeit c_α sowie eine Flankenwinkelabweichung $f_{H\beta}$ auf. Das Beveloid hat eine Flankenhohlballigkeit c_β sowie eine Profilballigkeit c_α. Für den Vergleich der Tragbilder werden diese in der Simulation mittels Durchwälzen eines Zahnes unter Berücksichtigung der benachbarten Zähne, also im Mehrfacheingriff, erstellt. Dabei wurde in der Simulation eine Tuschierpastendicke von 6 µm gewählt. Die Bereiche der Tragbilder auf den Fotos wurden jeweils mit einem weißen Rahmen kenntlich gemacht. Um einen Vergleich der Tragbilder durchzuführen, wurden diese Rahmen über die Tragbilder aus ZaKo3D gelegt.

Es ist eine gute Übereinstimmung der Form des Tragbildes zwischen Simulation und Versuch festzustellen. In den Randbereichen kommt es zu leichten Abweichungen in der

Ausdehnung des Tragbildes. Diese sind darauf zurückzuführen, dass zum einen c_{β}, c_{α}, $f_{H\beta}$, und $f_{H\alpha}$ an jedem Zahn leicht unterschiedliche Werte aufweisen und das Tragbild nur an einem Zahn dargestellt wird. Zum anderen geht die Tragbildberechnung von einer konstanten Tuschierpastendicke aus. Im Versuch ist hier mit leichten Schwankungen über der Zahnbreite zu rechnen, da die Tuschierpaste manuell aufgetragen wird.

4 Zahnkontaktanalyse unter Last von Beveloidverzahnungen

Nach der lastfreien Zahnkontaktanalyse ist eine Analyse unter Last notwendig, um das Einsatzverhalten von Beveloidradpaarungen umfassend zu beschreiben. Das Vorgehen aus ZaKo3D in Anlehnung an Hemmelmann [10] ist in Bild 5 dargestellt.

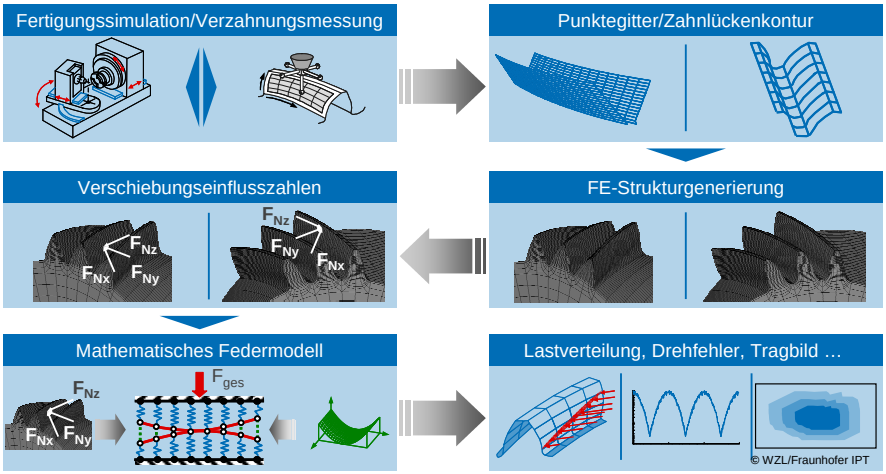


Bild 5: Vorgehensweise in der 3D-Zahnkontaktanalyse unter Last

Wie bei der lastfreien Analyse beinhalten die Eingabeparameter die Geometrien und die Radanordnung. Allerdings muss hier für die Vernetzung ein Zahnfuß vorhanden sein. Wenn eine Herstellsimulation verwendet wird, ist dieser direkt mit zu generieren. Bei Messdaten ist dieser zumeist nicht enthalten. Er muss separat erzeugt werden. Ohne diesen ist eine Vernetzung und anschließende Analyse der Verzahnung nicht möglich. Für die Vernetzung kann der WZL-eigene Strukturgenerator für Zahnräder verwendet werden. Es sind dabei 8-knotige Hexaederelemente zu verwenden. Diese Elemente eignen sich besonders für die Kontaktsuche im Flächenkontaktmodell. Nach der Erzeugung der Netze werden die Verschiebungseinflusszahlen mittels Einheitskräften ermittelt. Diese Einfluss-

zahlen finden dann Anwendung im Federkontaktmodell nach Neupert [11], welches für die Zahnkontaktanalyse unter Last verwendet wird. Die Ergebnisse können dann zur Bewertung des Einsatzverhaltens unter Last verwendet werden.

Literatur

[1] Beam, Albert S.: *Beveloid gearing*. Pittsburgh, Pa: Paper 2011, AGMA, 1954

[2] Roth, Karlheinz: Zahnradtechnik - Evolventen-Sonderverzahnungen zur Getriebeverbesserung. Berlin: Springer, 1998. – ISBN 3-540-64236-6

[3] Alxneit, Heiko; Binz, Hansgeorg: *Simulationswerkzeuge für die Optimierung von Beveloidverzahnungen.* 5. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2007, Dresden: 20./21. September 2007.

[4] Börner, Jörg; Humm, Klemens; Joachim, Franz J.: *Development of Conical Involute Gears (Beveloids) for Vehicle Transmission.* Gear Technology 2005 Vol. 22, Nr.6, S.28-35.

[5] Winkler, Torsten: Untersuchung zur Belastbarkeit hohlkorrigierter Beveloidgetriebe für Schiffsgetriebe mittlerer Leistung. Dissertation Stuttgart, 2002. – ISBN 3-922-823-54-8

[6] Litvin, Faydor L.: *Gear Geometry and Applied Theory*. Engelwood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1994. – ISBN 0-13-211095-4

[7] Brecher, Christian; Röthlingshöfer, Tobias; Gorgels, Christof: *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

[8] Mitome, Ken-ichi: *Conical Involute Gear. Part 3. Tooth Action of a Pair of Gears.* Bulletin of JSME, Vol. 28, No.245, November 1985, S. 2757 - S. 2764, Paper 245-36

[9] Liu, Chia-Chang; Tsay, Chung-Biau: *Mathematical Models and Contact Simulations of Concave Beveloid Gears.* Journal of Mechanical Design, Vol. 124, Dezember 2002, S.753 - S.760

[10] Hemmelann, Jan Erich: Simulation des lastfreien und belasteten Zahneingriffs zur Analyse der Drehübertragung von Zahnradgetrieben. Dissertation, RWTH-Aachen, 2007. – ISBN 978-3-8322-6837-4

[11] Neupert, Bernd.: Berechnung der Zahnkräfte, Pressungen und Spannungen von Stirn- und Kegelgetrieben. Dissertation, RWTH-Aachen, 1983. – ISBN 3-18-140401-2

Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse

Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht , Dr.-Ing. Tobias Schulze,
Dipl.-Ing. Christian Hartmann-Gerlach

DriveConcepts GmbH
Wettiner Platz 10, 01067 Dresden
eMail: tobias.schulze@driveconcepts.com; Internet: http://www.driveconcepts.com

Inhalt: *Die Berechnung von Verzahnungen insbesondere von Planentenradgetrieben kann nur unter dem Einfluss des gesamten Antriebsstranges und der Betrachtung eines jeden beteiligten Maschinenelementes durchgeführt werden. Für diesen Fall ist das Zahnrad mehr als nur das reine Maschinenelement. Alle relevanten Interaktionen zwischen den Maschinenelementen müssen unter realen Verhältnissen betrachtet werden. Die standardisierten Berechnungen zielen dabei auf eine sichere Dimensionierung von Maschinenelementen bei Kenntnis der realistischen Lastverhältnisse ab. Diese bewährten Methoden müssen jedoch für eine effiziente Leistungssteigerung durch weiterführende Berechnungen der Lastverteilung, Zahnflankenpressung, Zahnfußspannung, Eingriffsverhältnisse und Zahnkontakttemperatur erweitert und vertieft werden.*

Abstract: *The calculation of gears especially planetary gears can just be carried out by the consideration of influences of the whole drive train and the analysis of all relevant machine elements. In this case the gear is more than the sum of its machine elements. Relevant interactions need to be considered under real conditions. The standardized calculations are decisive for the safe dimensioning of the machine elements with the consideration of realistic load assumptions. But they need to be completed by extended analysis of load distribution, flank pressure, root stress, transmission error and contact temperature.*

1 Einleitung

Die Berechnung der Lastverteilung sowie die Bestimmung der notwendigen Verzahnungsmodifikationen gehören während des Auslegungsprozesses hoch beanspruchter Verzahnungen zu den wesentlichen Aufgaben. Die Notwendigkeit dieser komplexen Berechnung wird dabei meist erst nach der Bewertung von Verzahnungsschäden und Ausfällen ganzer Zahnräder erkannt. Obwohl für die Berechnung von Stirnzahnrädern schon eine große Anzahl von standardisierten Berechnungsvorschriften vorliegen (DIN 3990, ISO 6336 /3,7/), ist eine leistungsfähige Spezialsoftware unerlässlich um den Zusammenhang zwischen Kraft und Verformung für jeden Punkt des Eingriffsfeldes in die Berechnung ein-

fließen lassen zu können. Der Grund für diese genauere Betrachtung liegt in der vorhandenen Abweichung der Zahnflanken und dem Einfluss des Umfeldes von Stirn- und Planetenrädern. Meist sind die Flanken in Höhen- und Breitenrichtung modifiziert. Durch diese Modifikationen versucht man die lastabhängigen Verformungen der Verzahnung und des Umfeldes der Verzahnung sowie Verzahnungsfehler, Lageabweichung der Gehäusebohrungen und Lagerspiel auszugleichen.

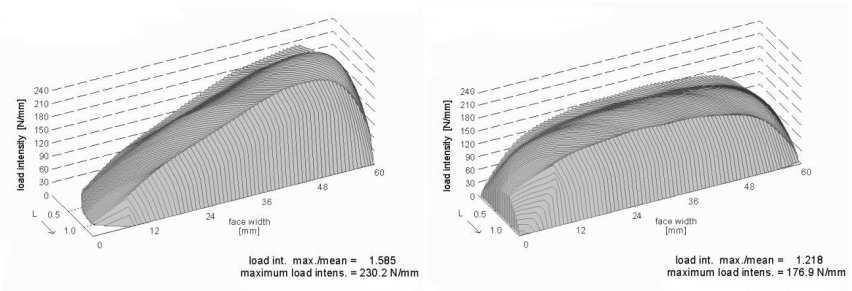


Abbildung 1: Schlechte / gute Lastverteilung auf der Zahnradflanke

Die Berechnung der Lastverteilung in Planetengetriebestufen zeichnet sich durch eine wesentlich aufwändige Bestimmung der Verformungen im Vergleich zu einfachen Stirnradstufen aus. Verformungen der Zahnradkörper sowie die Anschlusskonstruktion und des Planetenträgers können nicht auf analytischem Wege berechnet werden. Sie müssen durch FE-Berechnungen bestimmt werden. Im Programm MDESIGN® LVR^{planet} sind alle notwendigen Berechnungen zur Lastverteilung in Planetengetrieben vereint. Darüber hinaus gibt das Programm Modifikationsvorschläge für eine ausgeglichene Lastverteilung Abbildung 1.

Um all diese Berechnungsaufgaben in einer effizienten Art und Weise zu lösen, ist es notwendig eine entsprechende Berechnungssoftware zu installieren. Die Reduzierung der Eingabeparameter auf ein Minimum sowie der sichere Datenaustausch zwischen den einzelnen Berechnungsmodulen erleichtern die Arbeit des Anwenders wesentlich. Im Hintergrund wird die Berechnungsaufgabe effizient durch wissenschaftlich fundamentierte Berechnungskerne gelöst und in einer einheitlichen Oberfläche visualisiert. Mit der Verwendung dieser Software schon zu einem frühen Zeitpunkt des PEP gewinnt man sichere Aussagen über das fertige Produkt ohne den Bau von Prototypen. Die Berechnung kann dabei die Messkampagnen nicht ersetzen, jedoch die Anzahl an Testläufe durch unnötige Iterationsschleifen maßgeblich verkleinern. /10,11,12,13,14,15/.

2 Anwendung bei großen Getrieben

Die hier betrachtenden Getriebe finden Anwendung im Schwer- und Sondermaschinenbau sowie in Windenergieanlagen, Abbildung 2. All diese Einsatzgebiete zeichnen sich durch schwankende Lasten, unsichere Randbedingungen und teilweise erhebliche kurzzeitige Lastspitzen aus. Während bei Windturbinen der Wind als dynamische Unbekannte die größte Lastunsicherheit darstellt, ist es bei Zementmühlen das Mahlgut, Abbildung 3.

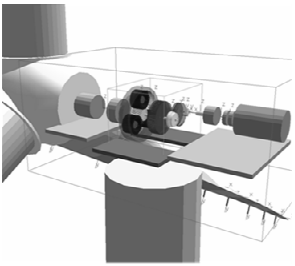


Abbildung 2: Anwendung – Windenergieanlage

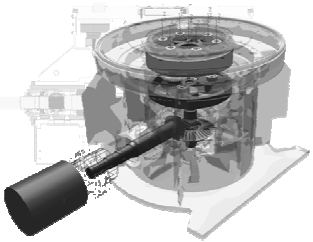


Abbildung 3: Anwendung – Zementmühle

Ein weiteres typisches Anwendungsgebiet sind Brückenkrane mit ihren zyklischen Belastungen – hier am Beispiel eines Gießereikranes zur Beförderung feuerflüssiger Massen, Abbildung 4.

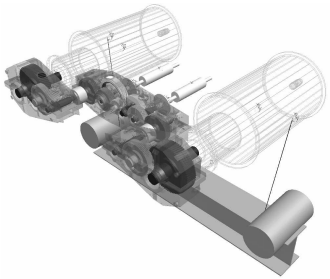


Abbildung 4: Anwendung – Gießkran

All die genannten Einsatzfälle stellen hohe Anforderungen an die Auslegung, Optimierung und Nachrechnung der Antriebsstränge und der Getriebe im Besonderen.

3 Grundlagen der Lastverteilung

Die Belastungsverhältnisse im Zahneingriff werden bestimmt durch die Aufteilung der Belastung auf Zahnpaare ($\varepsilon_\alpha > 1$: Stirnlastverteilung $K_{H\alpha}$, $K_{F\alpha}$) und der Verteilung in Zahnbrei-

tenrichtung (Breitenlastverteilung $K_{H\beta}$, $K_{F\beta}$). Die Methodik der Lastverteilungsrechnung basiert auf der Verwendung von Verformungseinflusszahlen, Abbildung 5.

Bei der Einflusszahlenmethode bilden die Verformungseinflusszahlen a_{ik} die Grundlage für die Lastverteilungsberechnung. Die Einflusszahl a_{ik} ist der Betrag der Verformung am Abschnitt i, der sich bei einem Kraftangriff an Abschnitt k ergibt, bezogen auf die am k-ten Abschnitt wirkende Einzelkraft. Es gilt dabei $a_{ik} = a_{ki}$.

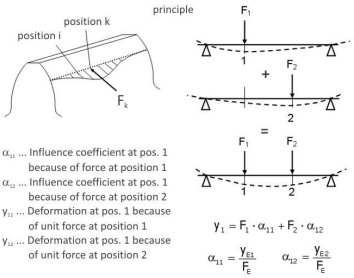


Abbildung 5: Prinzip der Verformungseinflusszahlen

Der Lösungsalgorithmus unter Verwendung von Verformungseinflusszahlen stellt insgesamt den effektivsten Berechnungsverlauf zur Ermittlung der Lastverteilung dar. Die Güte der Lastverteilungsberechnung hängt jedoch von der Anzahl der Normalschnitte und der Genauigkeit der Einflusszahlen ab.

4 Modifizierung der Zahnradflanke

Allgemein kann der Weg zu Modifizierung der Zahnradflanken in den folgenden 3 Schritten durchgeführt werden:

1. Die lastabhängigen Verformungen sind durch konstruktive Maßnahmen gering zu halten bzw. so zu beeinflussen, dass sie sich zumindest teilweise gegenseitig aufheben.

2. Der verbleibende, linear veränderliche Anteil der Kontaktlinienabweichung aus den belastungsabhängigen, thermischen und fliehkraftbedingten Verformungen ist durch eine Flankenlinien-Winkelkorrektur (Schrägungswinkelkorrektur) oder bei Stirnradpaarungen durch Einstellung z. B. mit Exzenterbuchsen an den Lagerungen oder Änderung des Lagerspiels auszugleichen.

3. Die um den Erwartungswert 0 schwankende Kontaktlinienabweichung durch die fertigungsbedingten Abweichungen der Verzahnung, die Abweichungen durch Taumeln der Räder und sonstige Belastungsüberhöhungen an den Stirnseiten sind durch eine zusätzliche Balligkeit (auch nicht kreisförmig) gering zu halten. Der verbleibende Teil der Taumelabweichung stellt schließlich das theoretische Minimum der wirksamen Abweichungen dar.

5 Berechnung von Planetenstufen

Der Vorteil von Planetengetrieben liegt in der Verteilung der Leistung auf die einzelnen Planeten. Dadurch ist eine sehr hohe Leistungsdichte erreichbar. Durch Fertigungsabweichungen besteht das Problem der Lastaufteilung auf die einzelnen Planeten, welche durch den Lastaufteilungsfaktor K_γ gekennzeichnet wird. Neben dem Problem der Lastaufteilung auf die Planeten besteht wie in der Einleitung angesprochen das Problem der Breitenlastverteilung. Die Berechnung der Breitenlastverteilung in einem Planetengetriebe ist im Wesentlichen von dem sich einstellenden Klaffmaß (FLKM) zwischen den Flanken der im Kontakt befindlichen Radpaare abhängig. Dabei handelt es sich um eine Summe von verschiedenen Einflüssen. Geht man davon aus, dass sich diese Einflüsse unabhängig voneinander überlagern, kann das Gesamtklaffmaß aus der Summe der Einzelabweichungen berechnet werden. Die Ermittlung der einzelnen Verlagerungen und Verformungen aller relevanten Getriebebauteile - insbesondere des Planetenträgers, der Hohlradanbindung und der Radkörper sowie der Verzahnungen - gestaltet sich bei Planetengetriebestufen komplexer als bei den Stirnradgetrieben.

Abbildung 6: Beispiele von Planetenstufen

Für die Lastverteilungsrechnung wird das Zahnflankenklaffmaß im Zahnkontakt Sonne/Planet und Planet/Hohlrad durch das Programm MDESIGN® LVR^{planet} berechnet. Als Ergebnis erhält man eine Überhöhung der Linienlast, die durch den Breitenlastverteilungsfaktor $K_{H\beta}$ angegeben werden kann. Prinzipiell lässt sich der Zusammenhang feststellen,

dass sich die Lastüberhöhung der Lastverteilung auf der Seite befindet, die der Seite mit dem Klaffen der Flanken gegenüberliegt. Über die Berechnung des Breitenlastverteilungsfaktors hinaus, liefert die Software wesentlich detailliertere Aussage zur Verteilung von Zahnflankenpressung und Zahnfußspannung. Weiterhin verfügt das Programm über eine datenbankbasierte Projektverwaltung zum Speichern bereits berechneter Projekte, Standardbeispiele und weiterer Berechnungsvorlagen. Nach Eingabe aller relevanten Parameter werden zunächst Prüfungsroutinen durchgeführt, die Geometriemodelle erzeugt und FE-Modelle für die Räder samt Anschlusskonstruktion und den Planetenträger abgeleitet. In Abbildung 7 sind einige Konstruktionsvarianten für Planetenträger dargestellt /5/.

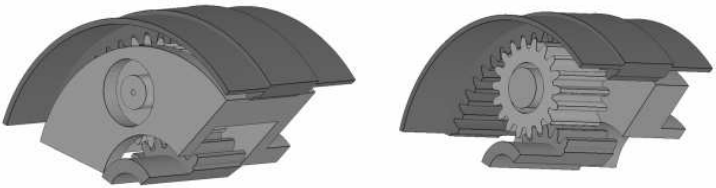


Abbildung 7: Konstruktionsvarianten des Planetenträgers

Um all die gezeigten Berechnungsaufgaben effizient und ingenieurtechnisch lösen zu können, ist es sinnvoll und notwendig Berechnungssoftware einzusetzen. Dabei ist ein hoher Grad an Verknüpfung zwischen den einzelnen Berechnungsmodulen unerlässlich, um die notwendigen Eingaben auf ein Minimum zu beschränken. Diesen Anforderungen verpflichtet, entwickelt DriveConcepts GmbH Softwarelösungen für die Antriebstechnik die sich durch eine klare und intuitive Oberfläche auszeichnen. Dies ermöglicht einen schnellen und sicheren Entwurf, Auslegung und Nachrechnung des Getriebes vor allem im Hinblick auf die Verzahnungen.

Literatur

[1] Börner, J. Senf, M.: Verzahnungsbeanspruchung im Eingriffsfeld – effektiv berechnet. Antriebstechnik 1, 1995

[2] Börner, J.: Very efficient calculation of the load distribution on external gear sets – the method and application of the program LVR. International ASME Conference, San Diego, 1996

[3] DIN 3990 Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, 1987

[4] Hartmann-Gerlach: Erstellung eines Berechnungskerns für die Software MDESIGN LVR^{planet}. Unveröff. Belegarbeit, TU Dresden 2007

[5] Hartmann-Gerlach: Verformungsanalyse von Planetenträgern unter Verwendung der Finiten Elemente Methode. Unveröff. Belegarbeit, TU Dresden 2008

[6] Hohrein; Senf: Reibungs-, Schmierungs-, Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an Zahnradgetrieben. Forschungsbericht TU Dresden, 1977

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

[8] Linke, H.: Beitrag zur Ermittlung der Zahnflanken- und Zahnfußtragfähigkeit unter Berücksichtigung der Abweichungen geometrischer Größen, Deformation der Getriebeteile und der Werkstoffkennwerte. Habilitationsschrift TU Dresden, 1978

[9] Linke, H.: Stirnradverzahnung – Berechnung, Werkstoffe, Fertigung. München, Wien : Hanser, 1996

[10] MDESIGN LVR: Berechnung der Beanspruchungsverteilung an evolventischen Verzahnungen. DriveConcepts GmbH, 2009

[11] MDESIGN LVR^{planet}: Berechnung der Beanspruchungsverteilung in Planetengetrieben, DriveConcepts GmbH, 2009

[12] Schlecht, B.; Senf, M.; Schulze, T.: Beanspruchungsanalyse bei Stirnradgetrieben und Planetengetrieben. Antriebsstränge in Windenergieanlagen - Haus der Technik e.V., Essen, 11. – 12. März 2009

[13] Schlecht, B.; Schulze, T.; Hartmann-Gerlach, C.: Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse - Zeitschriftenbeitrag Konstruktion 06/2009 S12.ff, DriveConcepts GmbH, 2009

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

[15] Schulze, T.; Schlecht, B.; Hartmann-Gerlach, C.: Effiziente Getriebeentwicklung von der Auslegung bis zur Lastverteilungsberechnung mit MDESIGN gearbox und MDESIGN LVR^{planet} - SIMPEP FVA Kongress zur Simulation im Produktentstehungsprozess, 18./19. Juni 2009, DriveConcepts GmbH, 2009

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

[17] Schulze, Tobias: Getriebeberechnung nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, Vortrag anlässlich des Dresdner Maschinenelemente DMK2007 in Dresden, DriveConcepts GmbH, 2007

[18] Wiche, E.: Radiale Federung von Wälzlagern bei beliebiger Lagerluft. Konstruktion, Berlin 19(1967)5

Berechnung hydrostatischer Radialgleitlager mit Mathcad unter Berücksichtigung verschiedener Schmiermittelversorgungssysteme

Dipl.-Ing. Sven-Uwe Kreja, Prof. Dr. Klaus Brökel

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / CAD, Universität Rostock
Albert-Einstein-Straße 2, D-18059 Rostock
Email: sven-uwe.kreja@uni-rostock.de, klaus.broekel@uni-rostock.de
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *Die DIN 31655 und 31656 geben ein Verfahren zur näherungsweisen Berechnung hydrostatischer Radialgleitlager im stationären Betrieb an. Aus den Geometrie-, Schmierstoff- und Betriebsdaten werden die jeweiligen Schmiermitteltaschendrücke und daraus die Lagerkraft und weitere Kennwerte ermittelt. Der angegebene Rechengang kann dabei von Hand unter Nutzung der angegebenen Formeln und Diagramme durchgeführt werden, ist aber sehr aufwendig, da auch bestimmte Iterationsschritte auszuführen sind. Durch die Nutzung eines Computeralgebrasystems wie Mathcad kann die Berechnung wesentlich beschleunigt werden. Änderungen von Parametern können direkt eingegeben und deren Auswirkung untersucht werden. Ausgehend von den in der DIN angegebenen theoretischen Grundlagen kann die Berechnung den jeweiligen Erfordernissen, z. B. dem gewählten Schmiermittelversorgungssystem, angepasst werden. Vorteilhaft ist die Eingabe in der üblichen mathematischen Notation. Die Lösungen werden mit den in Mathcad vorhandenen Funktionen berechnet. Die Möglichkeit, Funktionen und Programme selbst zu definieren, erlaubt es, notwendige Iterationen direkt von Mathcad ausführen zu lassen. Das Vorgehen bei der Benutzung von Mathcad und die Überführung des DIN-Berechnungsganges in einen Mathcad-Algorithmus werden beschrieben.*

Abstract: *With DIN 31655 and 31656 is provided a procedure for the approximate calculation of hydrostatic radial bearings which operate stationary. Based on the data of geometry, lubricant and operating, are calculated the respective lubricant pocket pressures. The outcome of this is the bearing strength and other specific values. The calculation can be accelerated by the use of a computer algebra system like Mathcad substantially. Modifications of parameters can be inputted directly and their effect can be examined. Based on the theoretical principles given in the DIN, the calculation can be adapted to various conditions, e.g., to the selected lubricant supply system. The input in the usual mathematical notation is advantageous. The solutions are computed with the functions available in Mathcad and the necessary iterations are executed. The procedure in use of Mathcad and the transformation of the DIN-calculation in a Mathcad-algorithm are described.*

Stichwörter: *hydrostatisches Radialgleitlager, Radialgleitlager, Radiallager, Lager, Lagerberechnung, Schmierung, Mathcad*

Keywords: *hydrostatic radial plain bearing, radial bearing, bearing, calculation of bearing, lubrication, Mathcad*

1 Einleitung

Das in [2,4] angegebene Berechnungsverfahren ist beschränkt auf hydrostatische Radialgleitlager (Bild 1) mit einem Schmiermittelversorgungssystem mit konstantem Schmiermitteldruck, wobei die Versorgung der einzelnen Schmiermitteltaschen über vorgeschaltete lineare Drosselwiderstände, z. B. Kapillaren, erfolgt. Die Taschenanzahl kann nicht beliebig gewählt werden, da nur für einige Standardfälle entsprechende Diagramme zur Verfügung stehen. Bezüglich der Lastrichtung wird unter den Extremfällen ‚Last in Richtung Taschenmitte' und ‚Last in Richtung Stegmitte' unterschieden.

Um die Berechnung variabler anwenden zu können, wird von den theoretischen Grundlagen, auf die sich das Berechnungsverfahren stützt, ausgegangen. Die sich daraus ergebenden Gleichungssysteme können dann an die unterschiedlichen Schmiermittelversorgungssysteme angepasst und mit Mathcad gelöst werden. Unter Beachtung der angegebenen Voraussetzungen und Einschränkungen in [2,4] sind dann alle Parameter frei wählbar.

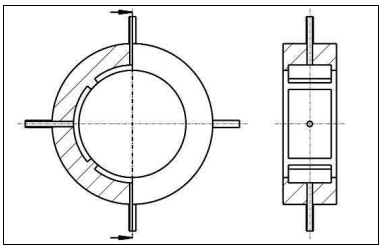


Bild 1: Hydrostatisches Radialgleitlager

2 Berechnung mit Mathcad

2.1 Theoretische Grundlagen

Nach [2,4] wird zwischen hydrostatischen Radialgleitlagern ohne und mit Zwischennuten unterschieden. Im Weiteren wird nur auf Lager ohne Zwischennuten eingegangen. In Bezug auf die für die Berechnung geltenden Voraussetzungen und Einschränkungen sei auf [2,4] verwiesen.

Die Berechnung beruht auf zwei Grundgleichungen zur Beschreibung der Strömung über den Lagerstegen, abgeleitet aus der Reynoldsschen Differentialgleichung.

- Hagen-Poiseuille-Gleichung – Druckströmung zwischen parallelen Platten (Gl. 1)
- Couette-Gleichung – Schleppströmung durch Wellenrotation (Gl. 2)

$$Q = \frac{(p_2 - p_1) \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot \eta \cdot l} \tag{1}$$

$$Q = b \cdot \frac{U \cdot h}{2} \tag{2}$$

$$Q_{en,i} = Q_{ax,i} + Q_{c,i+1} - Q_{c,i-1} \tag{3}$$

Nach dem Kontinuitätsprinzip (Gl. 5) muss für jede Schmiermitteltasche die Summe der Volumenströme gleich Null sein (Bild 2).

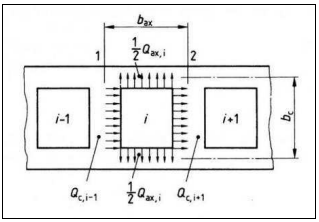


Bild 2: Volumenströme einer Schmiermitteltasche in axialer und in Umfangsrichtung [2]

Nach Einführung von Kenngrößen zur Beschreibung der Lagergeometrie (Bild 3) ergibt sich ein Gleichungssystem (Gl. 4), dessen Lösung die gesuchten Schmiermitteltaschendrücke sind. Im Gegensatz zu [2,4] wird hier ein dimensionsbehaftetes Gleichungssystem verwendet, um den Vorteil von Mathcad, mit Dimensionen rechnen zu können, auszunutzen.

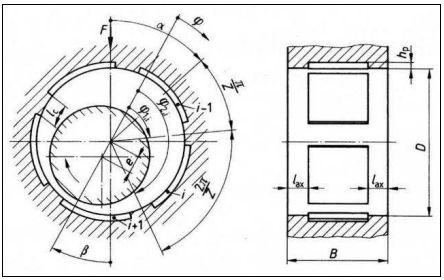


Bild 3: Lagergeometrie eines hydrostatischen Radialgleitlagers ohne Zwischennuten [2]

In (Gl. 6) haben die einzelnen Terme folgende Bedeutung:

- 1. Term links – Volumenstrom vom Versorgungssystem in die Schmiermitteltasche
- 2. Term links – Volumenstrom über die Stege in axialer Richtung
- 3. und 4. Term links – Volumenstrom über die Stege in Umfangsrichtung
- Term rechts – Volumenstrom über die Stege in Umfangsrichtung infolge Rotation

$$\frac{p_{en}-p_i}{R_{cp}}-\frac{C_R^3\cdot D}{12\cdot\eta_B\cdot l_{ax}}\cdot a_i\cdot p_i-\frac{C_R^3\cdot f_i^3\cdot b_c}{12\cdot\eta_B\cdot l_c}\cdot(p_i-p_{i+1})+\frac{C_R^3\cdot f_{i-1}^3\cdot b_c}{12\cdot\eta_B\cdot l_c}\cdot(p_{i-1}-p_i)=\frac{D\cdot\omega\cdot b_c\cdot C_R}{4}\cdot(f_i-f_{i-1}) \quad (4)$$

Die Anpassung an unterschiedliche Schmiermittelversorgungssysteme kann nun dadurch erfolgen, dass der erste Term, der den Volumenstrom vom Versorgungssystem in die Schmiermitteltasche beschreibt, entsprechend geändert wird. Mit (Gl. 4) werden hydrostatische Radialgleitlager, welche mit konstantem Schmiermitteldruck über Kapillardrosseln versorgt werden, berechnet.

$$\frac{Q_{en}}{Z}-\frac{C_R^3\cdot D}{12\cdot\eta_B\cdot l_{ax}}\cdot a_i\cdot p_i-\frac{C_R^3\cdot f_i^3\cdot b_c}{12\cdot\eta_B\cdot l_c}\cdot(p_i-p_{i+1})+\frac{C_R^3\cdot f_{i-1}^3\cdot b_c}{12\cdot\eta_B\cdot l_c}\cdot(p_{i-1}-p_i)=\frac{D\cdot\omega\cdot b_c\cdot C_R}{4}\cdot(f_i-f_{i-1}) \quad (5)$$

Für Schmiermittelversorgungssysteme mit konstantem Schmiermittelvolumenstrom findet (Gl. 5) Anwendung, für Systeme mit belastungsabhängigem Volumenstrom, realisiert z. B. durch ein Schieberventil, (Gl. 6).

$$\alpha_D\cdot A_i\cdot\sqrt{\frac{2}{\rho}}\cdot\sqrt{p_{en}-p_i}-\frac{C_R^3\cdot D}{12\cdot\eta_B\cdot l_{ax}}\cdot a_i\cdot p_i-\frac{C_R^3\cdot f_i^3\cdot b_c}{12\cdot\eta_B\cdot l_c}\cdot(p_i-p_{i+1})+\frac{C_R^3\cdot f_{i-1}^3\cdot b_c}{12\cdot\eta_B\cdot l_c}\cdot(p_{i-1}-p_i) \quad (6)$$

$$=\frac{D\cdot\omega\cdot b_c\cdot C_R}{4}\cdot(f_i-f_{i-1})$$

Aus den Schmiermitteltaschendrücken werden die Lagerkraft und weitere Betriebskennwerte berechnet [2].

2.2 Berechnung eines Lagers mit belastungsabhängigem Schmiermittelvolumenstrom

In Mathcad erfolgt die Eingabe in üblicher mathematischer Notation auf Arbeitsblättern, es bedarf also keiner Programmierkenntnisse. Es werden Variablen definiert und diesen Werte einschließlich ihrer Einheit zugewiesen. Diese können dann in Formeln und Funktionen verwendet werden, welche Mathcad automatisch auswertet. Die festen Parameter für die Berechnung werden definiert und als variable Größe die relative Exzentrizität gewählt (Bild 4).

$D := 0.5m$ $l_{ax} := 0.03m$ $C_R := 0.15 \cdot 10^{-3} m$ $n := 300 \cdot min^{-1}$

$B := 0.5m$ $l_c := 0.03m$ $h_P := 10 \cdot C_R$ $p_{en} := 10MPa$

$Z := 8$ $\alpha := 22.5°$ $\ddot{u} := 0.02 \times 10^{-3} m$ $T_{en} := 40 \cdot °C$

$\alpha_D := 0.65$ $\rho := 900kg \cdot m^{-3}$

$\varepsilon_{max} := 0.5$ $VG := 100$

Bild 4: Eingabedaten für ein Lager mit belastungsabhängigem Schmiermittelvolumenstrom

Anschließend werden weitere geometrische Größen des Lagers, die dynamische Viskosität sowie die Öffnungsquerschnitte der Schieberventile berechnet. Somit stehen alle Größen zur Lösung des Gleichungssystems zur Verfügung. Dieses wird in einem Lösungsblock definiert, nachdem Startwerte für die gesuchten Größen, hier die Schmiermitteltaschendrücke, angegeben worden sind. Zur Lösung wird eine Funktion von Mathcad verwendet. Um diese für eine spätere Iteration immer wieder verwenden zu können, wird eine selbstdefinierte Funktion eingeführt, welche die gegebenen Größen an die Mathcad-Funktion übergibt und die berechneten Größen wieder ausgibt (Bild 5).

$p_1 := 0$ $p_3 := 0$ $p_5 := 0$ $p_7 := 0$ $p_2 := 0$ $p_4 := 0$ $p_6 := 0$ $p_8 := 0$

Vorgabe

$$\alpha_D \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_1} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_1 \cdot p_1 - \frac{C_R^3 \cdot (f_1)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_1 - p_2) + \frac{C_R^3 \cdot (f_8)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_8 - p_1) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_1 - f_8)$$

$$\alpha_D \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_2} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_2 \cdot p_2 - \frac{C_R^3 \cdot (f_2)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_2 - p_3) + \frac{C_R^3 \cdot (f_1)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_1 - p_2) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_2 - f_1)$$

$$\alpha_D \cdot A_3 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_3} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_3 \cdot p_3 - \frac{C_R^3 \cdot (f_3)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_3 - p_4) + \frac{C_R^3 \cdot (f_2)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_2 - p_3) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_3 - f_2)$$

$$\alpha_D \cdot A_4 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_4} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_4 \cdot p_4 - \frac{C_R^3 \cdot (f_4)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_4 - p_5) + \frac{C_R^3 \cdot (f_3)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_3 - p_4) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_4 - f_3)$$

$$\alpha_D \cdot A_5 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_5} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_5 \cdot p_5 - \frac{C_R^3 \cdot (f_5)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_5 - p_6) + \frac{C_R^3 \cdot (f_4)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_4 - p_5) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_5 - f_4)$$

$$\alpha_D \cdot A_6 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_6} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_6 \cdot p_6 - \frac{C_R^3 \cdot (f_6)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_6 - p_7) + \frac{C_R^3 \cdot (f_5)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_5 - p_6) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_6 - f_5)$$

$$\alpha_D \cdot A_7 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_7} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_7 \cdot p_7 - \frac{C_R^3 \cdot (f_7)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_7 - p_8) + \frac{C_R^3 \cdot (f_6)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_6 - p_7) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_7 - f_6)$$

$$\alpha_D \cdot A_8 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_{en} - p_8} - \frac{C_R^3 \cdot D}{12 \cdot \eta_B \cdot l_{ax}} \cdot a_8 \cdot p_8 - \frac{C_R^3 \cdot (f_8)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_8 - p_1) + \frac{C_R^3 \cdot (f_7)^3 \cdot b_c}{12 \cdot \eta_B \cdot l_c} \cdot (p_7 - p_8) = \frac{D \cdot \omega \cdot b_c \cdot C_R}{2 \cdot 2} \cdot (f_8 - f_7)$$

$p_1 \le p_{en}$ $p_2 \le p_{en}$ $p_3 \le p_{en}$ $p_4 \le p_{en}$ $p_5 \le p_{en}$ $p_6 \le p_{en}$ $p_7 \le p_{en}$ $p_8 \le p_{en}$

$p(A, a, f, \eta_B) := \text{Suchen}(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8)$

Bild 5: Lösungsblock zur Berechnung der Schmiermitteltaschendrücke

Da der durch die Rotation auftretende Verlagerungswinkel der Welle zu Beginn der Rechnung unbekannt ist, wird dieser iterativ berechnet. Weiterhin werden die Temperaturerhöhung des Schmiermittels im Lager und die sich dadurch ändernde dynamische Viskosität berücksichtigt und ebenfalls iterativ bestimmt.

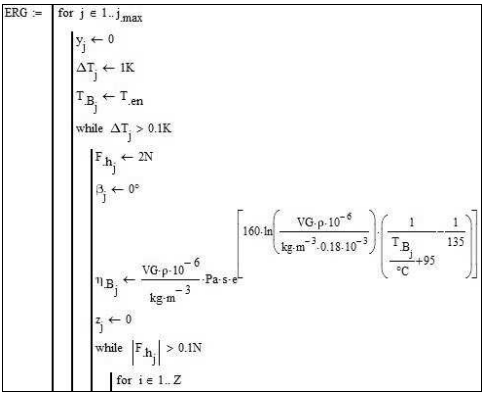


Bild 6: Funktion ERG zur Berechnung und Ausgabe der Lagerkenngrößen - Ausschnitt

Dazu wird wiederum eine Funktion definiert, in der durch die Anwendung von Schleifen diese Iterationen ausgeführt und alle gesuchten Größen berechnet werden (Bild 6). Das Ergebnis steht dann in Form einer Matrix zur Verfügung und kann in unterschiedlicher Weise ausgegeben bzw. veranschaulicht werden.

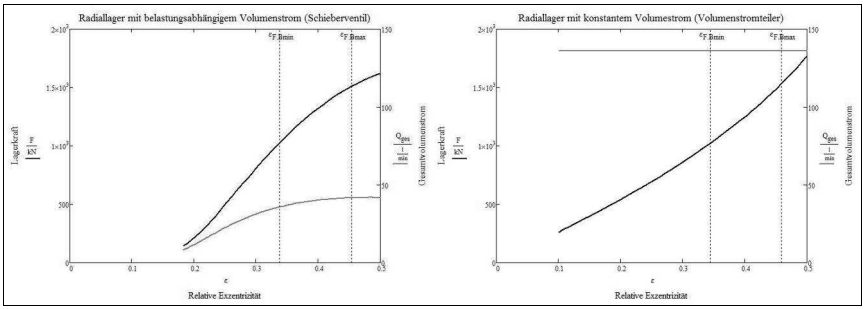


Bild 7: Vergleich unterschiedlicher Schmiermittelversorgungssysteme 1

Beispielhaft sind hier Berechnungsergebnisse in Form von Diagrammen abgebildet (Bild 7,Bild 8). Dabei handelt es sich um einen Vergleich eines hydrostatischen Radialgleitlagers mit unterschiedlichen Schmiermittelversorgungseinrichtungen. Die geometrisch gleichen Lager werden zum einen mit einem belastungsabhängigen Schmiermittelvolumenstrom über gesteuerte Schieberventile und zum anderen mit einem konstanten Schmiermittelvolumenstrom über einen Volumenstromteiler versorgt.

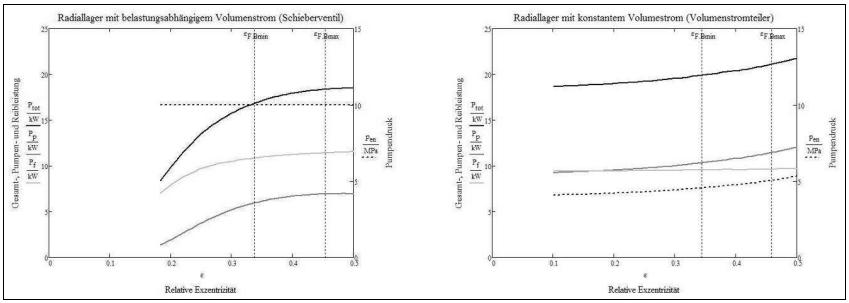


Bild 8: Vergleich unterschiedlicher Schmiermittelversorgungssysteme 2

Aus den Diagrammen sind die Lagerkraft und der Schmiermittelvolumenstrom (Bild 7) sowie die Gesamt-, Pumpen- und Reibleistung und der erforderliche Pumpendruck (Bild 8) in Abhängigkeit von der relativen Exzentrizität ersichtlich.

3 Zusammenfassung

Die Nutzung eines Computeralgebrasystems wie Mathcad ermöglicht eine effiziente Berechnung hydrostatischer Radialgleitlager. Dadurch können in kurzer Zeit verschiedene Varianten bzw. der Einfluss von Parameteränderungen untersucht werden. Durch das Mathcad-Schema ist der Rechengang nachvollziehbar und Bestandteil der Produktdokumentation. Bei Bedarf ist eine direkte Kopplung von mechanischem Entwurf in Pro/ENGINEER und Berechnung in Mathcad realisierbar.

Literatur

[1] Lang, O. R.; Steinhilper, W.: *Gleitlager – Berechnung und Konstruktion von Gleitlagern mit konstanter und zeitlich veränderlicher Belastung.* Konstruktionsbücher Band 31, Springerverlag Berlin Heidelberg NewYork,1978. – ISBN 3-540-08678-1

[2] DIN 31655 Teil 1 06.91 Gleitlager – Hydrostatische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb – Berechnung von ölgeschmierten Gleitlagern ohne Zwischennuten

[3] DIN 31655 Teil 2 04.91 Gleitlager – Hydrostatische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb – Kenngrößen für die Berechnung von ölgeschmierten Gleitlagern ohne Zwischennuten

[4] DIN 31656 Teil 1 06.91 Gleitlager – Hydrostatische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb – Berechnung von ölgeschmierten Gleitlagern mit Zwischennuten

[5] DIN 31656 Teil 1 04.91 Gleitlager – Hydrostatische Radial-Gleitlager im stationären Betrieb – Kenngrößen für die Berechnung von ölgeschmierten Gleitlagern mit Zwischennuten

[6] Kreja, S.-U.: Analyse und Bewertung von Berechnungs- und Konstruktionsmethoden für hydrostatische Radialgleitlager. Diplomarbeit, Universität Rostock, 2007

Berücksichtigung des Fördergutes bei der Entwicklung und Konstruktion von Materialflusssystemen

Dipl.-Ing. Dorothee Wieczorek, Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne

Fachgebiet Maschinenelemente, Fakultät Maschinenbau, TU Dortmund
Leonhard-Euler-Str. 5, D-44227 Dortmund
Email: dorothee.wieczorek@tu-dortmund.de; Internet: http://www.me.mb.tu-dortmund.de/

Inhalt: *Heutige Intralogistiksysteme sind überdimensioniert und berücksichtigen nur unzulänglich die Anforderungen der Betreiber dieser Anlagen. Bei Kenntnis der dynamischen Kräfte, die während des Betriebes auf die einzelnen Komponenten wirken, ist zukünftig eine Auslegung von Intralogistikanlagen unter Berücksichtigung der Anlagen- und Betriebsparameter möglich. Zur Ableitung von Gestaltungsrichtlinien sind zwei mathematische Modelle mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung entwickelt worden.*

Abstract: *Current intralogistic systems are oversized and consider customer requirements only inadequately. If the dynamic forces which affect the components of the system are known, the design of future intralogistic systems becomes feasible with regard to its layout and operating parameters. Two models were developed to set up design guidelines with the help of DoE (Design of Experiments).*

Stichwörter: *Intralogistik, Rollenförderer, Gestaltungsrichtlinien, anforderungsgerecht*

Keywords: *Intralogistic, roller conveyor, design guidelines, fulfilling customer requirements*

1 Einleitung

In den vergangenen fünf Jahren ist die Intralogistik-Branche um rund 50 % gewachsen [1]. Führende Logistikinstitute prognostizieren, dass das bereits große Einsatzspektrum von Intralogistiksystemen auch zukünftig weiter anwachsen wird. Aufgrund der hohen Folgekosten bei Stillständen von intralogistischen Systemen zählt die Zuverlässigkeit von Förderanlagen zu den wichtigsten Anforderungen. Um die in der Intralogistik geforderten hohen Verfügbarkeiten von mehr als 98 % zu gewährleisten, reagieren die Hersteller mit robusten Anlagen und Systemen. Dabei kommen Standardkomponenten zum Einsatz, die bereits betrieblich erprobt sind und sich im Einsatz bewährt haben. Die Verwendung von Standardkomponenten erfolgt auch, weil für die Planung und den Bau von Intralogistiksystemen nur kurze Realisierungszeiten zur Verfügung stehen. Andererseits ergibt sich dadurch zum Teil eine erhebliche Überdimensionierung solcher Anlagen. Um eine belastungsabhängige Auslegung von Intralogistiksystemen zu ermöglichen, fehlen bisher an-

wendungsorientierte Gestaltungsregeln. In Kombination mit einem intelligenten Instandhaltungskonzept besteht bei der Planung und dem Betrieb von instralogistischen Systemen ein erheblicher Optimierungsbedarf [2].

2 Bisherige Auslegung von Materialflusssystemen

Der Fokus bei der Entwicklung und Konstruktion von Materialflusssystemen liegt derzeit auf der technischen Wertigkeit, in Form von maximaler Erfüllung der an sie gestellten mechanischen Anforderungen. Diese wird häufig durch eine Überdimensionierung der mechanischen Komponenten unter Berücksichtigung eines hohen konstruktiven Sicherheitsfaktors erlangt, ohne dass die tatsächliche Belastung der einzelnen Komponenten während des Betriebes hinreichend bekannt ist. Bislang erfolgt die Dimensionierung von Materialflusssystemen mit Hilfe von groben Anhalts- und Erfahrungswerten, bei denen Randbedingungen, wie zum Beispiel das Fördergut oder der Förderinhalt, kaum berücksichtigt werden. Gerade in Hinblick auf angetriebene Komponenten, wie sie in Materialflusssystemen zum Einsatz kommen, ist ein Umdenken erforderlich. So reichen die gängigen Konstruktionssystematiken nicht aus, um Förderanlagen hinsichtlich der Betriebsbedingungen zu optimieren.

3 Forschungsvorhaben

Voraussetzung zur Ableitung geeigneter Gestaltungsrichtlinien für zukünftige Materialflusssysteme ist die Ermittlung des derzeitigen Entwicklungsstandes heutiger Intralogistiksysteme. Dies war eine der ersten Aufgaben des Teilprojektes B1 „Anforderungs- und instandhaltungsgerechtes Werkstoff- und Geometriedesign für Materialflusssysteme der Produktionstechnik“. Das Teilprojekt B1 ist eines von zwölf Teilprojekten des SFB 696 „Forderungsgerechte Auslegung von Intralogistiksystemen – Logistics on Demand“ an der Technischen Universität Dortmund. Ziel des Teilprojektes ist die Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien für intralogistische Anlagen. Anhand derer sollen in Zukunft neue Materialflusssysteme ausgelegt werden können, wobei eine unnötige Überdimensionierung der Materialflusssysteme vermieden und zu einer Vereinfachung der Instandsetzung beigetragen werden soll. Als Demonstrator ist ein Rollenförderer gewählt worden, anhand dessen der Einfluss von Anlagen- und Betriebsparametern auf die Anlagenkomponenten und den Förderprozess untersucht wird. Der Demonstrator des Fachgebietes Maschinenelemente

der TU Dortmund wird mittels eines Flachgurtes angetrieben, der unterhalb der Trabrollen verläuft, und über Andrückrollen an diese angepresst wird (Abb. 1).

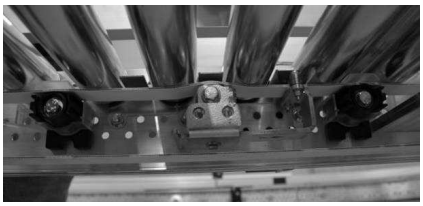


Abbildung 1: Flachgurtantrieb mit Andrückrollen

Bei der Auslegung von Förderanlagen wird derzeit das Fördergut nicht ausreichend mit berücksichtigt. Das Transportgut und der Förderbehälter haben jedoch ebenfalls Einfluss auf das Förderverhalten und tragen entscheidend zu unvorhersehbaren Störungen bei. Zur Ermittlung der Belastung der Anlagenkomponenten und des Fördergutes während des Betriebes sind eine Tragrolle und ein handelsüblicher Förderbehälter mit geeigneter Messelektronik ausgestattet worden. Ausgehend von den aufgenommenen Belastungsgrößen sollen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung ergänzende Auslegungsregeln abgeleitet werden, die bei der Konstruktion zukünftiger Materialflussanlagen herangezogen werden können.

4 Verwendetes Messsystem

Für die experimentelle Untersuchung ist ein geeignetes Messsystem entwickelt worden. Zur Ermittlung der Anlagengeschwindigkeit ist ein Lichtleitersensor an der Messtrecke installiert worden (Abb. 2). Das Infrarotlicht der Lichtquelle des Sensors wird von einem Reflektor, der an einem Tragrollenmantel befestigt ist, reflektiert. Anhand dieses Signals kann die Umfangsgeschwindigkeit der Tragrolle berechnet werden. Zusätzlich ist ein handelsüblicher Förderbehälter mit einem Lichtschrankenempfänger ausgestattet worden (Abb. 2). In Kombination mit zwei an der Messtrecke befestigten Lichtschrankensendern lässt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit des Behälters bestimmen. Auf dem Behälterboden ist ein Dreiachsbeschleunigungssensor angebracht, mit dem sich Vibrationen und Stöße, die während des Transportes von der Anlage auf das Fördergut übertragen werden, aufnehmen lassen [3].

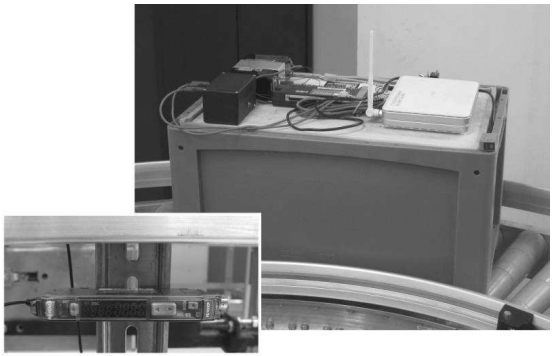


Abbildung 2: Verwendete Messsysteme: Lichtleitersensor (links) und Messförderbehälter (rechts)

5 Untersuchungsziele

Für ausgewählte Kundenanforderungen soll mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung ein mathematisches Modell aufgestellt werden, anhand dessen der Einfluss bestimmter Anlagen- und Betriebsparameter auf den Förderprozess bestimmt werden kann. Das Fördergut wird von den hintereinander in der Anlage angeordneten Tragrollen gestützt und angetrieben. Beim Auffahren der Vorderkante des Kleinladungsträgers auf eine Tragrolle erfährt das Fördergut einen Stoß in vertikaler Richtung. Vorversuche haben ergeben, dass die Intensität und Häufigkeit dieser Stöße von der Tragrollenteilung, dabei handelt es sich um den Abstand der Tragrollenachsen zueinander, der Anlagengeschwindigkeit und dem Fördergewicht abhängig ist. Zwischen dem Tragrollenmantel und dem Fördergutboden tritt Schlupf auf. Die Größe der Relativgeschwindigkeit wird ebenfalls durch die Tragrollenteilung, die Anlagengeschwindigkeit, und das Fördergewicht beeinflusst. Somit beeinflussen diese Anlagen- und Betriebsparameter auch die Fördergeschwindigkeit.

In einem ersten Schritt sind als Zielgrößen die Fördergeschwindigkeit des Behälters sowie der Mittelwert der Erschütterungen, die von der Anlage auf den Förderbehälter wirken, zur Optimierung ausgewählt worden. Da die Fördergeschwindigkeit selbst sehr stark von der Anlagengeschwindigkeit abhängt, wird zur Auswertung dieser Zielgröße die Fördergeschwindigkeit durch die Anlagengeschwindigkeit geteilt. Hierbei wird als Bezugsgröße die Anlagengeschwindigkeit bei der geringsten Teilung gewählt, denn diese ist ebenfalls abhängig von der Tragrollenteilung. Als Einflussgrößen sind die Faktoren Tragrollenteilung, Anlagengeschwindigkeit und Fördergewicht gewählt worden.

6 Versuchsplanung und -durchführung

Zur Durchführung der Versuche ist ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan aufgestellt worden. Dabei werden die Faktoren auf jeweils fünf Faktorstufen untersucht. Die Anlagengeschwindigkeit lässt sich über einen Frequenzumrichter stufenlos einstellen. Gängige Anlagengeschwindigkeiten betragen v = 0,3 – 1,0 m/s. Bei dem für das Messfördergut verwendeten Förderbehälter ist das zulässige Fördergewicht auf m = 50 kg beschränkt. Aufgrund der Mess- und Übertragungstechnik, die in diesen Behälter integriert wurde, beträgt das Leergewicht m = 15 kg. Der Förderbehälter verfügt über einen flachen Boden mit einer Aufstellfläche von A = 600 x 400 mm². Da das Fördergut stets von drei Tragrollen gestützt werden sollte, um ein Kippen des Behälters zu vermeiden, beträgt die maximal zulässige Tragrollenteilung t = 200 mm. Die Tragrollen verfügen über einen Durchmesser Ø = 50 mm. Damit ergibt sich eine minimale Tragrollenteilung von t = 75 mm (25 mm Freiraum). Entsprechend dieser Wertebereiche sind die jeweiligen Faktorstufen ausgewählt worden.

7 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Messergebnisse mit Hilfe einer Statistiksoftware führt zu zwei Modellen, denen jeweils ein Polynom 4. Ordnung zugrunde liegt. Hierbei handelt es sich um ein Modell zur Ermittlung der Fördergeschwindigkeit und ein Modell zur Ermittlung der durchschnittlichen Erschütterung des Fördergutes in vertikaler Richtung. Mit diesen Modellen lassen sich bei bestimmten Anlagen- und Betriebsparametern die Auswirkungen des Förderprozesses auf das Fördergut berechnen.

Das Modell zur Bestimmung der Fördergeschwindigkeit kann in zweidimensionalen Diagrammen veranschaulicht werden. Da die Zielgröße in Abhängigkeit von drei Faktoren bestimmt wurde, sind zur Darstellung in einem zweidimensionalen Diagramm zwei Faktoren konstant zu halten. Hier bietet sich die Darstellung einer Kurvenschar an. In den beiden Diagrammen in Abbildung 3 und 4 ist die Fördergeschwindigkeit des Behälters für die Teilungen t = 75 mm, t = 100 mm, t = 150 mm und t = 200 mm, bezogen auf die Anlagengeschwindigkeit bei der geringsten Teilung von 75 mm, dargestellt. Dabei wurden die Anlagengeschwindigkeiten v = 0,4 m/s und v = 1,0 m/s gewählt.

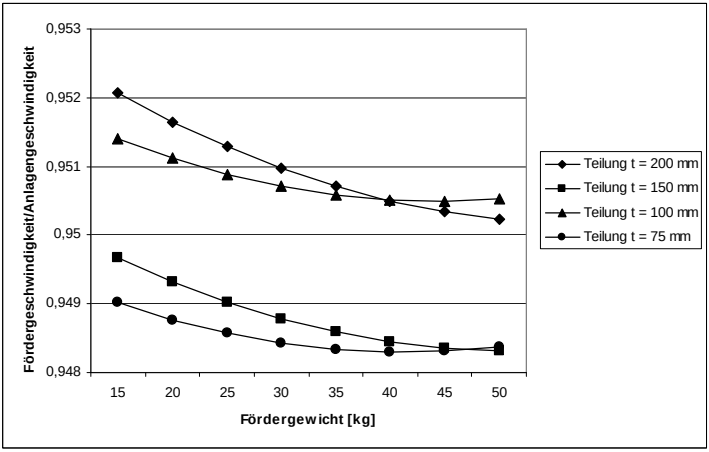


Abbildung 3: Fördergeschwindigkeit, bezogen auf die Anlagengeschwindigkeit, bei v = 0,4 m/s

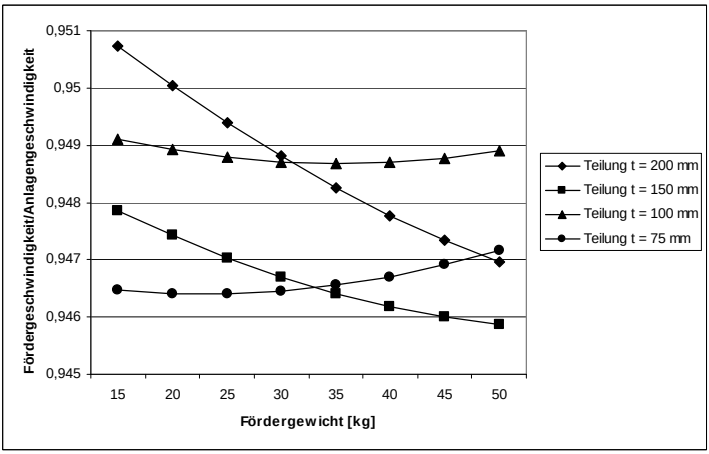


Abbildung 4: Fördergeschwindigkeit, bezogen auf die Anlagengeschwindigkeit, bei v = 1,0 m/s

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass das Verhältnis der Geschwindigkeiten bei den Teilungen t = 100 mm und t = 200 mm größer ist als bei den Teilungen t = 75 mm und t = 150 mm. Das liegt darin begründet, dass die Fördergeschwindigkeit von der Anzahl der Andrückrollen abhängig ist, denn bei den Teilungen t = 75 mm und t = 150 mm sind jeweils mehr Andrückrollen verbaut worden als bei den Teilungen t = 100 mm und t = 200 mm. Außerdem schneiden sich die Kurven der Teilungen t = 75 mm und t = 150 mm sowie t = 100 mm und t = 200 mm bei einem bestimmten Fördergewicht. Die

Lage des Schnittpunktes ist dabei abhängig von der Anlagengeschwindigkeit. Je höher die Anlagengeschwindigkeit, umso geringer ist das Fördergewicht, bei dem sich die Kurven kreuzen. Mit der Anlagengeschwindigkeit nimmt außerdem die Steigung der Kurven t = 75 mm und t = 100 mm ab, und die der Kurven t = 150 mm und t = 200 mm nimmt zu. Demnach hat auch die Anzahl der Tragrollen selbst einen Einfluss auf das Förderverhalten.

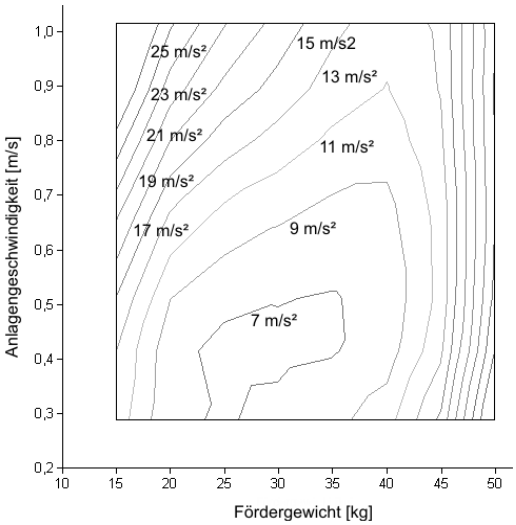


Abbildung 5: Vertikale Beschleunigung des Fördergutes

Das Modell zur Bestimmung der Erschütterungen, die während des Betriebes auf das Fördergut wirken, lässt sich in einem Konturdiagramm verdeutlichen. Dazu ist in Abbildung 5 die Beschleunigung des Fördergutes in vertikaler Richtung in m/s² über der Anlagengeschwindigkeit und dem Fördergewicht bei einer Teilung t = 100 mm dargestellt. Es wird deutlich, dass die Erschütterungen, die durch den Förderprozess auf das Fördergut wirken, reduziert werden können, wenn eine bestimmte Fördergewichts- und Anlagengeschwindigkeitsspanne eingehalten wird. Mit höheren Anlagengeschwindigkeiten wird die optimale Gewichtsspanne schmaler und verschiebt sich zu höheren Gewichten.

8 Fazit und Ausblick

Die Untersuchung verdeutlicht die Notwendigkeit von Messsystemen zur Ermittlung der Belastung des Fördergutes während des Betriebes, denn erst, wenn diese Größen be-

kannt sind, lassen sich Intralogistikanlagen anwendungsorientiert auslegen. Mit Hilfe der Messwerte können ergänzende Gestaltungsrichtlinien für Intralogistiksysteme aufgestellt werden. Auf diese Weise lassen sich zukünftige Intralogistiksysteme in Abhängigkeit des Belastungsfalls auslegen. Die Verwendung von Standardkomponenten ist dabei weiterhin möglich, so dass deren Vorteile genutzt werden können. Ihre Dimensionierung kann nun jedoch an den tatsächlichen Belastungsfall angepasst werden.

In weiteren Versuchen sollen mittels einer Messtragrolle, anhand derer die wirkenden Kräfte während des Betriebes gemessen werden können, die Auswirkungen auf die Intralogistikanlage ermittelt werden. Anhand der Messwerte soll ein Modell zur Bestimmung der Tragrollenbelastung erstellt werden. Somit lassen sich zukünftig, je nach kundenspezifischem Einsatzfall, Rollenförderer anhand dieser Modelle auslegen, wobei eine unnötige Überdimensionierung und damit verbundene hohe Lebenszykluskosten der Anlagen vermieden werden.

Literatur

[1] Hahn-Woernle, Christoph: *Statement 7. Pressekonferenz des Forum Intralogistik*. 2009

[2] Kuhn, Axel; Bandow, Gerhard; Kohlmann, Britta; Wenzel, Sebastian: *Zuverlässigkeit von Intralogistiksystemen – Überdimensionierung vs. Nutzungsabhängige Instandhaltung.* In: Tagungsunterlagen zum 7. Akida, Aachen, 2008, S. 269-276

[3] Künne, B.; Kulig, S.; Eggert, J.; Wieczorek, D.; Benthaus, B.: Ansatz zur analytischen Beschreibung der elektromechanischen Wechselwirkungen eines autonomen mechatronischen Systems. In: Crostack, H. A.; ten Hompel, M. [Hrsg.]: Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen - Logistics on Demand - 2. Kolloquium am 10. Oktober 2007. Verlag Praxiswissen, Dortmund, 2007, S.5-3

Optimierungsmöglichkeiten im Konstruktionsprozess /-ablauf innerhalb des Sonderfahrzeugbaus am Beispiel der Firma Rheinmetall Landsysteme

Dipl.-Ing. Tobias Bläßing[1], Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote[1], Dr.-Ing. Christian Steglich[2]

[1] Institut für Maschinenkonstruktion, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, OvGU Magdeburg
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg
Email: Tobias.Blaessing@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/
Email: Karl.Grote@ovgu.de; Internet: http://imk.uni-magdeburg.de/lkt/
[2] Rheinmetall Landsysteme GmbH Betriebsstätte Kassel
Henschelplatz 1, D-34127 Kassel
Internet: http://www.rheinmetall-detec.de

Inhalt: *Inhaltlich wird eine wissenschaftliche Forschungstätigkeit vorgestellt, die aktuell im Geschäftsbereich Fahrzeugsysteme der Firma Rheinmetall Defence durchgeführt wird. Die Rheinmetall Defence Sparte ist Bestandteil des Rheinmetall Konzerns. Das Fahrzeugspektrum ist breit gefächert – es gibt geschützte Transportfahrzeuge, Aufklärungs- und Führungsfahrzeuge. Die Fahrzeuge müssen je nach Einsatzart, den jeweiligen Bedingungen und den gestellten Anforderungen variieren. Im Vordergrund steht immer der Schutz der Insassen. Die Stückzahlen einer Fahrzeugserie sind mit etwa 100 Fahrzeugen eher gering, wobei jede Serie eine große Variantenvielfalt beinhaltet. Innerhalb der Serie werden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Aufgaben und Einsatzzwecken entwickelt. Das Trägerfahrzeug bleibt dabei unverändert, nur der Aufbau wird entsprechend angepasst. Diese Aufbauten werden als Mehrzweckaufbauten bezeichnet, die theoretisch auf jedes Fahrzeug der Serie montiert werden können. Durch diese Variantenvielfalt ergibt sich ein hoher konstruktiver Aufwand, der entsprechend viel Entwicklungszeit beansprucht. Die durchschnittliche Entwicklungszeit für ein neues Fahrzeug beträgt in der Regel inklusive Erprobung etwa zwei Jahre. Ziel ist es, diese Entwicklungszeit durch Optimierung zu verkürzen. Zudem läuft der Entwicklungsprozess in der Regel in Kooperationen mit mehreren Zulieferern und Dienstleistern ab. Die beschriebenen Forschungstätigkeiten werden auf der Basis einer Kooperation zwischen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg – speziell Lehrstuhl für Konstruktionstechnik – und der Firma Rheinmetall Defence durchgeführt. Das Projekt soll aufbauend auf Analysen der derzeitigen Entwicklungsabläufe ein optimiertes Konzept zu Arbeitsabläufen und Informationsprozessen erarbeiten. Am Beispiel einer aktuellen Neuentwicklung mit der Bezeichnung „AMPV“ wurden in einem ersten Schritt Strukturen, Entwicklungs- und Zeitpläne analysiert sowie bewertet. Des Weiteren wurden an vergangenen Entwicklungsprozessen beteiligte Mitarbeiter verschiedener Bereiche in einer standardisierten Erhebung zu Abläufen, Kritikpunkten und hilfreichen Erfahrungen befragt.*

Insgesamt wurde besondere Aufmerksamkeit auf die Erstellung von Netzplänen, die Konstruktionsabläufe und die Abwicklung der Auftragskoordination gelegt. Zudem wurden Engstellen und Terminverzüge aufgezeigt sowie die Gründe für diese Zeitverzüge geklärt. Ein weiterer betrachteter Aspekt ist die Kommunikation zwischen den an der Entwicklung beteiligten Konstrukteuren, Zuliefern und Dienstleistern. Aus den gewonnenen Informationen und Analysen sollen in den kommenden Monaten entsprechende Optimierungsmöglichkeiten abgeleitet und der Firma Rheinmetall Defence unterbreitet werden.

Abstract: *This scientific research activity, which is presented here, belongs to the business of Vehicle systems of the company Rheinmetall Defence. The Rheinmetall Defence section is a component of the Rheinmetall group. The vehicle spectrum is fanned out widely – there are protected transport vehicles, clarification vehicles and leadership vehicles. The vehicles must be varied in according to the application kind, the respective conditions and the special demands. The protection of the passengers always stands in the foreground. The number of produced vehicles series is rather low - about 100 - but there is otherwise a big range of different variations of the vehicles. Within a series vehicles with different assignments and purposes are developed. Besides the main vehicle remains unchanged, only the superconstruction is adapted accordingly. These superstructures are called „Mehrzweckaufbauten" (various utility constructions) which can be combined with at least every vehicle of the series. Because of this variety high constructive expenses are necessary, which claim need to a lot of development time inconsequence. The average development time for a new vehicle amounts, as a rule inclusive test, about two years. Aim is to shorten this development time by optimisation. Besides, the development process expires as a rule in cooperation's with several suppliers and service companies. The described research operations are based on cooperation between the Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg – especially of Lehrstuhl für Konstruktionstechnik – and the company Rheinmetall Defence. The project aims to optimize the work routines and trials of information by analysing the routines of past and present developments. In of the first steps the structures of a current new development with the name "AMPV" were be analysed, as well as the development plans and schedules were valued. Besides involved employees of different areas were questioned in the past development processes in a standardised elevation about expiries, criticism points and helpful experiences. Special attention was paid on the production of net plans, the construction expiries and the liquidation of the order coordination. Besides, narrow places and date defaults were indicated as well as the reasons were cleared for these time defaults. Another aspect is the communication between the design engineer involved in the development, supplying and service companies. Build up from the won informations and analyses optimisation possibilities should be derived during the coming months and be presented to the Rheinmetall Defence Company.*

Stichwörter: *Rheinmetall Landsysteme GmbH (kurz: RLS), geschützte Transportfahrzeuge, Aufklärungs- und Führungsfahrzeuge, Variantenvielfalt, Mehrzweckaufbauten, Entwicklungsablauf, Arbeitsablauf, Informationsprozess*

Keywords: *Rheinmetall Landing Systems GmbH, protected transport vehicles, clarification vehicles and leadership vehicles, variety, Mehrzweckaufbauten, analyses of development, workflow, process of information*

1 Allgemeines zur Firma Rheinmetall Landsysteme GmbH Kassel

Der Grundstein der Firma Rheinmetall wurde vor mehr als 120 Jahren gelegt. Die Geschäftsbereiche gliedern sich heute in den Automotive Sektor, sowie in den Defence Bereich auf. Im Bereich Automotive ist die Führungsgesellschaft Kolbenschmidt Pierburg AG mit den Geschäftsbereichen Kolben, Luftversorgung, Pumpen, Aluminium-Technologie, Gleitlager und Motor Service auf Module und Systeme rund um den Motor spezialisiert.
Die Defence Sparte des Rheinmetall Konzerns zählt mit den Geschäftsbereichen Fahrzeugsysteme, Waffe und Munition, Antriebe, Flugabwehr, Verteidigungselektronik sowie Simulation und Ausbildung zu den namenhaften und großen Adressen der internationalen Sicherheits- und Verteidigungsindustrie.
Heute ist dieses Unternehmen eines der führenden Systemhäuser im Bereich der Entwicklung und Konstruktion gepanzerter Ketten- und Radfahrzeuge. Der gesamte Rheinmetall-Konzern umfasst circa 19.200 Mitarbeiter, davon sind circa 6.800 im Unternehmensbereich „Defence“ beschäftigt. Zu den größten Standorten gehört Kassel hier wird ein Großteil der Montage durchgeführt. Weitere Standorte in Deutschland sind beispielsweise in Kiel, Unterlüß oder Gersthofen. Des Weiteren sind Firmenvertretungen außerhalb Deutschlands und Europa zu finden.

2 Kernkompetenzen und Aufgabengebiete der Firma RLS

Zu den Hauptaufgaben der Firma RLS gehören die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von geschützten Ketten- und Radfahrzeugen. Die hier vorgestellte Forschungsarbeit gliedert sich in das Gebiet der radbetriebenen Fahrzeuge ein. Das Spektrum fächert sich in Aufklärungs-, Führungs- und Funktionsfahrzeuge auf. In den nachfolgenden Bildern sind einige Beispiele für Fahrzeuge, die von der Firma RLS entwickelt, konstruiert und gefertigt wurden.

Bild 1: Transportpanzer Fuchs 2 für VAE [2]

Bild 2: Duro III Feldjäger [2]

Grundsätzlich ist jedes Fahrzeug auf einen bestimmten Einsatzzweck ausgerichtet und dem entsprechend ausgestattet. Diese Ausstattung richtet sich nach den unterschiedlichen Anforderungen der Fahrzeuge. Wichtigste Aufgabe ist dabei immer der Schutz der Insassen. Die Produktionszahlen der Fahrzeuge sind in der Regel als gering einzustufen, meistens werden etwa 100 Fahrzeuge von einer Serie gebaut. Dabei ist allerdings eine sehr große Variantenvielfalt zu verzeichnen.

In den letzten Jahren wurde das Ziel verfolgt, ein Grundfahrzeug oder Trägerfahrzeug zu konstruieren, das mit unterschiedlichen Mehrzweckaufbauten bestückt werden kann. Damit besteht die Möglichkeit, die Aufbauten an entsprechende Einsatzzwecke anzupassen. Diese Aufbauten werden firmenintern auch als „Mehrzweckaufbauten“ oder „Missionsmodule“ bezeichnet. Mit dieser modularen Bauweise wurde eine sehr große Flexibilität erreicht. Das Ziel ist dabei, jeden Aufbau und jedes Grundfahrzeug einer Serie miteinander kombinieren zu können. Folglich sind eine vereinfachte Logistik, mehr Handlungsspielraum und eine ständige Einsatzbereitschaft gegeben.

Gleichzeitig werden diese Fahrzeuge mit jeder Entwicklungsstufe komplexer, umfangreicher und schwerer. Dieser Trend kann nicht nur im zivilen PKW-Sektor verzeichnet werden, sondern er spiegelt sich auch in den Bereichen der Sonderfahrzeuge wider. Aus diesem Grund ist es kaum mehr möglich, ein Fahrzeug in Eigenregie zu entwickeln, zu konstruieren und zu fertigen. Somit müssen Kooperationen mit Unterlieferanten eingegangen werden, um von deren Wissen zu profitieren. Mit diesen Kooperationen sind natürlich auch Probleme verbunden, auf die im späteren Teil dieser Ausarbeitung eingegangen wird. Zudem steigt mit dem anwachsenden Entwicklungsaufwand auch die Entwicklungszeit. Um trotz des Mehraufwandes konkurrenzfähig zu bleiben, muss also eine Optimierung innerhalb des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erfolgen. Um dies zu realisieren, ist die Firma RLS an die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg herangetreten, um im Zuge eines gemeinsamen Projekts eine Möglichkeit zu finden, wie der

Entwicklungs- und Konstruktionsprozess schneller und effektiver durchlaufen werden kann.

Um einen Einblick in die Entwicklungs- und Konstruktionsabläufe zu bekommen, wurden in ersten Untersuchungen unterschiedliche Fahrzeugprojekte untersucht und später bewertet. In der durchgeführten Ist-Situations-Analyse innerhalb der Firma RLS ergab sich, dass infolge der hohen Komplexität der Fahrzeuge stets mehrere Abteilungen parallel an einem Fahrzeug bzw. an einer Baugruppe arbeiten. Innerhalb der Abteilungen erfolgt dann eine weitere Untergliederung in Fachgruppen, die dann für ein spezielles Bauteil bzw. eine spezielle Baugruppe zuständig sind.

In der hier beschriebenen Forschungstätigkeit wird beispielhaft auf zwei unterschiedliche Strategien eingegangen und die Herangehensweise dieser Strategien an den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess näher betrachtet.

3 Eigenentwicklung

In einem ersten Beispiel wird auf eine Eigenentwicklung eingegangen. Die Aufgabe bestand darin, ein Fahrzeug für Aufklärungs- und Führungsarbeit zu entwickeln und zu fertigen. Dabei wurde ein bereits etabliertes Fahrzeug zugrunde gelegt, das in Leistung, Schutz und Ausstattung modernisiert und modifiziert wurde. Auch hier wurde die bewährte Modulbauweise wieder angewandt. Wobei die Forderung eines kompletten Wechsels des Aufbaus nicht vorgeschrieben war. Bei diesem Fahrzeugkonzept werden lediglich die Einbauten bzw. das Heck ausgetauscht.

Die Entwicklung wurde vollständig im eigenen Haus durchgeführt, sodass der Gesamtüberblick über das Fahrzeug erhalten blieb. Die Komponenten, die nicht selber gefertigt werden konnten, wurden durch Unterauftragnehmer realisiert.

Das hat den Vorteil, dass die Firma in allen Gebieten auf denen sie die nötigen Kompetenzen hat, eigenständig und unabhängig arbeiten kann. So können Änderungen sehr schnell und einfach durchgeführt werden. Aufgrund der Nähe der einzelnen Abteilungen sind zudem die Lauf- und Informationswege deutlich kürzer und schneller. Andererseits werden in der Realität durch teilweise mangelnde Kommunikation, Probleme und Unstimmigkeiten unnötig herausgezögert, die in der Vergangenheit teilweise zu Terminverschiebungen führten.

4 Kooperation

„Europäische Kooperation auf Basis bewährter Technologie“ lautet das Motto im zweiten Beispiel. In einem gemeinsamen Projekt der die Firma Rheinmetall Landsysteme GmbH mit dem Sitz in Kassel und einem schweizerischer Unternehmen wurde ein mittleres Funktionsfahrzeug entwickelt. Dieses modular aufgebaute Fahrzeug kann mit unterschiedlichen Missionsmodulen ausgerüstet werden. Auf das vom Projektpartner MOWAG GmbH modifizierten Fahrgestell wurden dann die von der Firma RLS entwickelten Aufbauten montiert.
Ziel dieses Gemeinschaftsprojektes war es, die Stärken und Kompetenzen beider Projektpartner auszubauen und gemeinsam zu bündeln. Durch die optimierte Kombination der Kompetenzen beider Firmen konnten im vorliegenden Beispiel vor allem die Bereiche der Mobilität, Flexibilität und Transportfähigkeit profitieren. Nachteilig sind vor allem der erschwerte Kommunikations- und der Informationsfluss. Da jeder der Partner weitere Unterauftragnehmer hat, besteht ein hoher Organisationsaufwand. Beispielsweise müssen auftretende Probleme und notwendige Änderungen während der Entwicklung, Konstruktion und Erprobung über langwierige und zeitintensive Änderungsverfahren an alle notwendigen Stellen weitergeleitet werden. Als ebenfalls nachteilig wurde die räumliche Trennung der Entwicklungspartner gesehen. Aufgrund des organisatorischen Aufwandes wurden notwendige Absprachen, die in einem kurzen Gespräch hätten geklärt werden können, länger herausgezögert, was dann wiederum zu Terminverschiebungen führte. Diese Problematik zog sich durch Bauteile, Baugruppen und Gesamtsysteme hindurch. Durch unterschiedliche Fertigungsweisen in den Standort entstanden zudem auch Schwierigkeiten bei Toleranzen und Anschlussmaßen.

5 AMPV

Das „AMPV“ (Armoured Multi Purpose Vehicle) ist eine Kooperation der Firma Rheinmetall GmbH und der Firma KMW GmbH. Sämtliche Voruntersuchungen dienten dem Ziel, die gewonnen Erfahrungen in diesem aktuellen laufenden Projekt einfließen zu lassen.
Um einen ersten Einblick in die sehr komplexe Struktur des Projektes zu bekommen, war es zwingend erforderlich, das Projekt in Einzeleinheiten zu untergliedern. Mit Hilfe der Projektleitung wurde eine Aufgliederung der einzelne Baugruppen und Unterbaugruppen erstellt. Dadurch wurde die Verteilung der Zuständigkeiten beider Projektpartner deutlich. Nachdem dieser Einblick gegeben war, konnte mit der eigentlichen Analyse und Bewer-

tung begonnen werden. Wichtig war hier von Anfang an, dass die Mitarbeiter des RLS-Unternehmens miteinbezogen werden. Durch ihren täglichem Umgang mit dem Projekt und dem Fahrzeug können die Mitarbeiter durch ihre Erfahrungen, einen wertvollen Beitrag zur angestrebten Optimierung leisten. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld eine freiwillige Befragung der Mitarbeiter durchgeführt, in der bereits erste Schwachstellen und Komplikationen deutlich wurden. Des Weiteren wurden die Netzpläne mit den zugehörigen Projektstrukturplänen untersucht. Damit sollen mögliche Terminverschiebungen erkannt und deren Ursache analysiert werden. Derzeitig sind die Analysen zu den Netzplänen und zu den Optimierungsvorschlägen der Mitarbeiter noch nicht vollständig abgeschlossen, sodass detaillierte Aussagen zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht getroffen werden können.

6 Ergebnisse

Ziel der Untersuchung ist eine Verbesserung des Konstruktions- und Entwicklungsalgorithmus innerhalb der Firma Rheinmetall GmbH. Besondere Fragen sind hierbei: Wie können Terminverzüge frühzeitiger erkannt werden oder am besten vermieden werden? Wie können aufwendige Änderungsverfahren vermieden beziehungsweise optimiert werden?

Auch wenn zum jetzigen Zeitpunkt endgültige Ergebnisse fehlen, so ist in den bisherigen Untersuchungen doch der Bedarf einer derartigen Betrachtungsweise deutlich geworden. Zudem zeigen sich erste mögliche Ansatzpunkte für Veränderungen, wie beispielsweise die Optimierung der Kommunikationsprozesse.

Literatur

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

[2] Firmenportal: *Gate2Defence* Stand Juni 2009

Kleinteiloptimierung am Beispiel von Verbindungselementen in Windkraftanlagen

Dr.-Ing. Jan Brökel, Dr.-Ing. Rüdiger Kortenkamp

Suzlon Energy GmbH
Doberaner Str. 115, D-18057 Rostock
Email: jan.broekel@suzlon.com; ruediger.kortenkamp@suzlon.com; Internet: http://www.suzlon.de

Inhalt: *Ausgehend von der turbinenübergreifenden Variantenvielfalt bei den HV-Schraubenverbindungen in Suzlon Windkraftanlagen wird der Ansatz einer Kostenreduzierung durch Variantenreduktion vorgestellt. Es werden die Auswirkungen der minimierten Variantenanzahl auf die Lieferkette, die Fertigung und den Service dargelegt. Weiterführend wird das Potential der Einspaarung von zwei Bolzenvarianten abgeschätzt.*

Abstract: *Due to the large variety of HV-bolt connections in Suzlon wind turbines this paper presents the effort of variety reduction. The effects on the supply chain, the manufacturing plants and the field service are described. Additionally the potential cost minimization is shown on the reduction of two bolt variants.*

Stichwörter: *HV Schraubenverbindung, Windkraftanlage, Kleinteiloptimierung*

Keywords: *HV bolt connection, wind turbine, part optimization*

1 HV-Schrauben Verbindungen in WKA

Basierend auf der “dänischen” Bauweise sind Windkraftanlagen der Firma Suzlon Energy Ltd. dreiflüglige Schnellläufer mit Asynchrongenerator und modularem Antriebstrang. Die Dreipunktlagerungen des Triebstranges, bestehend aus Hauptlager und Momentenstützen am Getriebe, wird mit HV-Stehbolzen am Hauptrahmen der Gondel befestigt. Zwar ist der prinzipielle Aufbau der Suzlon Anlagenfamilie gleich, aber aufgrund der unterschiedlichen Leistungen kommen in den Triebstrangverbindungen der drei Anlagentypen mit 1.25 MW bis 2.1 MW Leistung, sowohl Schraubendurchmesser von M30 bis M39, als auch Bolzenlängen von 250 mm bis 370 mm zum Einsatz. Diese Bolzen sind keine Standardbauteile, sondern für den Anwendungszweck entwickelte und damit vergleichsweise kostenintensive Sonderanfertigungen. Allein für Hauptlager und Getriebeböcke werden pro Anlage bis zu 38 Stehbolzen mit Scheiben und Muttern eingesetzt. Bei einer Produktion von 1500 Anlagen im Geschäftsjahr 08/09 werden allein für die Triebstranglagerung mehr als 57.000 HV-Schraubenverbindungen benötigt.

Eine WKA setzt sich größenbedingt aus Segmenten, welche auf der Baustelle montiert werden, zusammen. An dieser Stelle soll die Suzlon WKA S82 als Beispiel dienen. Die vier Rohrturmsegmente werden mittels dreier Flanschverbindungen und 284 HV-Durchsteckschraubenverbindungen (188x M36 und 96x M42) zusammengebaut und mit 2x80 Stk. M36 Stehbolzen am Betonfundament verschraubt. Wobei am Fundament nur die Scheiben und Muttern für diese Betrachtung interessieren, da die Bolzen Teil des meist separat vom Kunden eingekauften Fundamentes sind. Die Verbindung zwischen Turm und Gondel bildet das Turmkopflager, welches mit jeweils 48 Stk. M36 Bolzen zum Turm und zum Hauptrahmen verschraubt ist.

In der Gondel sind sowohl das Hauptlager (12x M39), die Getriebelager (16x M39) und der Generatorträger (20x M36) am Hauptrahmen verschraubt. Dazu kommt die Welle-Nabe Flanschverbindung mit 54Stk. M36 Stehbolzen. An die Nabe sind die drei Blattlager mit je 68Stk. M33 Schrauben montiert. Die Blattlager-Flügel Verbindung, welche Teil des Blattes ist, soll hier nicht betrachtet werden. Insgesamt werden in der S82 Turbine 846 HV-Schraubenverbindungen mit Durchmessern zwischen M33 und M42 verbaut. Davon sind 376 Durchschraubverbindungen und 470 Stehbolzenverbindungen. Bei den Anlagen der S6x und der S88 Turbinenreihe verhält es sich ähnlich, wobei für die S6x auch ein Gitterturm mit über 3200 HV Durchschraubverbindungen (M30 bis M36) angeboten wird. Für diese Durchschraubverbindungen werden aber Standardbolzen nach EN-14399 verwendet, welche vergleichsweise kostengünstig sind.

2 Varianten der HV-Verbindungen und Merkmale

Für die hier vorgestellte Variantenanalyse und Variantenreduktion werden nur die HV Stehbolzenverbindungen in den Triebsträngen der S6x, S82 und S88 Gondeln betrachtet, da diese Stehbolzen als Sonderanfertigungen mit hohen Einzelstückkosten verbunden sind und dadurch das relative Einsparpotential trotz kleiner Stückzahlen hoch ist.

Die geschraubten HV-Verbindungen in Windkraftanlagen kombinieren die Ertragbarkeit von extremen Lasten und hohen dynamischen Beanspruchungen mit einer problemlosen Montage der vorgefertigten Einzelteile am jeweiligen Bauplatz zu Aufbau-, Reparatur- und Demontagezwecken. Neben Nenndurchmesser und Klemmlänge, welche sich aus der Anschlusskonstruktion und der Auslegung ergeben, werden die HV-Schraubenverbindungen durch Korrosionsschutz Beschichtung der Bolzen, Scheiben und

Muttern, durch eventuelle Reibbeiwert erhöhende Beschichtungen in der Klemmfuge, durch die Anziehverfahren und durch die Einschraubtiefe bestimmt, siehe Bild 1.

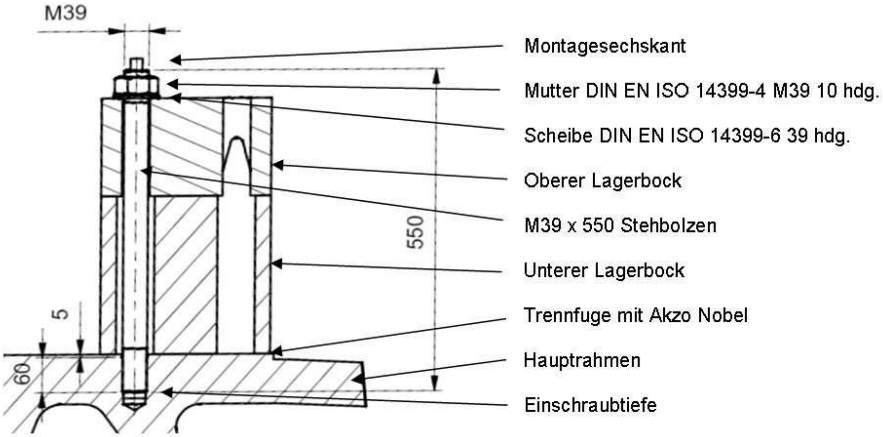


Bild 1: M39 HV-Verbindung am S82 Getriebelager

Akzo Nobel steht für eine Reibbeiwert erhöhende Beschichtung in der Trennfuge.

In Tabelle 1 sind die Triebstrang-Stiftschraubenverbindungen der drei Suzlon Turbinen zusammengefasst. Die grau hinterlegten Zellen zeigen ähnliche Verbindungskomponenten und im Falle der Hauptlager-Rahmen Verbindung (dunkelgrau) nahezu identische geometrischen Maße.

Tabelle 1: Triebstrang Stiftschraubenverbindungen in Suzlon Turbinen

Verbundene Bauteile	Turbine	Verbindungsart	Ø	Länge	Anzahl	Akzo Nobel
Hauptlager - Rahmen	S6x M2	Stiftschraubverbindung	M33	205mm	12	-
Hauptlager - Rahmen	S82 V3	Stiftschraubverbindung	M39	285mm	12	ja
Hauptlager - Rahmen	S88 V3	Stiftschraubverbindung	M39	305mm	12	-
Getriebelager - Rahmen	S6x M2	Stiftschraubverbindung	M30	395mm	16	-
Getriebelager - Rahmen	S82 V3	Stiftschraubverbindung	M39	550mm	16	ja
Getriebelager - Rahmen	S88 V3	Stiftschraubverbindung	M36	630mm	16	-

Neben den offensichtlichen Maßen sind weitere Kriterien für diese HV-Verbindungen zu vergleichen. Alle Stiftschraubenverbindungen werden grundsätzlich unter denselben Randbedingungen appliziert:

Die Einschraubteile bestehen aus EN GJS-400-18U-LT.
Die Anziehverfahren ist Drehmoment gesteuert.
Die Bolzen sind schlußvergütet und feuerverzinkt.
Radialer und axialer Bauraum für Geometrieänderungen und Werkzeuge ist vorhanden.
Die Art der Belastung ist gleich, wobei der Nachweis nach VDI 2230 trotzdem zu erbringen ist.
Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen ist die Vereinheitlichung von Durchmessern und Längen möglich.

3 Bauteilreduktion

„Varianten entstehen, wenn ein Produkt in einer oder mehreren Einzelheiten anders gestaltet oder verändert wird, aber die für das Ausgangsprodukt wesentlichen Eigenschaften nach wie vor vorhanden sind." [1]
Seit Jahrzehnten nimmt die Anzahl von Produktvarianten und verschiedenen Bauteilen im Maschinen- und Anlagenbau drastisch zu. Als unternehmensexterne Ursachen sind z.B. der durch die Globalisierung erhöhte Wettbewerb, immer kürzere Produktlebenszyklen und die Forderung nach einer Ausweitung des Sortiments zu nennen. Als interne Gründe gelten beispielsweise unzureichende Kenntnisse über Variantenkosten, Mängel beim Produktdatenmanagement und eine undurchschaubare Variantenvielfalt. Die durch diese Vielfalt und die damit verbundene Komplexität entstehenden Kosten werden jedoch häufig unterschätzt und meist nur mit einem Arbeitsmehraufwand durch das Verwalten zusätzlicher Zeichnungen und Stücklisten kalkuliert. Die Tabelle 2 zeigt allerdings, wie sich die Vielfalt an Varianten auf alle Bereiche eines Unternehmens auswirkt und damit direkt oder indirekt als „Kostentreiber" fungiert. Die Grau markierten Zellen sind als besonders relevant in Bezug auf die HV-Schraubenverbindungen identifiziert worden. Deutlich sind die Schwerpunkte Entwicklung und Fertigung zu erkennen. Da viele der entstehenden Kosten aufgrund der Komplexität nicht transparent sind, muss deren Vermeidung durch nachhaltige Maßnahmen zur Kontrolle der Produkt- und Teilevielfalt versucht werden. Neben der Komplexität verhindert oft auch die Zeitverzögerung der Kostenwirkung ein vernünftiges Bauteilmanagement.

Tabelle 2: Kostenrelevante Auswirkung der Variantenvielfalt nach [2],
Grau hinterlegt die Suzlon relevanten Kriterien

Entwicklung	Einkauf	Fertigung	Controlling	Vertrieb	Service
Aufwand für Konstruktion der neuen Teile	Erschwerte Materialbedarfsermittlung	Zusätzliche Arbeitspläne, Werkzeuge und Vorrichtungen	Aufwendigere Kalkulation	Mehraufwand für Vertriebsschulung	Aufwendigere Ausbildung der Kundendienste
Erstellen und Verwalten zusätzlicher Produktdaten	Höhere Einstandspreise durch kleinere Stückzahlen	Höhere Rüstkosten und Anlaufverluste aufgrund kleinerer Losgrößen	Erhöhter Aufwand für Rechnungs-prüfung	Aufwendigere Preissetzung	Zusätzliche Unterlagen für den Kundendienst
Erhöhter Aufwand für Änderungen und Produktentwicklungen	Erhöhte Anzahl von Bestellungen und höhere Lagerbestände	Komplexere Kapazitätsplanung und Fertigungssteuerung		Höhere Fehlerquote bei der Auftragsabwicklung	Vergrößerung des Reklamations-risikos
Pflege zusätzlicher Teile und Stammdaten	Mehr Lieferantenbeziehungen	Niedrigere Werkzeugauslastung		Höhere Anzahl von Verkaufsdokumenten	Erhöhte Ersatzteil-bevorratung

Diese Verzögerung wird verursacht durch eine anfänglich überschaubare Zunahme der Varianten bei der keine oder nur geringe Kostenerhöhungen entstehen. Steigt die Zahl der Varianten weiter, sind jedoch Investitionen wie z.B. mehr Lagerplatz, auch virtueller Art, und zusätzliche Mitarbeiter nötig. Reduziert man die Vielfalt dann wieder, ist ein Abbau der Kosten im gleichen Umfang nicht möglich. Dies ist hauptsächlich dadurch begründet, dass die Kostenanpassung bei rückläufigem Aufwand, gleich welcher Art, aus wirtschaftlichen, rechtlichen oder bürokratischen Gründen meist zeitverzögert und im Wesentlichen anders als bei Mehraufwand erfolgt. Diese sogenannte Kostenremanenz veranschaulicht Bild 2. Um unnötige Kosten effektiv zu verhindern, muss einer Entstehung von überflüssigen Varianten mit Hilfe des Variantenmanagements vorgebeugt werden. Wird bei einer Neuentwicklung das Variantenmanagement einbezogen, so kann mit einer Kostensenkung von bis zu 20% gerechnet werden [2]. Durch die eingeschränkte Vielfalt darf allerdings kein wirtschaftliches Potential verschwendet werden. Daher müssen die durch Reduzierung eingesparten Kosten mit der Nutzenwirkung möglicher Varianten verglichen werden [2]. Im Hinblick auf die HV-Schraubenverbindung ist es sinnvoll bzgl. der Mehrfachverwendung einer Schraubengröße von einer Symbiose aus Gleichteil- und Baukastenstrategie zu sprechen, da deren Einsatz sowohl in einer Anlage des gleichen Typs als auch typenübergreifend relevant ist [3].

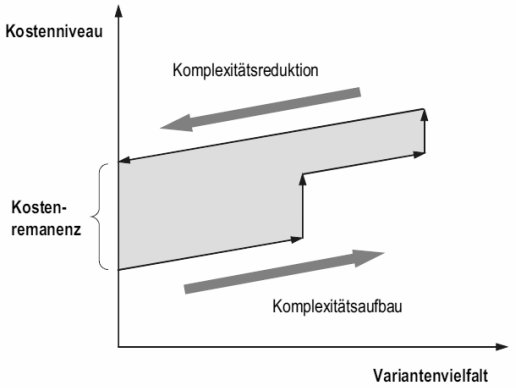


Bild 2: Kostenremanenz beim Auf- und Abbau der Variantenvielfalt [2]

In der internationalen Supply Chain von Suzlon Ltd., werden die Lagerhaltung aller Standorte und die Stücklisten der Suzlon Turbinen mit der Software SAP R3 verwaltet. Mit dieser Software werden neben dem globalen Einkauf, der Lagerhaltung in Indien, China und den USA, auch lokale Zulieferer für bestimmte Märkte (China, USA, Indien) koordiniert. Hier wirkt sich jede Bauteilreduzierung positiv aus, da die Datenbanken mit den CAD Daten und teilweise mit dem Accounting abgeglichen werden.

Für die in Tabelle 2 zusammengefassten sechs Stiftschraubenverbindungen sind jeweils eigene Datensätze für die verschiedenen Fertigungsstandorte und Turbinenvarianten angelegt. Dies erfordert sowohl IT-Infrastruktur als auch IT-Services Personal.Neben der virtuellen Lagerhaltung sind auch die Logistik und das Dispatchen verschiedener fast gleicher Stehbolzen zwischen Bolzenherstellern (in Europa) und Fertigung (drei Werke in Indien und jeweils eins in China und den USA) aufwendig, teuer und fehlerbehaftet. Die gesamte Lieferkette wird durch entsprechende Dokumentationen für den Zoll und der Qualitätssicherung begleitet.

Im Rahmen des Designs schlägt sich die Variantenreduktion vor allem in weniger CAD-Daten, weniger Dokumenten und schnellerem Arbeiten durch gleiche Bauteile nieder. Eine Baukastenstruktur mit vorgegebenen Bauteilmöglichkeiten zwingt den Designer die Variantenvielfalt nicht zu erhöhen. Während der Auslegung wird der Aufwand der Schraubennachweise nicht verringt, aber die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit minimiert sich.

4 Potential und Ausblick

Durch die vorgeschlagene Vereinheitlichung der Schraubenverbindungen Hauptlager-Rahmen und Getriebelager-Rahmen von S82V3 und S88V3 mit Hilfe der Gleichteilestrategie ist ein Kostensenkungspotential gegeben. Zwar ergeben sich bei der Vereinheitlichung der Verbindung Getriebelager-Rahmen zwangsläufig Änderungen an den zu verbindenden Teilen (Getriebelagerböcke und Rahmen der S82V3) , aber bei der Angleichung der Hauptlagerverbindungen von S82 und S88 auf den Bolzen M39 x 305 mm sind keine Änderungen an den Gussteilen nötig. Während den regelmäßigen Revisionen der Gussteile sind Änderungen dazu leicht und ohne große Kosten möglich. Eine Kostenerhöhung durch den größeren Durchmesser der Bohrungen und Gewinde ist auszuschließen, da die Gussteilkostenstruktur an der Masse des Bauteils und an der Anzahl der zu bearbeitenden Flächen orientiert ist.

Es entfallen zwei Stehbolzenvarianten aus der gesamten Supply Chain und dem Product life cycle management (PLCM). Bei einer Jahresproduktion von 1500 S82 und S88 Anlagen ergibt sich eine neue Gesamtmenge von 18.000 studs der Größe M39 x 305 und 24.000 studs der Größe M39 x 550. Durch die Vereinheitlichung kann pro Anlage jeweils eine Sorte speziell gefertigter Stehbolzen entfernt werden und die Losgröße turbinenübergreifend verdoppelt werden. Damit verbunden führt auch ein neuer Mengenrabatt seitens des Bolzenherstellers zu einer Kostenoptimierung.

In einigen Suzlon Werken werden sowohl S82 als auch S88 Turbinen gefertigt, hier ermöglicht die Gleichteilstrategie wesentliche Erleichterungen bei der Lagerhaltung. Es müssen hier nicht vier sondern nur noch zwei verschiedene Bolzen gelagert und verwaltet werden. Als weitere Vorteile ergeben sich

minimierte Fahrwege in der Werkslogistik durch gleiche Paletteninhalte

weniger Werkzeuge (nur noch M39 Drehmomentenschrauber)

wegfallende Werkzeugrüstzeiten (kein Wechsel zwischen M36 und M39)

weniger Fehler durch verschiedene Anzugsmomente

weniger Anzugsanleitungen (gleiche Anziehmomente und Abstufungen)

Im weiteren Produktleben eine WKA spielen die Anlagenverfügbarkeit und damit die Anlagenwartung eine entscheidende Rolle. Umfangreiche Wartungshandbücher beschreiben jeden Komponente und somit auch die Schraubenverbindungen. Die HV-Verbindungen müssen nach 500 h und dann jährlich auf das Anzugsmoment überprüft werden. Hierzu sind die entsprechenden Werkzeuge in den Windparks vorzuhalten. Zusätzlich sind für

den Fall eines Bauteilwechsels die entsprechenden Ersatzteile vorrätig zu halten. Nur so können hohe Verfügbarkeiten und kurze Wartungen gewährleistet werden. Durch die Bolzenvereinheitlichung ergeben sich im späteren PLC unter anderem folgende Erleichterungen

weniger Werkzeuge bei der Wartung

weniger Wartungsfehler durch einfachere Manuals

weniger Ersatzteile in den Windparks

Ein noch größeres Optimierungspotential bieten die Verbindungen Pitchlager-Nabe, Rotorwelle-Nabe und die Turmverschraubungen. Hier sind aber weiterführende Vergleiche nötig, um den Umfang der konstruktiven Anpassungen abschätzen zu können. Das in Kapitel 3 genannte Potential in Fertigung und Produktleben ist auf jeden Fall bei allen Kleinteilen vorhanden. Zwar lassen sich die versteckten Kosten in Entwicklung, Einkauf, Fertigung, Controlling, Vertrieb und Service schwer kalkulieren, aber es ist fest anzunehmen, dass der Nutzen einer durchdachten Gleichteilstrategie den Aufwand bei weitem übertrifft. Nimmt man die in der Literatur [2] genannten 20 % Bauteilersparnis pro HV-Bolzensatz an, ergibt sich bei der S82 Turbine ein Potential von mehr als 1100,- €. Sicher ist auch bei effizientester Reduktion der Variantenvielfalt eine vollständige Vermeidung der Kostenremanenz nicht möglich, aber auch in der laufenden Fertigung sollte eine nachträgliche Senkung des Kostenniveaus möglich sein.

Literatur

[1] Conrad, Klaus-Jörg; *Taschenbuch der Konstruktionstechnik*; Leipzig: Fachbuchverlag, 2004. – ISBN 978- 3-446-41510-2

[2] Fischer, Jan; *Kostenbewusstes Konstruieren*; Berlin: Springer Verlag, 2008. – ISBN 978-3-540-78312-1

[3] 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

Anwendung des Theorems von Roberts/Tschebyschev zur CAD basierten und effizienten Auslegung teilflexibler Führungsgetriebe

Prof. Dr.-Ing. M. Berger, Dipl.-Ing. Falk Ebert

Professur Montage- und Handhabungstechnik,
Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik,
Technische Universität Chemnitz
Reichenhainer Str. 70, D-09126 Chemnitz
Email: maik.berger@mb.tu-chemnitz.de; falk.ebert@mb.tu-chemnitz.de
Internet: http://www.tu-chemnitz.de/mb/MHT

Inhalt: *Basierend auf den unabhängigen Entdeckungen von ROBERTS und TSCHEBYSCHEV, wonach jede Koppelkurve von nicht nur einem Getriebe exakt erzeugt wird, ergeben sich mit den heutigen Simulationstechniken und Antriebssystemen ganz neue Möglichkeiten zur Entwicklung antriebs- und funktionsoptimaler Führungsgetriebe. So können durch die funktionalen Möglichkeiten moderner CAD-Softwaresysteme und basierend auf dem Theorem von ROBERTS/TSCHEBYSCHEV nun sehr einfach Getriebestrukturen entwickelt und optimiert werden, die teilflexible Bewegungen durch die Anordnung von zwei Antrieben gestatten. Die Wirkung und Gestaltung der Antriebsbewegung, welche oftmals nur als lokale Verstellbewegung dient, hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtkonzept des Getriebes. Die Herausforderung bei der Entwicklung von Führungsgetrieben besteht darin, bauraumoptimale und energieeffiziente Antriebslösungen mit optimalen Verstellparametern zur teilflexiblen Manipulation von Bahnkurven oder auch Ebenenlagen zu gestalten.*

Abstract: *The theorem by Roberts and Chebyshev says that the curve generated by a given coupler point of a 4-bar mechanism can also be generated exactly by two other 4-bar and coplanar mechanisms. Nowadays we have great possibilities by the simulation and motion technology. By means of knowledge of the classical solution methods on the one hand and with the powerful features of the new CAD Systems on the other hand it is possible, to generate optimal linkages for path generation with part flexibilities in curve sections. During the CAD design process it is very easy to examine and compare the construction spaces and the energy-optimized drive solutions for different linkages and adjustments.*

Stichwörter: *Satz von ROBERTS/TSCHEBYSCHEV, Koppelgetriebe, Koppelkurve, Ersatzgetriebe, hybride Antriebssysteme*

Keywords: *ROBERTS-CHEBYSCHEV Theorem, Cognate Linkages, Coupler Curve, Hybrid Drive Systems*

1 Einleitung

Bei der Konzipierung von Übertragungs- und Führungsbewegungen werden mechanische und zwangläufige Getriebe mit nichtlinearem Bewegungsverhalten immer öfter durch freiprogrammierbare Mehrantriebssysteme mit kartesischen Achskonzepten ersetzt (Bild 1 links). Die Gründe dafür liegen einerseits im hohen Auslegungsaufwand zur Bestimmung der kinematischen Abmessungen, die für den Konstrukteur ohne getriebetechnisches Wissen und spezieller Software oftmals nur schwer zu bestimmen sind. Andererseits steht der grundsätzliche Wunsch nach vollflexiblen Antriebs- und Bewegungskonzepten im Focus vieler Neuentwicklungen.

Ist eine vollständige Flexibilität der Bewegung nicht zwingend erforderlich, so bieten einfache servoangetriebene Koppelgetriebe durchaus Vorteile. Neben den bekannten strukturellen Eigenschaften zur Änderung der Bewegungsformen oder des Bewegungsmaßes erfüllen solche Antriebssysteme auch in einfacher Weise die Zwanglaufkriterien zur Vermeidung von Havariesituationen. Ebenso lassen sich die Wirkungen der ungleichmäßig übersetzten Kräfte und Momente elegant für technologische Prozesse ausnutzen, wie z. B. die Kniehebelwirkung. Ein weitaus bedeutenderer Vorteil solcher Antriebssysteme besteht jedoch in der Erhaltung der im Mechanismus gespeicherten kinetischen Energie, insbesondere bei zyklisch wiederkehrenden Bewegungsaufgaben, wie sie z. B. in schnelllaufenden Verpackungs- und Druckmaschinen oder in Pick-and-Place Geräten zur Handhabung großer Stückzahlen auftreten [2]. Im Gegensatz zu den Linearantriebseinheiten ist die Arbeitsgeschwindigkeit eines Koppelgetriebes i. A. nicht durch die Leistungsfähigkeit des Antriebs begrenzt, sondern vielmehr durch die Belastbarkeit der Getriebeglieder und Gelenke infolge dynamischer Kräfte.

Um gezielt und effizient Koppelgetriebe für Führungsaufgaben mit einer gewünschten Teilflexibilität in den Bahn- oder Ebenenlagen entwickeln zu können, werden im Weiteren die strukturellen Grundlagen dieser Getriebe anhand eines Beispiels erläutert. Im Anschluss wird gezeigt, wie mittels heutiger CAD/CAE Systemfunktionalitäten weitere Getriebeanordnungen sehr einfach generiert werden können, um so die Auswahlmöglichkeiten zum Auffinden eines bauraumoptimalen und antriebseffizienten Gesamtkonzeptes zu unterstützen.

2 Manipulationsmöglichkeiten der Koppelkurve

Die Änderung der Lagen von Gestelllagerpunkten bzw. der Gliedabmessungen führt bei Führungsgetrieben, wie z. B. der im Bild 1 dargestellten Kurbelschwinge, auch zu Änderungen im Bahnverlauf. Werden nun diese Parameter durch einen zusätzlichen Antrieb taktbezogen gesteuert so ist es möglich, die Koppelkurve in einem bestimmten Bahnabschnitt gezielt an technologische Vorgaben anzupassen. Bild 1 zeigt eine Kurbelschwinge mit 2 Antrieben mit einer umlaufenden Kurbel l_2. Ein zweiter translatorischer Antrieb (Schieber) dient zur vertikalen Verschiebung des Kurbeldrehpunktes C. Beim Umlauf der Kurbel mit $l_2(\varphi)$ wird die fett dargestellte Koppelkurve $k_{31}(\varphi)$ generiert. Der Hüll- oder auch Manipulationsbereich der Bahnkurve k_{31}, gekennzeichnet durch die Kurvensegmente $k_{31}(s)$, entsteht durch die Bewegung des Schiebers für die zugeordneten Kurbellagen $l_2(\varphi)$. Im Bild wurden beispielhaft die Bahnkurven $k_{31}(s)$ für 10 Kurbelstellungen eingetragen und zur Abschätzung der Antriebsübersetzung der maximale Schieberhub so gewählt, dass er insgesamt der Kurbellänge l_2 entspricht. Hierdurch wird die Wirkung des Schubantriebs sehr deutlich. Eine optimale Manipulation der Bahnkurve ist nur dann möglich, wenn die Kurve $k_{31}(s)$ normal zum Verlauf der Bahnkurve $k_{31}(\varphi)$ ausgerichtet ist, da so die Übersetzung des translatorischen Verstellantriebs bezüglich des Koppelpunktes K am größten ist.

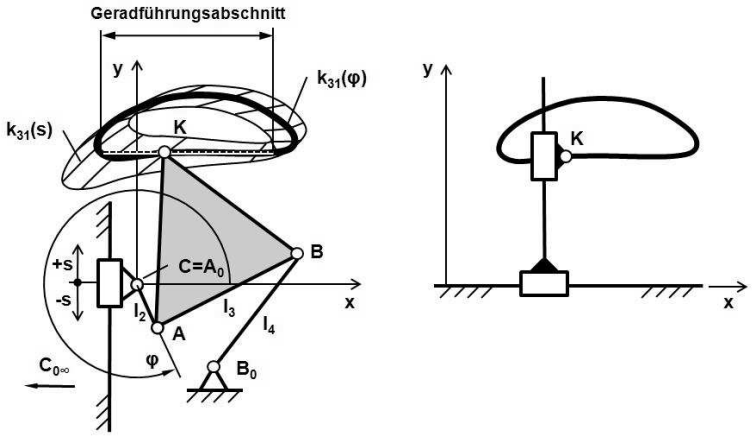


Bild 1: Koppelgetriebe mit Verstellantrieb zur gezielten Manipulation der Bahnkurve sowie Ersatz durch Linearantriebseinheit mit kartesischer Achsanordnung

Soll nun z. B. in die dargestellte Koppelkurve ein exakter Geradenabschnitt infolge technologischer Anforderungen teilweise integriert werden, so muss je nach Grundform der

Bahnkurve und wirkender Antriebsübersetzung ein solcher Verstellantrieb bestenfalls nur sehr kleine Korrekturbewegungen ausführen und auch dafür dimensioniert werden [3].

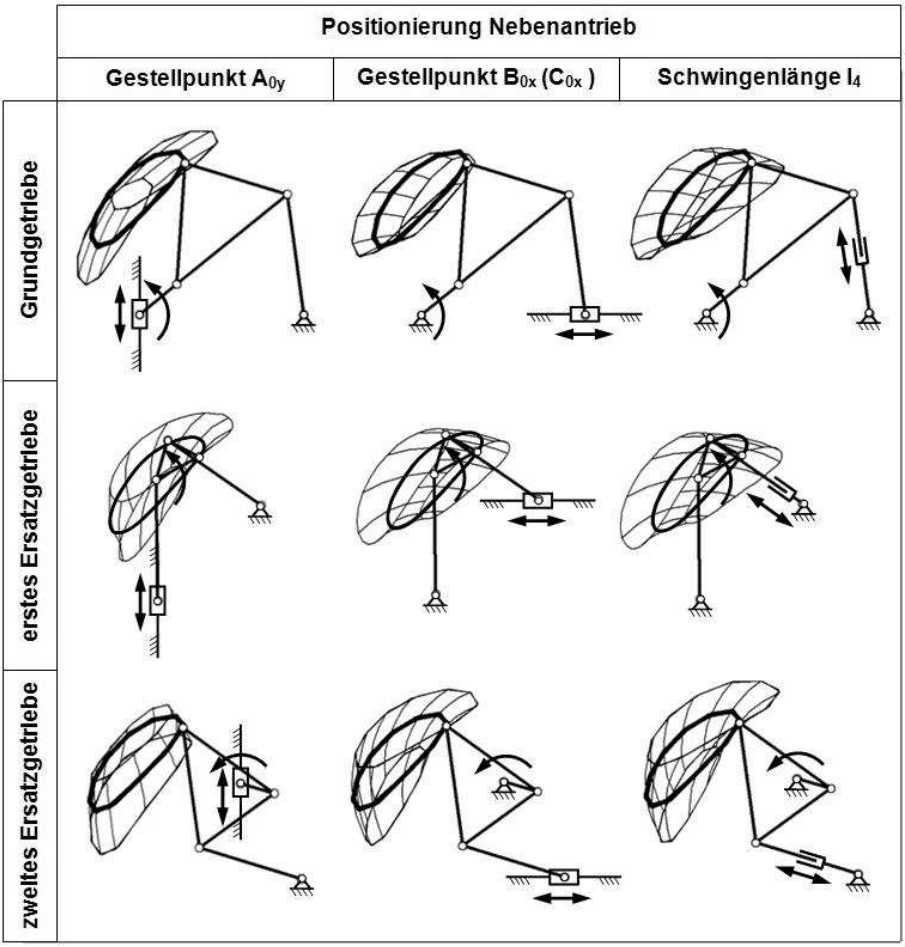


Bild 2: Einfluss der Lage des Verstellantriebs auf die Koppelkurven-Hüllbereiche im Grund und den zugehörigen Ersatzgetrieben für einen normierten Schieberverstellweg. (Auswahl)

Das wichtigste Verstellkriterium ist daher die Wirkung der Verstellbewegung auf den Bahnverlauf. Neben der Möglichkeit, die Verstellbewegung verschiedenartig einzuleiten gibt es darüber hinaus für 4gliedrige Koppelgetriebe zu jeder kinematischen Grundstruktur jeweils 2 so genannte Ersatzgetriebe, welche exakt den gleichen Bahnverlauf eines Koppelpunktes realisieren und dabei andere Verstellparameter erfordern.

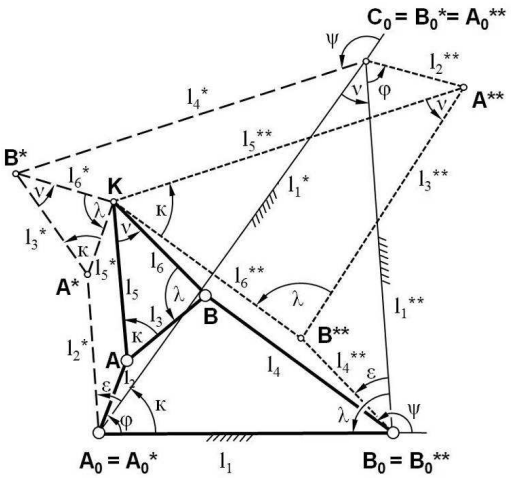
Im Bild 2 (oben) sind die Auswirkungen ausgewählter Antriebspositionierungen aufgezeigt und für ein vorgegebenes Grundgetriebe dargestellt. Durch die Berechnung der Ersatzgetriebe nach dem Theorem von ROBERTS/TSCHEBYSCHEV erhält man die kinematischen Abmessungen von jeweils 2 weiteren Getrieben. Ist das Grundgetriebe z. B. eine Kurbelschwinge, so werden als Ersatzgetriebe eine Kurbelschwinge und eine umlaufende Doppelschwinge gefunden. Die antriebsabhängigen Strukturuntersuchungen sind mit CAD- bzw. MKS-Tools leicht durchzuführen. Dafür werden für die zu variierenden Parameter z. B. zusätzliche Antriebe eingebaut und die Hüllbereiche der Koppelkurve durch geeignete Antriebsfunktionen als Spurkurven generiert. Die Berechnungsvorschriften für die Ersatzgetriebe können in Form von Algorithmen oder so genannten Beziehungen in der CAD-Umgebung direkt für die Konstruktionsabteilungen implementiert werden.
Zusammenfassend kann die Vorgehensweise zur Auslegung eines Koppelgetriebes mit Verstellantrieb wie folgt darstellt werden:

- Generierung von 4gliedrigen Koppelgetrieben in verschiedenen Strukturausführungen (z.B. Kurbelschwinge, Schubkurbel; umlaufend/schwingfähig). Hierzu können die Verfahren der Maßsynthese oder auch digitalen Koppelkurvenatlanten verwendet werden.
- Erweiterung der Strukturauswahl durch Berechnung der zugehörigen Ersatzgetriebe (siehe Kap. 3). Idealerweise werden die kinematischen Gliedabmessungen durch die Parametrierungsmöglichkeiten des CAD-Programms automatisiert.
- Bestimmung der Hüllbereiche der Koppelkurve durch Variation der Gestellpunktlagen und/oder Gliedabmessungen im Grund- und den Ersatzgetrieben.
- Auswahl des Getriebes mit den besten Verstellübersetzungen und u. U. den kleinsten Bauraumverhältnissen.
- Bestimmung und Optimierung der erforderlichen Antriebsfunktionen. Arbeitet ein Antrieb z.B. im Aussetzbetrieb, so sollten grundlegend stoß- und ruckfreie Übertragungsfunktionen im Anschluss zur Rast angestrebt werden [4].
- Detaillierung und Optimierung der Bauteile, Baugruppen und Antriebe durch MKS und FEM. Ggf. sind auch Maßnahmen zum dynamischen Massenausgleich vorzusehen.

3 Bestimmung der Ersatzgetriebe nach dem Satz von ROBERTS

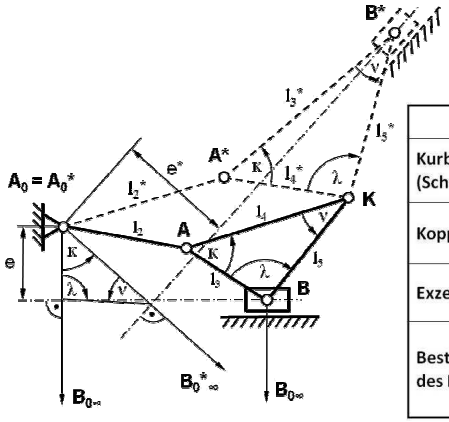
Ausgehend von der Bahnkurve eines 4gliedrigen Koppelgetriebes, dessen Abmessungen z. B. durch die Methoden der Maßsynthese bestimmt wurden oder aus einer Referenz

stammen, können die Ersatzgetriebe mit gleicher Bahnkurve exakt berechnet werden.



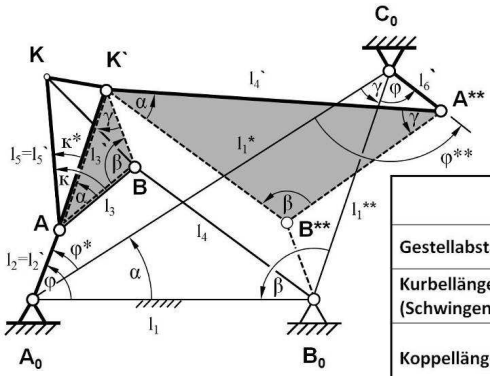
	Grund-getriebe	erstes Ersatzgetriebe	zweites Ersatzgetriebe
Gestellabstand	$l_1 = \overline{A_0B_0}$	$l_1^* = \overline{A_0C_0} = l_4\frac{l_5}{l_3}$	$l_1^{**} = \overline{B_0C_0} = l_1\frac{l_5}{l_3}$
Kurbellänge (Schwingenlänge)	$l_2 = \overline{A_0A}$	$l_2^* = \overline{A_0A^*} = l_3\frac{l_5}{l_3} = l_5$	$l_2^{**} = \overline{C_0A^{**}} = l_2\frac{l_6}{l_3}$
Koppellänge	$l_3 = \overline{AB}$	$l_3^* = \overline{A^*B^*} = l_2\frac{l_5}{l_3}$	$l_3^{**} = \overline{A^{**}B^{**}} = l_4\frac{l_6}{l_3}$
Schwingenlänge (Kurbellänge)	$l_4 = \overline{BB_0}$	$l_4^* = \overline{B^*C_0} = l_4\frac{l_5}{l_3}$	$l_4^{**} = \overline{B^{**}B_0} = l_3\frac{l_5}{l_3} = l_5$
Bestimmungstücke des Koppelpunkts	$l_5 = \overline{AK}$	$l_5^* = \overline{A^*K} = l_2$	$l_5^{**} = \overline{A^{**}K} = l_4\frac{l_5}{l_3} = l_4^*$
	$l_6 = \overline{BK}$	$l_6^* = \overline{B^*K} = l_2\frac{l_6}{l_3}$	$l_6^{**} = \overline{B^{**}K} = l_4$

Bild 3: Bestimmung der 4gliedrigen ROBERTSschen Ersatzgetriebe - nur Drehgelenke



	Grundgetriebe	Ersatzgetriebe
Kurbellänge (Schwingenlänge)	$l_2 = \overline{A_0A}$	$l_2^* = \overline{A_0^*A^*} = l_3\dfrac{l_4}{l_3} = l_4$
Koppellänge	$l_3 = \overline{AB}$	$l_3^* = \overline{A^*B^*} = l_2\dfrac{l_4}{l_3}$
Exzentrizität	e	$e^* = e\dfrac{l_4}{l_3}$
Bestimmungstücke des Koppelpunkts	$l_4 = \overline{AK}$	$l_4^* = \overline{A^*K} = l_2$
	$l_5 = \overline{BK}$	$l_5^* = \overline{B^*K} = l_2\dfrac{l_5}{l_3}$

Bild 4: Bestimmung des 4gliedrigen ROBERTSschen Ersatzgetriebes - mit einem Schubgelenk



	4gliedgriges Grundgetriebe	5gliedriges Ersatzgetriebe
Gestellabstand	$l_1 = \overline{A_0B_0}$	$l_1^* = \overline{A_0C_0}$
Kurbellänge (Schwingenlänge)	$l_2 = \overline{A_0A}$	$l_2' = \overline{\overline{A_0A}} = l_2$
Koppellänge	$l_3 = \overline{AB}$	$l_3' = \overline{AK'} = l_3\dfrac{l_1^*}{l_1}$
Schwingenlänge (Kurbellänge)	$l_4 = \overline{BB_0}$	$l_4' = \overline{A^{**}K'} = l_4\dfrac{l_1^*}{l_1}$
Kurbellänge	-	$l_6' = \overline{C_0A^{**}} = l_2\dfrac{l_1^{**}}{l_1}$
Bestimmungstücke des Koppelpunkts	$l_5 = \overline{AK}$	$l_5' = \overline{AK} = l_4$
	κ	$\kappa' = \kappa - \alpha$
Antriebswinkel	φ	$\varphi^* = \varphi - \alpha$
		$\varphi^{**} = \varphi + \gamma$

Bild 5: Bestimmung der 5gliedrigen ROBERTSschen Ersatzgetriebe - mit 2 Antrieben

Hierzu dient der Satz von Roberts/Tschebyschev [1, 5, 6, 7], nach dem dieselbe Koppelkurve für 4gliedrige Koppelgetriebe mit Drehgelenken durch jeweils zwei weitere 4gliedrige

Koppgetriebe mit Drehgelenken (Bild 3) und für 4gliedrige Koppelgetriebe mit einem Schieber im Gestell durch ein weiteres 4gliedriges Koppelgetriebe mit Gestellschieber (Bild 4) erzeugt werden kann.

Neben den 4gliedrigen Koppelgetrieben können auch ∞^2 5gliedrige Koppelgetriebe mit 2 Antrieben und veränderlichen Gestellabmessungen zur Lösung einer Führungsaufgabe gefunden werden. In diesem Fall müssen beide Antriebe mit gleicher Winkelgeschwindigkeit laufen, was zum Beispiel durch eine Zahnriemenstufe mit konstanter Übersetzung +1 oder zwei synchron laufende Einzelantriebe verwirklicht wird. Ferner gibt das 5gliedrige Ersatzgetriebe dem Konstrukteur viel Freiraum, um den zweiten Lagerpunkt C_0 in der Gestellebene zu wählen. Zur besseren Verständlichkeit wurden im Bild 5 die geometrischen Abmessungen des Grundgetriebes analog zum Bild 3 ausgeführt. Es handelt sich in diesem Beispiel somit um ein rein schwingfähiges Getriebe. Das bedeutet, dass die Antriebsglieder zwar synchron laufen aber nicht umlauffähig sind.

Basierend auf den hier vorgestellten kinematischen Zusammenhängen können nachfolgend CAD integriert umfangreiche Varianten- und Parameterstudien zur Auswahl und Dimensionierung eines teilflexiblen Führungsgetriebes folgen.

Literatur

[1] Kerle, H.; Pittschellis, R.; Corves, B.: Einführung in die Getriebelehre, 3. Auflage, Teubner, Wiesbaden 2007

[2] Braune, R.: Koppelgetriebe mit Servo-Antrieb in schnellen Verpackungsmaschinen. Fachtagung „Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik“, TU Dresden, 2006

[3] Berger, M.; Matthes, J.: Hybride Antriebssysteme zur Erzeugung veränderlicher Übertragungs- und Führungsbewegungen, EMA VDI-Bericht 2006

[4] Berger, M.: Ein Beitrag zur Manipulation von Bahnkurven ebener servoangetriebener Koppelgetriebe. Dissertation, Fortschrittberichte VDI Reihe 8 Nr. 604, VDI Verlag, Düsseldorf 1997

[5] Günzel, D.: Koppelkurvenatlas ebener viergliedriger Gelenkgetriebe. Verlag Shaker, Aachen 1995

[6] Gasse U.: Beitrag zur mehrfachen Erzeugung der Koppelkurve. wissenschaftliche Zeitschrift der TH Magdeburg, 11/1967, S. 307-311

[7] Meyer zur Capellen, W.: Bemerkungen zum Satz von Roberts über die dreifache Erzeugung der Koppelkurve. Konstruktion 8 (1956) II. 7, S. 268-270

Modellierung und Simulationen zum Kegelradfräsen – Analyse der Werkzeugbelastung

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke
Dipl.-Ing. Stefan Herzhoff

Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
WZL, RWTH Aachen
Steinbachstraße 19, D-52074 Aachen
E-Mail: s.herzhoff@wzl.rwth-aachen.de; Internet: http://www.wzl.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing Christian Brecher
Dipl.-Ing. Ario Hardjosuwito

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

Inhalt: *Aufgrund seiner Komplexität ist es bisher nicht möglich, den Prozess des Kegelradfräsens hinsichtlich der Werkzeugbelastung ausreichend zu analysieren. Angesichts der enormen wirtschaftlichen Bedeutung der Werkzeugstandzeit ist eine Analyse der Spanungsgeometrien und der Werkzeugbelastung unabdingbar. Deshalb wurde am WZL ein Simulationssystem („KegelSpan") zum Kegelradfräsen entwickelt, welches eine Analyse der. Der Simulation werden sowohl die Werkstückgeometrie, die Werkzeuggeometrie, die Prozessparameter als auch die Achsbewegungen vorgegeben. In der Simulation werden diverse Spanungsgeometriekenngrößen berechnet. Oft wird beim Kegelradfräsen erhöhter Werkzeugverschleiß im Bereich des Eckenradius festgestellt, was auf eine lokale Belastungsüberhöhung hindeutet, die sich auf Basis der Durchdringungsrechnung nicht erklären lässt. Zur Analyse der lokalen Werkzeugbelastung ist es notwendig, die Spannungs- und Temperaturverteilung an der Schneidkante des Werkzeugs zu bestimmen. Die benötigten Größen können messtechnisch jedoch nicht mit der geforderten hohen lokalen Auflösung entlang der Schneidkante ermittelt werden. So lassen sich beispielsweise die Schnittkräfte nur als integraler Wert oder die Temperatur als Mittelwert über einen Bereich der Schneidkante messen. Daher wird der Spanbildungsvorgang am WZL in einer FE-basierten 3D-Zerspansimulation analysiert. Mit Hilfe dieser Zerspansimulation ist es gelungen die Belastungsüberhöhung im Werkzeugeckenradius nachzuweisen. Die Ergebnisse der Fertigungssimulation und der Zerspansimulation werden zukünftig in einem Modell zur Verschleißvorhersage zusammengefasst. In Rahmen des Vortrags werden beide Simulationsmodelle am Beispiel eines Verzah-*

nungsfalls vorgestellt und die am Werkzeug auftretenden Belastungen mit dem Verschleißbild verglichen. Die Ergebnisse der FE-Zerspansimulation und der Fertigungssimulation „KegelSpan" zeigen gute Übereinstimmungen mit dem Verschleißbild der Werkzeuge beim Kegelradfräsen. Die Ausbrüche am Eckenradius sind auf eine thermische und mechanische Überbelastung dieses Schneidenbereichs zurückzuführen. Mit Hilfe beider Simulationsmodelle ist es erstmals möglich den Prozess des Kegelradfräsens hinsichtlich der Werkzeugbelastung detailliert zu analysieren. Hieraus lässt sich in Zukunft eine Optimierung des Fräsprozesses und der Prozesssicherheit realisieren. Zukünftig ist das Ziel, weitere Kenngrößen zur Verschleißanalyse zu ermitteln. Neben dem Eckenradius scheint insbesondere die üblicherweise vorhandene Überlappung der Werkzeugeingriffsbereiche einen starken Einfluss auf den Werkzeugverschleiß auszuüben. Dies gilt es in weiteren Arbeiten zu untersuchen. Die Entwicklung der Software „KegelSpan" wird vom WZL-Getriebekreis finanziert. Die Untersuchung der Werkzeugbelastung bei mehrflankiger Spanbildung wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Abstract: *Currently it is not possible to analyse the bevel gear cutting process sufficiently because of its complexity. Hence simulation software ("KegelSpan") has been developed at WZL which enables an analysis of the tool load based on calculated chip creation parameters. As an input the workpiece geometry, the process parameters and the axis motions are needed. The software simulates the complex process kinematics and calculates different chip creation parameters based on penetration calculation. Often in bevel gear cutting an increased tool wear in the area of the corner radius is observed. It is caused by a local overload which cannot be determined by the penetration calculation. The distribution of stress and temperature at the cutting edge has to be determined in order to analyse the local tool load. The necessary parameters cannot be measured with regard to the demanded high resolution along the cutting edge. E.g. cutting forces can only be measured along the cutting edge as an integral value or temperature as a mean value. Thus the process of chip creation have been analysed at WZL by using an FE-based cutting simulation. The report presents both simulation models and an analysis of the appearing tool load compared with real tool wear. The results of the simulation models are in a good accordance to the tool wear behaviour. In the future the models of the process analysis and the cutting simulation will be merged in one model for predicting tool wear.*

Stichwörter: *Kegelradfräsen, Mehrflankenspan, Zerspansimulation, Fertigungssimulation*

Keywords: *bevel gear cutting, multi flank chip, cutting simulation, manufacturing simulation*

1 Einleitung

Durch das kaum reproduzierbare Verschleißverhalten der Werkzeuge beim Kegelradfräsen kommt es immer wieder zu Produktionsunterbrechungen, z.B. in Form von außerplanmäßigen Werkzeugwechseln. Dieses Defizit in der Prozesssicherheit gilt es mit Hilfe einer Standzeitoptimierung der Werkzeuge zu vermeiden. Eine Standzeitoptimierung bietet somit ein hohes Potential zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Kegelradfräsprozesses. Diese Optimierung kann jedoch erst durch eine Analyse bzw. Vorhersage der

Werkzeugbelastung erreicht werden. Aufgrund seiner Komplexität ist es bisher nicht möglich den Prozess des Kegelradfräsens hinsichtlich der Werkzeugbelastung ausreichend zu analysieren. Angesichts der enormen wirtschaftlichen Bedeutung der Werkzeugstandzeit ist eine Analyse der Spanungsgeometrien und der Werkzeugbelastung unabdingbar. Deshalb wurde am WZL ein Simulationssystem („KegelSpan“) zum Kegelradfräsen entwickelt [1], welches eine Analyse der Werkzeugbelastung ermöglicht. Der Simulation werden die Werkstückgeometrie (Tellerrad oder Ritzel), die Werkzeuggeometrie, die Prozessparameter und die Achsbewegungen vorgegeben. In der Simulation wird die komplexe Prozesskinematik abgebildet und, basierend auf einer dreidimensionalen Durchdringungsrechnung, diverse Spanungsgeometriekenngrößen berechnet, siehe Bild 1.

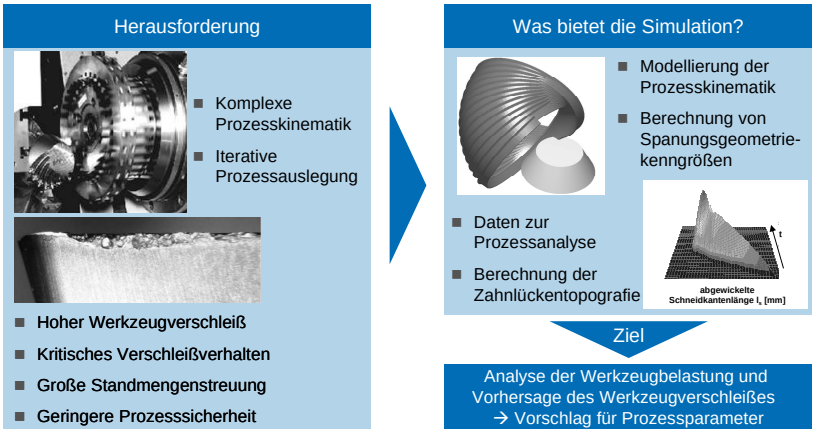


Bild 1: Problemstellung beim Kegelradfräsen

Die Eingriffsverhältnisse von Werkzeug und Werkstück werden für jeden Schnitt mit Hilfe der Prozesskinematik abgebildet. Der Werkzeughüllkörper, der den zeitlichen Verlauf der Schneide darstellt, durchdringt mit zunehmendem Vorschub das Werkstück. Die Schnittmenge beider Körper (Durchdringungsbereich) stellt die unverformte Spanungsgeometrie dar. Basierend auf den berechneten Eingriffsverhältnissen zwischen Werkzeug und Werkstück können auf Basis der Spanungsgeometrien Spanungsgeometriekenngrößen ermittelt werden. Hierzu zählen Belastungskollektive basierend auf den berechneten Spanungsdicken, Wirkwinkel (Span- und Freiwinkel) sowie Wirklängen der einzelnen Schneidenbereiche. Die Kenngrößen geben Aufschluss über die Belastung einzelner Schneidenbereiche. Darüber hinaus berechnet das Simulationssystem die resultierende Zahnlückengeometrie des Werkstücks. Sowohl die Lückengeometrie, welche als Eingangsgröße für

eine Zahnkontaktanalyse dienen kann, als auch die berechneten Spanungsgeometrien können als 3D CAD-Modelle gespeichert werden.

2 Verschleißverhalten der Werkzeuge

Um zu verdeutlichen, dass die Werkzeugbelastung und der resultierenden Werkzeugverschleiß korrelieren, wird im Rahmen dieses Berichtes exemplarisch der in Bild 2 dargestellte Fräsprozess eines Tellerrades analysiert. Es handelt es sich um einen Tauchprozess im sogenannten Einzelteilverfahren (engl. Face Milling).

- Werkstück:
  - z = 37
  - m_{nm} = 4,138 mm
  - β_m = 29,94°
  - d_{ae} = 210 mm
- Werkzeug:
  - Messerkopf:
    - ARCON II 14-7,6“ RH; Innen- & Außenmesser
  - Stabmesser:
    - r_ε = 1,528 mm
    - α_{fx} = 30,6°; α_{fv} = 8,23°
- Ausgangsprozess:
  - Tauchprozess, Einzelteilverfahren
  - f_{MG} = 0,12 - 0,18 mm
  - v_c = 280 - 380 m/min

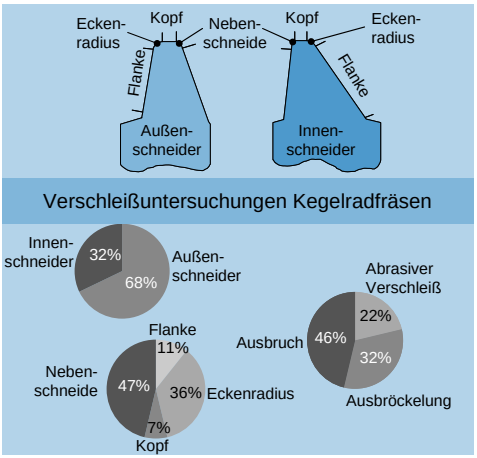


Bild 2: Verschleißuntersuchungen zum Tellerradfräsen

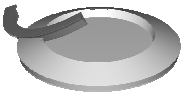
Hierbei wird zunächst eine Lücke des Werkstücks gefertigt, ehe das Werkstück um eine Teilung weitergedreht wird, um somit die nächste Lücke fertigen zu können. Beim Werkzeugkonzept handelt es sich um einen Messerkopf, auf dem so genannte Messergruppen, bestehend aus Innen- und Außenschneidern, kreisbogenförmig angeordnet sind. Aus Versuchen von Klein [2] ergibt sich das abgebildete Standzeitverhalten von Innen- und Außenmesser. Bei den Ergebnissen sind prinzipiell zwei Bereiche an den Werkzeugen als standzeitbestimmende Bereiche hervorzuheben. Zum einen der Eckenradius der Hauptschneide, bei dem der Verschleiß in 36% der Versuche zum Standzeitende führte. Zum anderen ist der Übergang zur Nebenschneide kritisch, an dem 47% der Versuche das Standzeitende erreichten. Hier überlappen Innen- und Außenschneider, damit im Zahnfuß keine Finne verbleibt. Auffällig ist, dass die verwendeten Werkzeuge zu 78 % durch Ausbrüche oder Ausbröckelungen versagen. Dies deutet auf eine mechanische Überlastung

der Werkzeuge hin. Weiterhin ist anzumerken, dass das Standzeitende in 68% der Fälle am Außenschneider erfolgte. Daher liegt der weitere Fokus auf den beiden Bereichen des Eckenradius der Haupt- und Nebenschneide des Außenschneiders.

3 Analyse der Belastung des Werkzeugeckenradius

Am Eckenradius des Außenschneiders treten meist Ausbrüche als standzeitbestimmender Verschleiß auf, was auf eine mechanische Überlastung hindeutet, Bild 3.

- Beschreibt die Häufigkeitsverteilung der Spanungsdicke h_{cu}
- Prozess:
  - f_{MG} = 0,12 mm
  - v_c = 280 m/min
- Hier: größte Belastungen am Eckenradius der Hauptschneide des Außenmessers



Ergebnisse „KegelSpan“

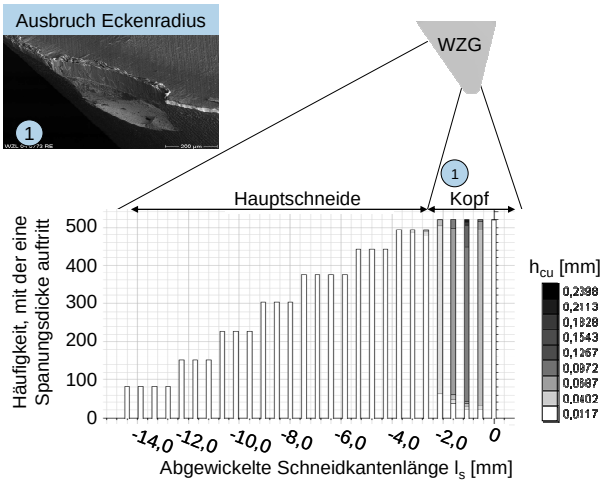


Bild 3: Histogramm: Belastungskollektiv der Spanungsdicken am Außenschneider

Maßgeblich für die mechanische Belastung der Schneidkante ist die Spanungsdicke. Um die Belastung des Außenschneiders zu analysieren wurde das Belastungskollektiv der Spanungsdicken mit der Simulation „KegelSpan“ berechnet, Bild 3. Hierzu wurde die Schneidkante entlang des Profils abgewickelt und auf der Abzisse aufgetragen. Anhand der abgewickelten Schneidkantenlänge l_s können die berechneten Spanungsdicken h_{cu} den jeweiligen Schneidenbereichen zugeordnet werden. Die größte Anzahl an Spanungsdicken wurde für den Zahnkopf errechnet, was an der Höhe der Säulen zu erkennen ist. Die Farbskalierung der einzelnen Bereiche gibt die Größe der jeweiligen berechneten Spanungsdicken an. Es wird deutlich, dass im Übergangsbereich zur Hauptschneide, am Eckenradius, die höchsten Belastungen vorherrschen, da hier die meisten und größten Spanungsdicken ermittelt wurden. Somit ist das Verschleißverhalten am Eckenradius qualitativ reproduzierbar und plausibel. Die Ergebnisse aus der 3D-Fertigungssimulation „Ke-

gelSpan“ sind rein geometrisch, so dass beispielsweise die Stauchung des Spans nicht berücksichtigt werden kann. Eine Analyse der Werkzeugbelastung oder des Verschleißverhaltens kann in „KegelSpan“ nur basierend auf technologischen oder geometrischen Kenngrößen erfolgen. Diese Kenngrößen basieren traditionell auf Untersuchungen des Drehprozesses. Im Vergleich dazu ist die Spanbildung beim Kegelradfräsen durch hohe Spanungsbreiten, geringe Spanungsdicken, mehrflankige Späne und einen unterbrochenen Schnitt gekennzeichnet. Um den Zerspanbedingungen beim Kegelradfräsen gerecht zu werden, wird der Prozess mithilfe einer 3D-Zerspansimulation näher untersucht.

Die FE-basierte Zerspansimulation bietet den Vorteil, neben der Spannungsverteilung im Werkzeug auch die thermische Belastung der Schneidkante abbilden zu können [3]. Die Simulation wird mit Hilfe der kommerziellen Software SFTC Deform 3D durchgeführt. In Bild 4 sind ausgewählte Ergebnisse der Zerspansimulation für die Eingriffsbedingungen des hier betrachteten Außenschneiders dargestellt. Hierbei wird bewusst auf den Bereich der Überlappung verzichtet, um nur die Belastungen, die aus der Spanbildung herrühren, abzubilden. Problematisch bei der Zerspansimulation sind die hohen Rechenzeiten von mehreren Wochen, daher wird in der Simulation, wie im Bild angedeutet, nur ein Werkstücksegment abgebildet. Im unterbrochenen Schnitt ist grade der Anschnitt interessant, da sich hier die Belastungszustände am Werkzeug sehr schnell ändern. Die Simulation wurde nach $s_c = 1{,}4$ mm ausgewertet, der gesamte Schnitt hat eine Länge von etwa $l_c = 35$ mm. Oben rechts ist der Spannungszustand an der Schneidkante in Form der Vergleichsspannung nach von Mises dargestellt. Im Bereich der Flankenschneide sowie der Kopfschneide stellt sich eine gleichmäßige Spannungsverteilung ein. Deutlich erkennbar ist, dass am Eckenradius unterhalb der Schneidkante ein lokales Maximum auftritt. Unten rechts ist die Temperaturverteilung an der Spanunterseite dargestellt. Die Wärmeentstehung resultiert aus den Umformvorgängen im Span und den Reibvorgängen zwischen Span und Spanfläche.

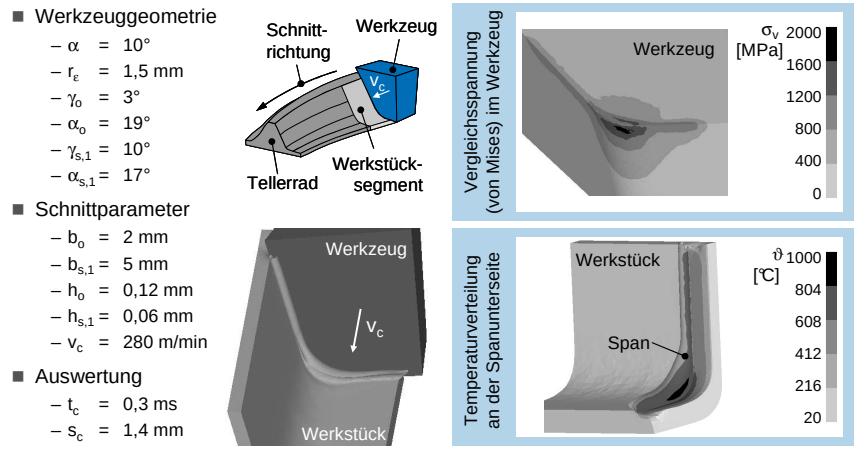


Bild 4: Ausgewählte Ergebnisse der Zerspansimualtion

Auch hier ergibt sich bereits nach wenigen Millisekunden ein deutliches lokales Temperaturmaximum im Bereich des Werkzeugeckenradius. Anders als die Spannungen, die sich unmittelbar mit dem Auftreten der äußeren Belastung einstellt, ist der Wärmeübergang zwischen Span und Werkzeug zeitabhängig. Daher ist zu vermuten, dass sich diese ungleichmäßige Temperaturverteilung im Werkzeug erst zum Schnittende hin aufbaut. Die Ergebnisse der Zerspansimulation zeigen, dass die Werkzeuge beim Kegelradfräsen im Bereich des Werkzeugeckenradius sowohl mechanisch als auch thermisch deutlich stärker belastet sind als an den übrigen Bereichen der Schneidkante. Diese lokale Überbelastung deckt sich mit dem auftretenden Verschleißbild.

5 Analyse der Überlappung von Innen- und Außenschneider

Neben dem Eckenradius der Hauptschneide wurde ebenfalls erhöhter Verschleiß an der Nebenschneide beobachtet. Wie aus Bild 3 deutlich wird, wurde im Bereich der Nebenschneide keine Spanbildung vollzogen, daher muss das vorzeitige Standzeitende aufgrund eines Ausbruchs andere Gründe haben. In Bild 5 ist der Überlappungsbereich von Innen- und Außenschneider dargestellt. Hieraus wird erkennbar, dass der Freiraum zwischen der Nebenschneide des Außenmessers und linken Werkstückflanke geringer ist, als der Freiraum zwischen der Hauptschneide des Außenmessers und rechten Werkstückflanke.

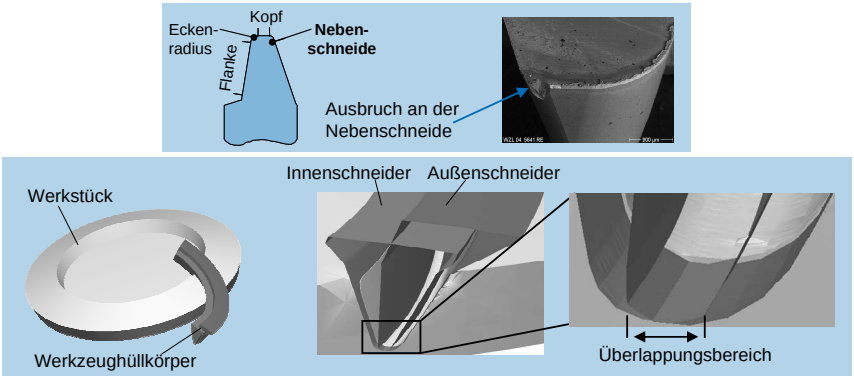


Bild 5: Überlappungsbereich der Eingriffsbereiche von Innen- und Außenschneider

Dieser Unterschied der Zwischenräume deutet auf eine Erschwerung des Spanablaufs (Spanablaufbehinderung) an der Nebenschneide hin. Beim Kegelradfräsen kommt es immer wieder zu Spanablaufbehinderungen zwischen Werkstückflanke und Werkstück, was unter anderem auf die dargestellten, zu geringen Zwischenräume von Werkzeug und Werkstück zurückzuführen ist. Da in diesem Bereich der Werkzeugschneide kein Span abgenommen wird, ist dieses Phänomen nicht anhand der Spanungsgeometriekenngrößen zu analysieren. Jedoch zeigen die graphischen Auswertungen, in Form von CAD-Dateien, eine gute Möglichkeit derartige Problematiken schnell zu erkennen und zu analysieren, wie in Bild 5 gezeigt. Welchen Einfluss die Größe des Überlappungsbereichs auf den Werkzeugverschleiß ausübt, gilt es zukünftig in weiteren Versuchen herauszufinden.

Literatur

[1] Brecher, Christian; Gorgels, Christof; Hardjosuwito, Ario: *Analyse der Werkzeugbelastung beim Kegelradfräsen mittels 3D-Simulation*, Simulation im Produktentstehungsprozess (SIMPEP), Veitshöchheim, 2009.

[2] Klein, Alexander: Spiral Bevel and Hypoid Gear Tooth Cutting with Coated Carbide Tools, Dissertation, RWTH Aachen

[3] Klocke, Fritz; Gorgels, Christof; Herzhoff, Stefan: *Einsatz von FE-Zerspansimulation zur Analyse der Werkzeugbelastung bei Mehrflankenspanbildung*, Simulation im Produktentstehungsprozess (SIMPEP), Veitshöchheim, 2009.

Unterstützung der Konstruktion von Stetigförderern durch die Simulation des dynamischen Systemverhaltens

Dipl.-Ing. Jan Eggert, Dipl.-Ing. B. Benthaus
Prof. Dr.-Ing. B. Künne, Prof. Dr.-Ing Dr.-Ing. S. Kulig

Fachgebiet Maschinenelemente, Technische Universität Dortmund
Leonhard-Euler-Straße 5, 44227 Dortmund
Email: jan.eggert@tu-dortmund.de, Internet: http://www.maschinenelemente.info
und
Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Mechatronik, Technische Universität Dortmund
Emil-Figge-Str. 70, 44227 Dortmund
Email: burkhard.benthaus@tu-dortmund.de, Internet: http://www-mal.e-technik.tu-dortmund.de/

Inhalt: *Die steigenden Anforderungen an moderne Materialflussanlagen, wie zum Beispiel hohe Verfügbarkeiten, führen auch bei der Konstruktion dieser Anlagen zu einer Steigerung der Anforderungen. Eine Schwierigkeit bei der Konstruktion ist, dass die genauen Belastungen der Komponenten selten bekannt sind und somit mit Sicherheitsbeiwerten gearbeitet werden muss. Um eine genauere Auslegung der Komponenten zu ermöglichen und Überdimensionierungen zu vermeiden, ist somit eine genauere Kenntnis der Belastungen erforderlich. Aus diesem Grund stellt dieser Beitrag einen Ansatz zur Simulation des dynamischen Systemverhaltens am Beispiel eines Rollenförderers dar. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der Berücksichtigung der elektromechanischen Kopplung zwischen dem mechanischen und dem elektrischen Teilsystem.*

Abstract: *The increasing requirements for current material flow systems, i.e. for example high operational availability, also leads to increasing requirements, which have to be considered during the design process. The fact that exact values for the load of the components are often unknown causes difficulties during the design process and leads to the use of factors of safety. If the actual loads are determined more precisely, a more accurate design can be developed and unnecessary oversizing can be prevented. Therefore this paper presents an approach to simulate the dynamic system behavior using the example of a roller conveyor. A strong emphasis has been put on the electromechanical coupling of the electrical and mechanical subsystems.*

Stichwörter: *Mechatronik, Euler-Lagrange, dynamisches Verhalte, Stetigförderer, Rollenförderer.*

Keywords: *mechatronics, Euler-Lagrange, dynamic behavior, continuous conveyor, roller conveyor.*

1 Einleitung/Stand der Technik

Mit dem zunehmenden Materialfluss der letzten Jahre steigen die Anforderungen, die an moderne Materialflussanlagen gestellt werden. Dazu gehören unter anderem eine hohe Verfügbarkeit und eine damit verbundene geringe Ausfallwahrscheinlichkeit. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, muss bereits in der Planungsphase intralogistischer Förderanlagen ein besonderes Augenmerk auf diese Aspekte gelegt werden. Als Konsequenz daraus steigen somit die Anforderungen an die zugrunde liegenden Konstruktionen ebenfalls. Der Konstrukteur muss immer mehr Anforderungen gleichzeitig beachten und berücksichtigen. Heutzutage ist es üblich, unterschiedliche Simulationstechniken als Hilfsmittel bei der Konstruktion zu verwenden. Insbesondere bei der Auslegung von hoch belasteten Komponenten kommen beispielsweise die Methoden der Finiten Elemente zum Einsatz. Unbekannt ist jedoch in vielen Fällen, welche Lasten von außen tatsächlich auf ein Bauteil aufgeprägt werden. Die Frage, ob es sich um statische oder dynamische Lasten handelt, kann oftmals beantwortet werden. Jedoch fällt es schwer, die Lasten zu quantifizieren, wie z.B. die Amplitude und Frequenz bei schwellenden oder wechselnden Lasten. Während des Konstruktionsprozesses wird aus diesem Grund in der Regel mit Sicherheitsbeiwerten gearbeitet, um unbekannte Einflussgrößen und ähnliche Effekte berücksichtigen zu können [1]. Diese Vorgehensweise führt dazu, dass intralogistische Förderanlagen in vielen Fällen überdimensioniert werden.

Mit Hilfe der in diesem Beitrag behandelten Simulation wird es möglich, die von außen aufgeprägten Lasten für einzelne Bauteile besser abzuschätzen. Darüber hinaus wird die elektromechanische Wechselwirkung zwischen dem elektrischen Antrieb und den mechanischen Komponenten berücksichtigt, welche bis dato in den meisten Fällen vollständig vernachlässigt wird. Die Simulation soll hierbei am Beispiel des Rollenförderers aus dem Bereich der Stetigfördertechnik erläutert werden. Gerade in diesem Bereich wird oftmals basierend auf Erfahrungswerten entwickelt, ohne jedes Bauteil exakt auszulegen. Ein Grund dafür ist der wachsende Bedarf an Fördertechnik mit der damit verbundenen Verkürzung von Innovationszyklen und einer rasant steigenden Anzahl an Produktvarianten [2]. Ebenfalls wird angestrebt, die Fördertechnik in Baukastensystemen anzubieten, um so mit vertretbarem Aufwand ein breites Spektrum an Anwendungsfällen abzudecken und für mögliche Erweiterungen flexibel zu sein.

2 Auswirkungen verschiedener Belastungsarten

Der Einfluss von äußeren Belastungen kann im Bereich der Stetigförderer sehr unterschiedlich ausfallen. Grundsätzlich muss bei jeder Auslegung ermittelt werden, welche Kräfte auf die verbauten Komponenten einwirken. Ist solch ein Kraftkollektiv ermittelt und wird dessen zeitliche Veränderung ebenfalls erfasst, handelt es sich in diesem Zusammenhang um das Belastungsprofil, das auf eine Komponente wirkt. Am Beispiel des Rollenförderers sind einige relevante Komponenten zu nennen, die während des regulären Förderprozesses den externen Belastungen, die durch das Fördergut hervorgerufen werden, ausgesetzt sind. Dazu zählen beispielsweise die Abtriebswelle des elektrischen Antriebes, der kraftübertragende Antriebsriemen, sowie die Tragrollen, die das eigentliche Fördergut abstützen (vgl. Bild 1).

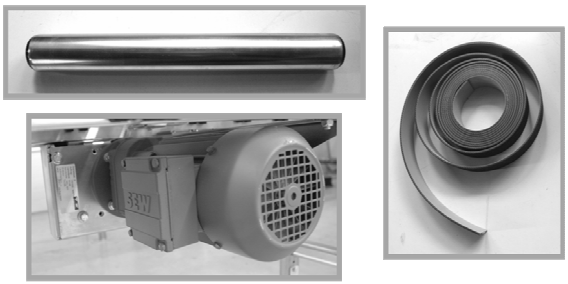


Bild 1: Belastete Komponenten eines Stetigförderers

In Bezug auf die Beanspruchung und Dauerfestigkeit der betrachteten Komponenten ist bei der Art der Belastungen von entscheidender Bedeutung, ob es sich hierbei um statische oder dynamische Belastungsarten handelt. Die erwähnten Komponenten werden im Betrieb auf Biegung, Zug und Druck belastet. Zusätzlich wirken Momente, die einige der Komponenten zusätzlich tordieren. Neben den rein statischen Belastungen wird bei den dynamischen Belastungen zwischen schwellenden und wechselnden Belastungen unterschieden. In realen Anwendungsfällen ist häufig mit einer Kombination der drei Arten zu rechnen.

Als Beispiel eines verbauten Maschinenelements innerhalb des Rollenförderers wird an dieser Stelle die Abtriebswelle des elektrischen Antriebs herangezogen. Diese wird durch eine Kombination aus dem Drehmoment und einer radial auf die Welle wirkenden Kraft belastet, die durch die Vorspannkraft des Antriebsriemens aufgeprägt wird. Durch die Überlagerung der beiden Funktionen „Tragen“ (Radialkraft) und „Leiten“ (Moment) ergibt

sich eine Kombination der Belastungen auf die Welle. Die Torsion kann als eine ruhende bzw. schwellende Belastung angenommen werden. Die Belastung durch die Radialkraft stellt, aufgrund der Drehbewegung, eine wechselnde Biegebelastung für die Welle dar.
Bei solch einer mehrfach belasteten Welle werden die auftretenden Spannungen zu einer Vergleichsspannung zusammengefasst, die als eine Biegespannung betrachtet wird, welche um die Einflüsse der Torsionsspannung, Normalspannung und Scherspannung ergänzt wird [1]. Nachdem die Vergleichsspannung bestimmt ist, wird für die betrachtete Welle eine zulässige Spannung berechnet. Dieser Wert beschreibt die Spannung, die maximal auftreten darf, um die Dauerfestigkeit der Welle gewährleisten zu können.

3 Modellbildung

Für die Modellbildung wird ein gerades Segment eines Rollenförderers, welcher auch als Versuchsanlage zur Verfügung steht, ausgewählt. Dieser Rollenförderer wird von einem Käfigläufer-Asynchronmotor angetrieben, der über ein Getriebe mit der Antriebsriemenscheibe verbunden ist. Die Kraftübertragung auf die Förderrollen erfolgt über einen tangentialen Flachgurt, welcher seitlich unterhalb der Tragrollen verläuft.

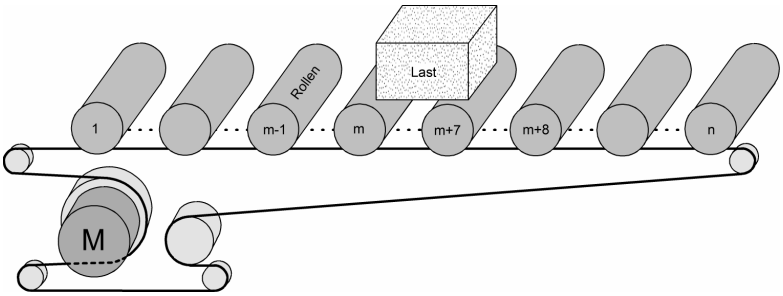


Bild 2: Schematische Darstellung des Systems

Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung des betrachteten Systems. Das System enthält *n* Tragrollen, die mit einem Fördergut belastet werden. Für den Flachgurt werden sowohl die federnden als auch dämpfenden Eigenschaften berücksichtigt. Bei diesem System wir zunächst vereinfachend angenommen, dass kein Schlupf zwischen dem Flachgurt und den Tragrollen vorherrscht. Eine ausführliche Beschreibung des Systems und der enthaltenen Energien wird in [3] dargestellt.
Die Ableitung der Bewegungsdifferentialgleichungen erfolgt über das Euler-Lagrange-Verfahren. Hierfür müssen zunächst alle Energien des Systems aufgestellt werden. Die

Formulierung der Energien erfolgt hierbei über generalisierte Koordinaten q_i und deren zeitliche Ableitungen. Anschließend werden alle Energien zum kinetischen Potential $L+L^*$ zusammengefasst und die Bewegungsgleichungen über die Euler-Lagrange-Gleichung abgeleitet.

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial\left(L+L^*\right)}{\partial\dot{q}_\alpha}\right)-\frac{\partial\left(L+L^*\right)}{\partial q_\alpha}=0 \tag{1}$$

Das Aufstellen der Bewegungsgleichungen anhand der Energieterme bietet den Vorteil, dass die Kopplungen zwischen den einzelnen Teilsystemen nicht explizit formuliert werden müssen. Die entsprechenden Zwangsbedingungen und Kopplungsmechanismen werden durch die generalisierten Koordinaten und die Energietherme automatisch erfasst.

Das resultierende Gleichungssystem ist stark nichtlinear, da viele Komponenten des Gleichungssystems voneinander abhängig sind. So ist zum Beispiel das elektrische Moment eine Größe, welche für die Bestimmung des Drehwinkels der Abtriebswelle erforderlich ist. Für die Berechnung des elektrischen Moments sind jedoch die Ströme erforderlich, welche wiederum von dem Drehwinkel der Abtriebswelle abhängen. Aus diesem Grund ist eine numerische Lösung des Gleichungssystems erforderlich.

Für die Lösung mit numerischen Verfahren muss das Gleichungssystem folgende Struktur besitzen:

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t}=f(t,x_1(t),\cdots,x_n(t),\dot{x}_1(t),\cdots,\dot{x}_n(t)) \tag{2}$$

Der Hauptaufwand bei der entsprechenden Konditionierung des Gleichungssystems liegt bei dem elektrischen System, da die Gleichungen dieses Teilsystems stark nichtlinear und alle Matrizen voll besetzt sind. Um die Anzahl der Gleichungen zu reduzieren wird das elektrische Teilsystem in ein einphasiges System transformiert. Nach der Transformation ergibt sich für das elektrische Teilsystem das in Gleichung 3 dargestellte Gleichungssystem.

$$\begin{pmatrix} \frac{\mathrm{d}i_{1s}(t)}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i'_{1r}(t)}{\mathrm{d}t} \end{pmatrix} = \frac{\mathrm{d}\vec{i}(t)}{\mathrm{d}t} = \begin{bmatrix} R_s & \frac{3}{2} jp\omega_A L_\mu \cdot e^{jp\varphi_A(t)} \\ -\frac{3}{2} jp\omega_A L_\mu \cdot e^{jp\varphi_A(t)} & R'_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \cdot \left\{ \begin{pmatrix} U(t) \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} L_{\sigma s} + \frac{3}{2} L_\mu & \frac{3}{2} L_\mu \cdot e^{jp\varphi_A(t)} \\ \frac{3}{2} L_\mu \cdot e^{jp\varphi_A(t)} & L'_{\sigma r} + \frac{3}{2} L_\mu \end{bmatrix}_1 \cdot \begin{pmatrix} i_{1s}(t) \\ i'_{1r}(t) \end{pmatrix} \right\} \quad (3)$$

i_s	Statorstrom	L_μ	Hauptinduktivität	R_s	Statorwiderstand
i'$_r$	Rotorstrom	$L_{\sigma S}$	Statorstreuinduktivität	R'$_r$	Rotorwiderstand
U(t)	Klemmspannungen	$L'_{\sigma r}$	Rotorstreuinduktivität		

$\varphi_A(t)$ Drehwinkel der Abtriebswelle der Asynchronmaschine

Für die Lösung des Gleichungssystems werden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen werden die Komponenten der einzelnen Teilsysteme über Funktionsblöcke in die Simulink-Umgebung von Matlab integriert und entsprechend verknüpft, um das Gleichungssystem nachzubilden. Bei diesem Ansatz wurde der Fokus auf die mechanischen Elemente gelegt. Zum anderen wird das Gleichungssystem direkt mit Hilfe von Matlab gelöst, wobei der elektrische Antrieb im Vordergrund stand. Diese beiden Ansätze wurden gewählt, um die Vorteile der beiden Umgebungen, wie zum Beispiel Modularität, Transparenz oder Rechenzeit nutzen und vergleichen zu können.

4 Simulationsergebnisse

Da die Abschätzung der im System tatsächlich vorhandenen Belastungen nicht trivial ist, wird in den nachfolgenden Schritten mit Hilfe des zuvor beschriebenen Modells ermittelt, welche Momente tatsächlich auf die Welle wirken. Mit Hilfe der Simulation kann die Torsionsbelastung auf die Abtriebswelle im Rahmen der Annahmen und Vereinfachungen abgeschätzt werden. Für den Fall, dass sich auf dem Rollenförderer nur ein Fördergut mit einer Masse von 50 kg befindet, ist in Bild 3 der Verlauf des Drehmomentes über der Zeit aufgetragen. Während des Anfahrvorgangs tritt ein maximales Torsionsmoment an der Abtriebswelle von 40,8 Nm auf. Dieses fällt im späteren Verlauf ab und pendelt um einen Wert von ca. 4 Nm, wenn das Fördergut auf die Fördergeschwindigkeit beschleunigt wurde. Aufgrund der Vorspannung des Antriebsriemens wirkt zusätzlich eine Kraft von 500 N auf die Welle. Entsprechend der Gestaltänderungshypothese [1] ergibt sich aus dem Torsionsmoment und der radial wirkenden Kraft unter Berücksichtigung der geometrischen

Größen an der schwächsten Stelle der Abtriebswelle eine Vergleichsspannung von 66,3 N/mm².

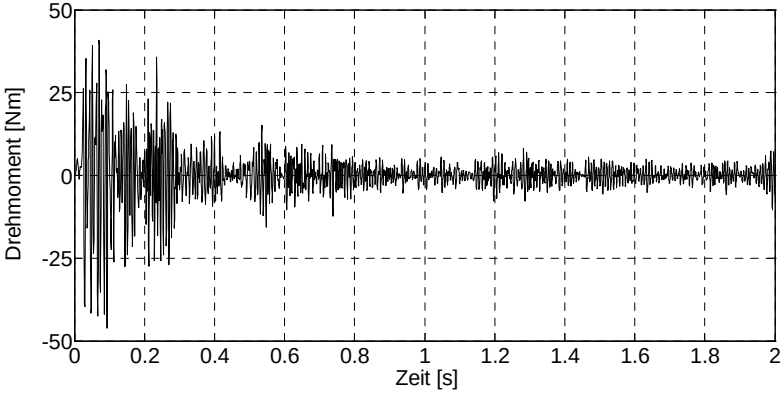


Bild 3: Drehmomentverlauf der Abtriebswelle

Dieser Wert bezieht sich auf die maximalen Werte des Drehmomentes während des Anfahrvorgangs. Da dieser nach einer Zeit von 0,4 bis 0,6 abgeschlossen ist und sich das Drehmoment auf einen viel geringeren Wert einpendelt, kann für die Auslegung der Welle auf Dauerfestigkeit von einer geringeren Last ausgegangen werden. Bei häufigen Anfahrvorgängen der Anlage gewinnen die höheren Momente jedoch eine größere Bedeutung in Bezug auf die Haltbarkeit der Abtriebswelle.

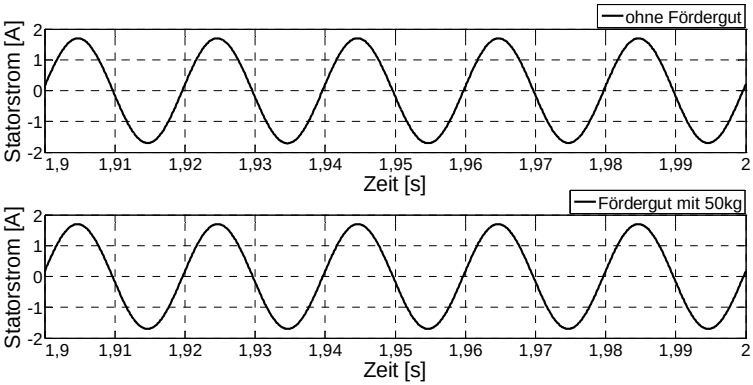


Bild 4: Fünf Perioden der Statorströme im eingeschwungenen Zustand

Bild 4 zeigt fünf Perioden der Statorströme im eingeschwungenen Zustand für den belasteten und den unbelasteten Fall. Beiden Kurven weisen einen nahezu identischen Ver-

lauf auf. Da die Statorspannungen von der Spannungsversorgung vorgegeben werden, bedeutet dies, dass der Asynchronmotor in beiden Fällen nahezu dieselbe Leistung aufnimmt. Ein einzelnes Fördergut mit 50 kg stellt somit aus Sicht des Antriebs keine zusätzliche Last dar.

Der Effektivwert des simulierten Stromes beträgt ungefähr 1,2 Ampere. Ein Vergleich mit der Kennlinie des Antriebs zeigt, dass dieser sich fast im Leerlauf befindet. Diese Ergebnisse unterstützen die Annahme, dass der Antrieb überdimensioniert ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur dynamischen Berechnung des Systemverhaltens dargestellt. Die dynamischen Belastungen der einzelnen Komponenten können hiermit simuliert und bei der Konstruktion besser berücksichtigt werden. So sind die Dauerfestigkeit der Welle oder die Lebensdauer anderer Antriebselemente wie z.B. des Riemens von der Art der Belastung abhängig. Ist diese genauer bekannt, kann näher an der Dimensionierungsgrenze ausgelegt werden, um die Teile nicht überzudimensionieren.

In den nächsten Schritten werden die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen schrittweise optimiert, um die Genauigkeit der Simulationsergebnisse weiter zu verbessern. Darüber hinaus werden die berechneten Ergebnisse mit real gemessenen Messgrößen vergleichen, um die Simulation zu validieren und gegebenenfalls zu optimieren.

Literatur

[1] Künne, Bernd: Einführung in die Maschinenelemente : Gestaltung - Berechung - Konstruktion. 2. Aufl. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001

[2] Günther, W.A.: Trends und Perspektiven in der Intralogistik. In: VDI-Berichte, Band 1928, 2006, Seite 279-289

[3] Künne, Bernd; Kulig, Stefan; Benthaus, Burkhard; Eggert, Jan; Wieczorek, Dorothee: Ansatz zur analytischen Beschreibung der elektromechanischen Wechselwirkungen eines autonomen mechatronischen Systems. In: Crostack, H.-A., ten Hompel, M. (Hrsg.), Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen 2. Kolloquium des SFB696, S. 75-99, Dortmund 2007

Entwicklung und Erprobung anhand virtueller Modelle am Beispiel einer Sicherheitsvorrichtung für Oberleitungen

Prof. Dr.-Ing. Jan Scholten, Dr.-Ing. Henning Haensel,
Dipl.-Ing. Klaus-Peter Herber

Arbeitsgruppe Baumaschinentechnik, Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, Gebäude IB 1 / 127, D-44780 Bochum
Email: sekretariat@lmf.rub.de; Internet: http://www.bmt.rub.de

Inhalt: *Die Neu- und Weiterentwicklung von Produkten ist heutzutage kaum mehr ohne den Einsatz moderner Berechnungsmethoden vorstellbar. Die Fähigkeit, Produkte bereits vor dem Prototypenstadium vollständig in einer virtuellen Umgebung auslegen, verbessern und testen zu können, kann Zeit und Kosten in hohem Umfang sparen. Eine effiziente Simulation und damit virtuelle Erprobung ist oftmals allerdings nur ausgehend von der Betrachtung von Teilsystemen möglich, um keine zu große Bandbreite in den charakteristischen Abmessungen zu erhalten. In dem hier betrachteten Gesamtsystem, bestehend aus einem hochelastischen Teilsystem mit großer räumlicher Ausdehnung und einem nahezu starren Mehrkörpermechanismus mit vergleichsweise geringer räumlicher Ausdehnung, wird zunächst die Aufteilung und Vereinfachung vorgestellt, bevor diese in ein zusammengeführtes Modell überführt werden. Anhand experimenteller Ergebnisse werden die Teilsysteme schließlich verifiziert. Im Ergebnis liegt ein Simulationsmodell vor, mit welchem die Auswirkungen des Kraftunterbrechers auf das Kettenwerk quantifiziert werden können.*

Abstract: *Nowadays new and further product development is barely possible without modern computational procedures. The ability of laying-up, enhancement and testing within a virtual environment before the prototype phase, allows time and costs to be minimised. For efficient virtual testing a fragmentation into subsystems is often necessary. As the resurged system on the one hand consists of a highly elastic, large part and on the other hand of an almost rigid comparatively small part, the partition and simplification of these subsystems is shown first. Thereupon the subsystems are merged into a combined model, containing all relevant system properties. On the basis of experimental results the verification of the subsystems is demonstrated. The result is a numerical model, which allows the force interrupter's effect on the catenary to be quantified.*

Stichwörter: *virtuelles Modell, Verifikation, Fahrdraht, Sicherheitsvorrichtung, MKS, Teilsysteme, Kopplung*

Keywords: *virtual model, verification, contact wire, safety device, MBS, subsystems, coupling*

1 Einleitung (Motivation / Hintergrund)

Kommt es in vorgespannten Systemen, die eine hohe elastische Energie im Vergleich zu ihrer Masse besitzen, zu einem Schadensfall, so kann die unkontrollierte Freisetzung dieser potentiellen Energie katastrophale Folgen haben. Ein Beispiel für derartige Systeme

stellen Oberleitungskettenwerke elektrischer Bahnen dar. Bild 1 zeigt einen exemplarischen Aufbau eines solchen Kettenwerkes. Das Zurückschnellen des gespannten Fahrdrahtes im Falle des Reißens kann große Teile der Oberleitung beschädigen. Die zur Verhinderung derartiger Schäden eingesetzte standardmäßige Sperrvorrichtung gemäß Bild 2 ist in diesen Fällen häufig insbesondere aufgrund des dynamischen Verhaltens der Oberleitung nach dem Schadensfall nicht in der Lage, eine sichere, bzw. dauerhafte Sperrung zu garantieren. Zeitversetzte Kraftanstiege nach dem ersten Kraftabfall können groß genug seien, um die Nachspannvorrichtung erneut aus ihrer Sperrposition zu heben. Dieser Effekt verstärkt sich bei zunehmender Entfernung von der Nachspannvorrichtung.

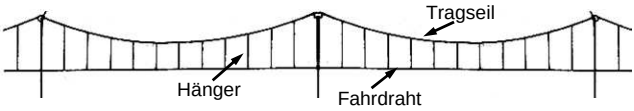


Bild 1: vereinfachter Aufbau eines Oberleitungskettenwerkes

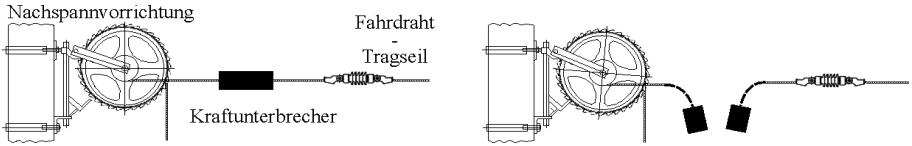


Bild 2: Anordnung von Nachspannvorrichtung und Kraftunterbrecher (links: geschlossen / rechts: offen)

Vor diesem Hintergrund wurde in Zusammenarbeit mit der Firma August Feldmann GmbH & Co. KG in einem durch die Aif geförderten Projekt, eine Vorrichtung gemäß den Vorgaben der Bahn (keine Hilfsenergie, wartungsfreier Betrieb, etc.) Vorrichtung entwickelt, welche auch bei dynamischer Variation der durch die Oberleitung ausgeübten Zugkraft auf die Spannvorrichtung im Schadensfall eine gesicherte Trennung der Spannkraft vom Oberleitungssystem erreicht und auf diese Weise Folgeschäden verhindert. Bild 3 zeigt die als Kraftunterbrecher bezeichnete Vorrichtung in geschnittener Ansicht. Damit das sichere Funktionieren dieser Vorrichtung im Rahmen der Entwicklung frühzeitig verifiziert werden konnte, war der Einsatz leistungsfähiger virtueller Simulationsmethoden unabdingbar.

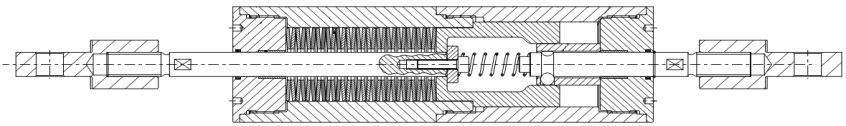


Bild 3: Schnittansicht des Kraftunterbrechers

2 Erarbeitete Herangehensweise

2.1 Die virtuelle Umgebung (Oberleitungskettenwerk) - Referenzmodell

Bei der Modellierung des Oberleitungskettenwerkes stellt sich zu Beginn die Frage der benötigten Abbildungstiefe. Da bei dem hier untersuchten dynamischen Effekt des Fahrdrahtrisses mit sehr großen Verschiebungen in alle Richtungen gerechnet werden muss, ist für die Beschreibung des Vorgangs ein nichtlineares MKS Modell erforderlich. In diesem konkreten Fall wurde die MKS Umgebung von MATLAB – Simulink – SimMechanics gewählt.

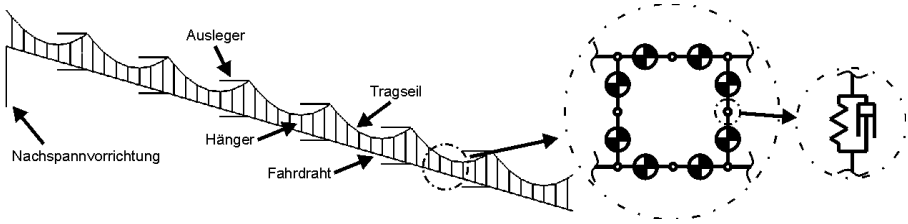


Bild 5: Kettenwerk - Referenzmodell (3D)

Dementsprechend wurde ein nichtlineares Referenzmodell des Kettenwerkes erstellt. Wegen seiner schlanken, netzförmigen Struktur ist das Modell aus diskreten Massepunkten mit gewichtslosen, starren Stäben mit Anfangs- und Endknoten, wie es in Bild 5 zu erkennen ist, aufgebaut. Durch Feder- und Dämpferelemente werden die Stäbe miteinander verbunden. Dabei ist zu berücksichtigen dass in dem hier betrachteten Fall durch die geringe Biegesteifigkeit der Seile und des Fahrdrahtes keine Druckkräfte zwischen den Stabelementen auftreten können. Zu erkennen ist der siebenfeldrige Aufbau mit einer Länge von ca. 560m bei einer Höhe von 1,8m. Die Nachspannvorrichtung (die Massen sind nicht dargestellt) ist durch Kraft-Sensoren und -Aktoren mit dem Fahrdraht verbunden, wodurch die Übersetzung und die Sperrvorrichtung realisiert wurde. Über Ausleger wird das Kettenwerk horizontal gehalten.

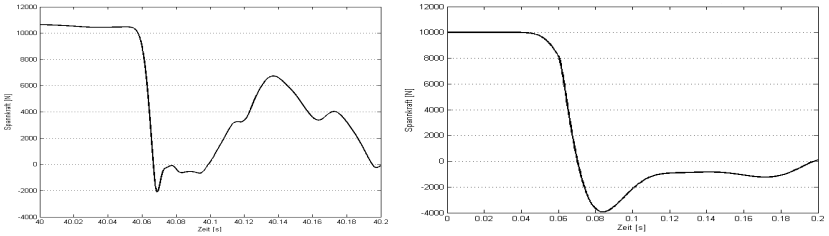


Bild 6: Vergleich zwischen nichtlinearem (links) und linearem (rechts) Berechnungsmodell

Das MKS Modell des Kettenwerkes kann den Schadensfall sowohl hinsichtlich des zu erwartenden Kraftabfalls, als auch des Wiederanstiegs der Kraft gut simulieren, wie im Rahmen des 6. Kapitels in Bild 14 erkennbar ist. Nachteilig ist die recht hohe Rechenzeit, die für mehrfeldrige Kettenwerke mehrere Tage betragen kann. Deswegen ist parallel ein vereinfachtes lineares Schwingungsmodell entwickelt worden. Bild 6 zeigt den Unterschied zwischen diesen beiden Modellen. Insbesondere im Bereich des ersten Kraftabfalls ist eine große Übereinstimmung erkennbar. Demgegenüber ist anschließend aufgrund der Einschränkungen des linearen Modells eine größere Abweichung vorhanden. Da aber zu diesem Zeitpunkt bereits der Kraftunterbrecher die Systeme Nachspannvorrichtung und Kettenwerk getrennt hat, ist dieser Bereich für die weitere Auslegung des Kraftunterbrechers in vielen Fällen vernachlässigbar.

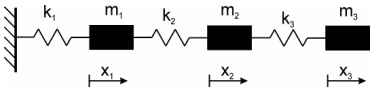


Bild 7: Mehrmassenschwinger

Die mathematische Beschreibung des linearen Modells erfolgt anhand von der bekannten *Lagrangeschen-Gleichung* 2. Art auf der Basis eines einfachen Mehrmassenschwingers gemäß Bild 7. Das System lässt sich somit über die nun mögliche lineare Zustandsraumdarstellung lösen.

2.2 Das virtuelle Produkt (Kraftunterbrecher) - Referenzmodelle

Basierend auf dem 3D-CAD Entwurf des Prototypen wurde dieser in der MKS Umgebung LMS – Virtual.Lab, den realen Gegebenheiten entsprechend, zusammengesetzt. Hierbei wurde z. B. durch die Verwendung eindimensionaler Lagerungen die Führung der Bolzen oder durch aufwendige Kontaktdefinitionen das Verhalten der Kugeln des Auslösemechanismus abgebildet, wie er in Bild 8 rechts zu sehen ist. Des Weiteren wurde bei der Modellierung die Einbausituation im Versuch, wie sie in Bild 8 zu erkennen ist, berücksichtigt. Wesentlich bei der virtuellen Untersuchung des Kraftunterbrechers ist hierbei weniger die Untersuchung von inneren Kräften, als viel mehr die Funktionsüberprüfung des Auslösens bei einem Kraftabfall.

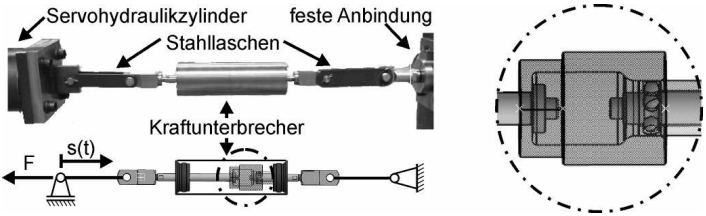


Bild 8: Vergleich Prüfstand - Simulationsumgebung

Bild 9 zeigt den Ablauf der Verifikation des Kraftunterbrechers, dessen Ausgangspunkt die Versuche am Prototypen sind. Bei diesen wurde im vorgespannten Zustand ein halbsinusförmiger Weg als Soll-Verlauf mittels eines Servohydraulikzylinders vorgegeben. Der messtechnisch erfasste Weg-Zeit-Verlauf dient daraufhin als Input für die Simulation.

Mit Hilfe des Vergleiches der Kraft-Zeit-Verläufe der an der festen Anbindung und am Zylinder befindlichen Kraftsensoren und der an entsprechenden Stellen im Modell auftretenden Kraft-Zeit-Verläufe werden die Parameter des Modells angepasst. Anhand unterschiedlicher Tests und Variation des Halbsinus (Amplitude/Frequenz) konnte das MKS Modell verifiziert werden (mehr dazu im Kapitel 0).

Mit dem verifizierten MKS Modell des Kraftunterbrechers wurde anschließend durch eine Analyse der Einflussparameter (Parameterstudie) ein Kennlinienfeld erstellt, welches ausgehend von dem anliegenden Kraftverlauf den Zustand (geschlossen – geöffnet – blockiert) als Ausgangsgröße hat. In Bild 9 rechts ist das aus der Parameterstudie hervorgegangene Kennlinienfeld zu erkennen. Hier kann nun der Zustand des Kraftunterbrechers in Abhängigkeit von Frequenz und Kraftamplitude des Kraftverlaufes entnommen werden.

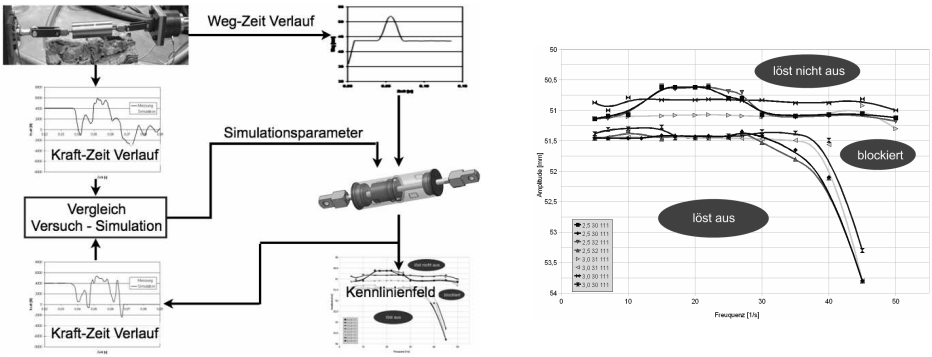


Bild 9: Struktur zur virtuellen Produktverifikation des Kraftunterbrechers (links) und Kennlinienfeld (rechts)

3 Ergebnisse und Verifikation

3.1 Das Oberleitungskettenwerk

Der Versuchsabgleich für das Kettenwerk findet an einem Prüfstand im Maßstab 1:8,165 statt. Dieser basiert auf einem vereinfachten Modell (nur Fahrdraht), siehe Bild 10. Um den Kraftverlauf an unterschiedlichen Stellen des Fahrdrahtes messtechnisch erfassen zu können, wurden DMS bestückte, dünne Blechstreifen in den Verlauf des Drahtes integriert. Bild 11 zeigt links den Aufbau eines solchen Kraftmessstreifens (KMS) und rechts den schematischen Aufbau des Prüfstandes mit der Anordnung der KMS.

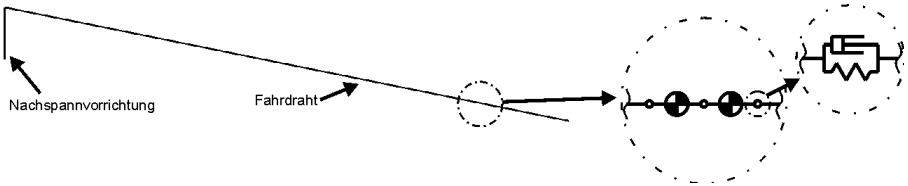


Bild 10: vereinfachtes Kettenwerkmodell (2D) (reduziert auf den Fahrdraht)

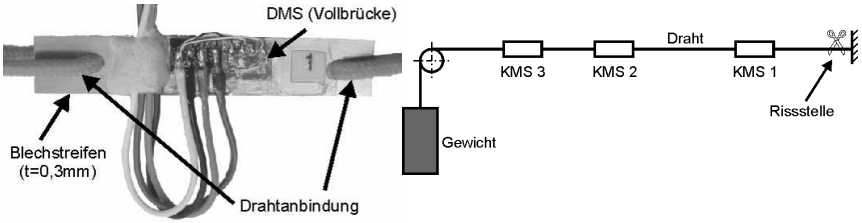


Bild 11: Aufbau des Kraftmessstreifens (KMS) und des Prüfstandes

Damit sichergestellt ist, dass die Parameter für Steifigkeit und Dämpfung in Modell und Prüfstand entsprechen, wurden diese vorab anhand von statischen und dynamischen Versuchen ermittelt. In Bild 12 sind die Kraftverläufe aus der vereinfachten Simulation und dem Versuch an jeweils drei korrespondierenden Stellen zu sehen. Bemerkenswert ist das hohe Maß an Übereinstimmung im Bereich des Kraftabfalls. Während die Zugkraft im Versuch vollständig auf 0N abfällt, ist in der Simulation ein Überschwingen festzustellen. Diese Abweichung kann aber gemäß Kapitel 2.1 hingenommen werden.

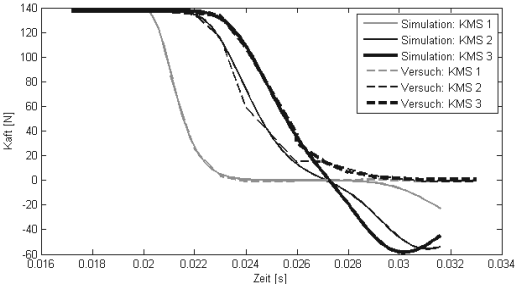


Bild 12: Vergleich der Kraftverläufe von Prüfstand und Simulation

3.2 Der Kraftunterbrecher

Die Verläufe der Reaktionskräfte am Zylinder (links) und an der festen Anbindung (rechts), wie sie in Bild 13 dargestellt sind, zeigen eine hohe Übereinstimmung der gemessenen und der simulierten Werte des verifizierten Modells bei einem Auslösevorgang. Auffällig ist hierbei die hohe Dynamik des Systems, welches in weniger als 0,02s den Kraftfluss vollständig öffnet (rechts zu erkennen).

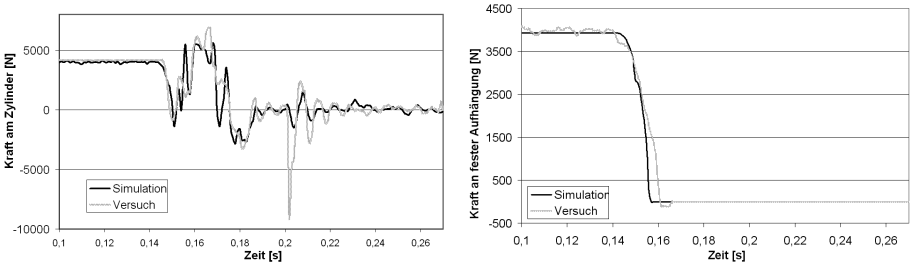


Bild 13: Vergleich der gemessenen und der simulierten Kräfte während des Auslösevorgangs

4 Die Gesamtsimulation

Die Gesamtsimulation, bestehend aus dem Kettenwerk Referenzmodell und Kennlinienfeld des Kraftunterbrechers, dient der Beurteilung des Auslöseverhaltens des Kraftunterbrechers in seinem tatsächlichen Einsatzfeld und dem daraus resultierenden Nachweis der Funktionserfüllung. Zur Veranschaulichung der Auswirkung auf das Kettenwerk durch die Verwendung des entwickelten Kraftunterbrechers sind in Bild 14 die Simulation des Schadensfalls mit dem Referenzmodell (mit richtiger Wiedergabe des Kraftanstiegs) mit und ohne Kraftunterbrecher bei einem Fahrdrahtriss bei 0s dargestellt. Deutlich ist zu er-

kennen, dass bei der Verwendung des Kraftunterbrechers, der Fahrdraht nach Erreichen des Auslösepunktes abrupt von der Nachspannkraft getrennt wird.

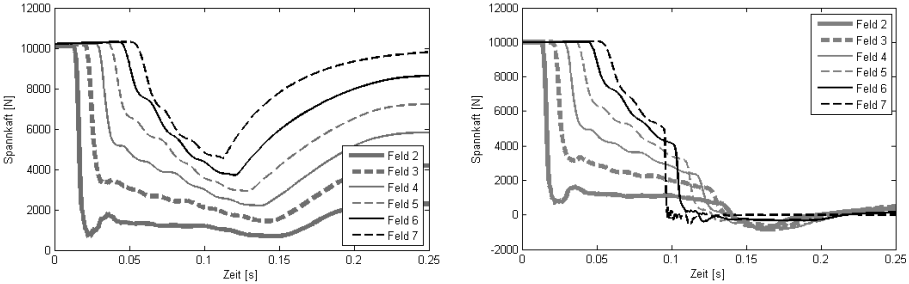


Bild 14: Vergleich Gesamtsimulation ohne (links) und mit (rechts) Kraftunterbrecher

Werkzeuge zur automatisierten Messplanung von Freiformflächen

Stefan Holtzhausen, Christine Schöne, Ralph Stelzer

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

Inhalt: *Beim optischen Erfassen von komplizierten und freigeformten Objekten in großer Stückzahl mittels Streifenprojektionsverfahren werden die Kosten einer Messkampagne wesentlich von der Aufnahmezeit beeinflusst. Da das Scannen eines Objektes durch das Aufnehmen von mehreren Einzelansichten geschieht, ist es notwendig, die Anzahl dieser Ansichten zu minimieren, um Messzeit zu sparen. Mit einem Modell des Scanprozesses und einer geeigneten Optimierung soll eine minimale Anzahl an Aufnahmepositionen gefunden werden, um Objekte in möglichst kurzer Zeit mit einem hinreichenden Maß an Genauigkeit zu erfassen.*

Abstract: *Using the fringe projection for optical measurement of complex and sculptured surfaces in great quantities, the recording time essentially affects the cost of a measurement series. As the scanning of an object occurs by recording several single views, it is necessary to reduce the number of those views in order to save measurement time. Therefore, the task is now to find a minimum number of single views to capture the whole object using a model of the measurement process and an adapted optimization procedure. Finally the measurement cost will be reduced.*

Stichwörter: *Streifenprojektionsverfahren, 3D-Scannen, Optimierung, Evolutionäre Algorithmen*

Keywords: *fringe projection, 3D-Scanning, optimization, evolutionary algorithm*

1 Motivation

Optische 3D-Scanner, die nach dem Prinzip der Streifenprojektion [1,2] arbeiten, werden zunehmend zur Qualitätssicherung im Produktentwicklungsprozess eingesetzt. Gegenüber taktilen Verfahren erhält man in sehr kurzer Zeit eine dichte Punktwolke, die die Oberfläche des gescannten Objektes nahezu lückenlos beschreibt. Besonders bei komplizierten Geometrien, insbesondere bei freigeformten Oberflächen ermöglicht die optische Messtechnik neue Möglichkeiten in der Qualitätskontrolle. Die Dauer, die für das Erfassen eines Objektes mittels Streifenprojektionsverfahren benötigt wird, hängt, abgesehen von seiner Geometrie und seiner Größe, von den Parametern des Scansystems, wie z.B. Messfeldgröße, Auflösung der Kameras, Belichtungszeit, der geforderten Genauigkeit und Rech-

nerhardware ab. So dauert z.B. eine einzelne Aufnahme inkl. Ausrichten der Ansicht mittels Passmarken mit dem Streifenprojektionsscanner ATOS-HR der Firma GOM mbH (Messfeldgröße 350 x 280 x 300; 1.3 Megapixel Kameras, Softwareversion 5.4) je nach Belichtungszeit zwischen 10 und 40 Sekunden. Die selbstkalibrierende Messmaschine kolibri Flex 100 (Bild 1) der Firma IVB Jena GmbH [3,4] benötigt bis zur fertigen Punktwolke für 12 Einzelmessungen (Messfeldgröße 75 x 75 x 35; 2 Megapixel Kameras) etwa 20 Minuten, für 16 Einzelmessungen etwa 35 Minuten [5]. Zum Erfassen eines Bauteils werden je nach Messfeld- und Objektgröße mehrere Einzelaufnahmen benötigt. Besonders bei großen Stückzahlen zu scannender Objekte, vielen Hinterschneidungen oder bei der Forderung nach einer hohen Punktdichte bei kleinen Kantenradien (z.B. bei Turbinen- oder Verdichterschaufeln) [6] bedeutet eine hohe Anzahl von Einzelmessungen einen deutlich höheren Kostenfaktor.

Bild 1: Messmaschine kolibri Flex 100 (IVB Jena GmbH)

2 Optimierungsproblem

Bei der Verwendung von automatisierten Erfassungsmethoden via Roboter oder Messmaschinen, welche reproduzierbare Scanvorgänge von Bauteilen in großer Stückzahl ermöglichen, erfolgt die Festlegung der Einzelansichten durch manuelles Erstellen von Messplänen [5,7]. Bei der Verwendung von Robotern erfolgt ein manuelles Teach-In [8], bei Messmaschinen [6,7] können Messpläne in der Regel per Script erstellt werden. Allerdings passiert die Auswahl der Ansichten eher subjektiv und hängt von der Erfahrung des Messtechnikers ab. Bei solchen Messplänen werden reproduzierbar immer wieder dieselben Scankopfpositionen angefahren. Dies hat zur Folge, dass immer wieder die gleichen Oberflächenbereiche erfasst werden. Besitzen diese Bauteile viele Hinterschneidungen, freigeformte Oberflächen oder ist das Verhältnis Messfeld zu Objektgröße ungünstig (ist eine hohe Genauigkeit gefordert, kann es vorkommen, dass man relativ große Objekte mit ei-

nem kleinen Messfeld erfasst), ist ein manuelles Festlegen des Planes ineffizient. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden bestimmte Oberflächenbereiche mehrfach erfasst, bzw. manche gar nicht. Somit bieten diese Messpläne Optimierungspotential.

Man kann ein solches Problem wie folgt beschreiben:

$$Zielfunktion = f(Messplan, Objekt, Oberfläche, Scansystem) \rightarrow Extrema \quad (1)$$

Die Parameter der Zielfunktion ergeben sich wie folgt:

Messplan: Positionen des Scankopfes zum Objekt

Objekt: Geometrie des Objektes, Kanten, Radien, Hinterschneidungen

Oberfläche: optische Dichtheit, Reflexion, Rauigkeit

Scansystem: Systemparameter, Messfeld, Auflösung der Kameras, Position der Kameras zu Projektor, Hardware

Die Anforderungen an die Zielfunktion bzw. an das Extrema werden problemspezifisch aufgestellt. So kann gefordert werden, dass bei so wenigen Aufnahmen wie möglich, die Oberfläche vollständig erfasst wird. Des Weiteren könnte eine definierte Anzahl von Messungen auf definierten Bereichen der Oberfläche gefordert werden (z.B. im Bereich von Kantenradien), um dort eine hohe Punktdichte zu gewährleisten.

3 Modell

Ein erstes Modell soll dazu dienen, die mit einem Messplan und gegebenen Scansystemeinstellungen erfassten Oberflächen eines Objektes zu bestimmen. Beim verwendeten Streifenprojektionsverfahren erfolgt das Erfassen mit zwei Kameras und einem Projektor der verschiedene Streifenmuster auf das Objekt projiziert (Bild 2). Bei der Berechnung sollen Verdeckungen durch Hinterschneidungen oder Teilen der Einspannung sowie ungünstige Blickeinfallswinkel berücksichtigt werden. Dabei wird die Anzahl der Einzelaufnahmen festgelegt. Das ist notwendig, da eine optimale Position aller Ansichten gesucht wird und vorerst die Anzahl der Parameter gleich bleiben soll.

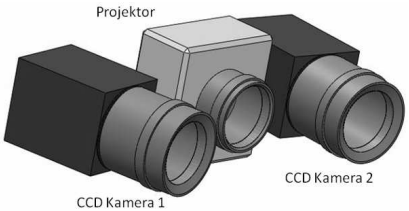


Bild 2: prinzipieller Aufbau eines Scankopfes eines Streifenprojektionsscanners

Daraus folgt folgende Definition einer Ansicht, sowie die der Zielfunktion:

$$Ansicht = f(Kameraposi tionen, Kamerablic krichtunge n, Messfeld) \quad (2)$$

$$Zielfunktion = f(Ansichten_{1\cdots n}) \rightarrow Extrema \quad (3)$$

Für das Modell wird angenommen, dass nur Teile der Oberfläche erfasst werden, die im Messfeld liegen und die von beiden Kameras gesehen werden. Reflexionen, Glänzen der Oberfläche, etc. werden in diesem Modell noch nicht berücksichtigt.

3.1 Sichtbarkeitsberechnung

Zur Berechnung der Sichtbarkeit für eine Kamera wird versucht die reelle Kameraansicht eines Objektes mathematisch nachzubilden (Bild 3).

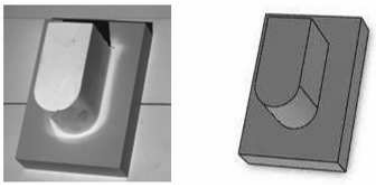


Bild 3: Nachbildung des von der Kamera erfassten Bildausschnittes (Foto links, Abbild rechts)

Dabei werden die Objektive einer Kamera mittels Projektionsmatrix (siehe [9]) modelliert. Der Schärfebereich der Kamera bzw. der Bereich in dem das Bild scharf abgebildet wird, wird durch sog. Clippingplanes [9] begrenzt (Bild 4).

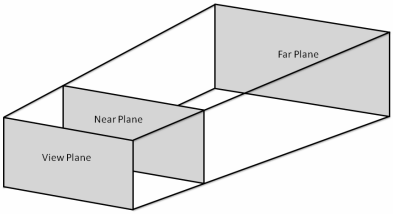


Bild 4: Der Schärfebereich einer Kamera wird mittels Near Plane und Far Plane begrenzt. Objekte außerhalb werden nicht berechnet

Die Objektoberfläche selbst wird durch eine hinreichend hohe Anzahl von Dreiecken beschrieben. Zur Berechnung von Verdeckungen wird die GPU der Grafikkarte benutzt. Dazu wird jedem Dreieck eine Farbe zugewiesen [10] (außer schwarz und weiß) (Bild 5). Bereiche die nicht zum eigentlichen Messobjekt gehören (z.B. Einspannungen, Referenzrahmen, etc.) werden durch schwarze Dreiecke modelliert. Diese Szene wird mit weißem

Hintergrund gerendert und der Inhalt des Backbuffers (siehe [9]) als Bild ausgegeben. Gleicht man alle vorhandenen Farben dieses Bildes mit denen der Dreiecke ab, erhält man die sichtbaren Dreiecke des Objektes inklusive berechneter Verdeckung. Dieses Verfahren hat den Vorteil, nicht für jedes Dreieck berechnen zu müssen, ob es verdeckt wird oder nicht. Zum anderen bietet die Grafikkarte optimierte Methoden an, um Szenen zu rendern. Dort werden Verdeckungen mittels Z-Buffer-Algorithmus realisiert.

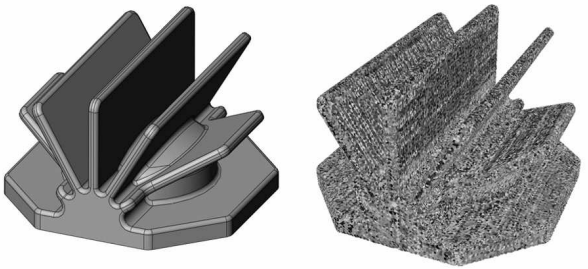


Bild 5: CAD-Model eines Zylinderkopfes im Vergleich zum farbig gerenderten Zylinderkopf

Danach werden alle sichtbaren Dreiecke nach dem Blickeinfallswinkel hin überprüft um Bereiche zu vermeiden in denen ein erhöhtes Rauschen auftreten kann. Dazu werden die Normalenvektoren der Dreiecke mit der Blickrichtung der Kamera verglichen. Tritt ein zu steiler Blickeinfallswinkel auf, gilt das Dreieck als nicht gesehen. Die sichtbaren Dreiecke beider Kameraansichten werden addiert. Dreiecke die von beiden Kameras gesehen werden gelten als sichtbar für diese Ansicht. Über die Summe der Ansichten kann man bestimmen wie viel Oberfläche des Objektes erfasst wurde (Bild 6).

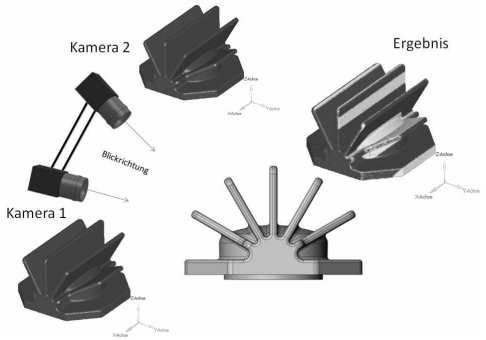


Bild 6: Berechnung einer Scan-Ansicht des Zylinderkopfes. Links Rot/Grün jeweils die Bereiche der gesehenen/ungesehenen Dreiecke der einzelnen Kameras, Rechts Rot/Gelb/Grün Bereiche, die von beiden Kameras gesehen wurden (Grün), Bereiche, die nur von einer Kamera gesehen wurden (Gelb) und Bereiche, die gar nicht gesehen wurden (Rot)

3.2 Optimierung

Ist das Modell für die Berechnung aufgestellt, kann man durch die Parameter verschiedener Messpläne eine Optimierung durchführen. Dabei werden die einzelnen Ansichten so lange verändert, bis ein gewünschtes Optimum erreicht wird. In dieser Arbeit soll die erfasste Oberfläche des Objektes so groß wie möglich sein. Zur Optimierung werden Evolutionäre Algorithmen verwendet [11,12]. Diese ermöglichen das Optimieren von nichtlinearen, nicht differenzierbaren, multimodalen oder diskontinuierlichen Zielfunktionen. Die Parameter eines Messplanes werden in einem Individuum zusammengefasst. Eine Gruppe solcher Individuen bilden eine Population welche sich durch, an die natürliche Evolution angelehnten, Methoden wie Mutation, Selektion und Rekombination von Generation zu Generation verbessert bis ein Abbruchkriterium erreicht ist (Bild 7).

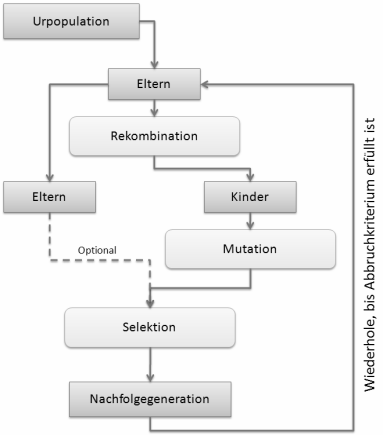


Bild 7: Schematischer Ablauf eines Evolutionären Algorithmus

4 Ergebnis und Ausblick

Anhand eines einfachen Geometriemodells wurde versucht, vier Ansichten so zu positionieren, dass die gesamte Oberfläche erfasst wird. Dabei wurde die Bewegung auf eine Kreisbahn um das Objekt begrenzt. Im Ergebnis zeigt sich (Bild 8), dass sich die einzelnen Ansichten genau 90° voneinander positionieren und somit das komplette Objekt erfasst wird. Dabei stellen Plot A und C farblich dar, wie oft ein Bereich der Oberfläche gesehen wurde, Plot B und D geben sichtbare und nicht sichtbare Bereiche an.

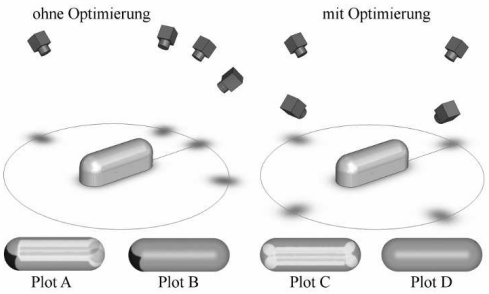


Bild 8: Ergebnis einer ersten Optimierung

Die Ergebnisse zeigen, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren, eine Möglichkeit bietet, einen Messplan hinsichtlich der erfassten Oberfläche hin zu überprüfen. Somit kann man vor dem zeitaufwendigen einscannen eines Bauteils bestimmen, ob die gewünschten Bereiche erfasst werden. Des Weiteren lässt die entwickelte Beschreibung eine Optimierung zu, welche ein zeitaufwendiges manuelles Erstellen eines Messplanes unnötig macht. Ferner können zeitsparende Messpläne erstellt werden, welche z.B. mit einem Minimum an Einzelaufnahmen ein Objekt mit der gewünschten Qualität erfassen. Zukünftig soll das Modell verfeinert, leistungsoptimiert und auf seine Praxistauglichkeit hin überprüft werden.

Literaturverzeichnis

[1] Breuckmann, B.; Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis: Grundlagen der 3D-Messtechnik, Farbbildanalyse, Holografie und Interferometrie mit zahlreichen praktischen Applikationen. s.l. : Franzis Verlag München, 1993.

[2] Gühring, Jens.; *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion.* Universität Stuttgart. s.l. : Institut für Photogrammetrie, 2002.

[3] Notni, Gunther, Kühmstedt, Peter und Heinze, Matthias; *Photogrammetrie, Lasescanning, Optische 3D-Messtechnik. s.l.* : Th. Luhmann, Wichmannverlag, 2004, Systemkonfiguration phasogrammetrischer 3D-Messsysteme - Anwendungsbeispiele, S. 30-37.

[4] Schreiber, Wolfgang und Notni, Gunther; Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique. 2000, Optical Engineering, Bd. 39, S. 159-169.

[5] Wernicke, Konrad. Erarbeitung effektiver 3D- Mess- und Auswertestrategien für Verdichterschaufeln der Firma Rolls Royce. TU Dresden. 2007.

[6] Holtzhausen, Stefan, et al.; Highly accurate automated 3D measuring and data conditioning for turbine and compressor blades. 2009.

[7] Holtzhausen, Stefan, Schöne, Christine und Stelzer, Ralph; Optimale Anpassung des Messprozesses für das Scannen von Objekten in großer Stückzahl. 2008.

[8] Reich und Thesing; Automated metrology. Automated first article inspection. Gom User Meeeting 2009.

[9] Konerow, Jens. *Managed DirectX und C#.* s.l. : entwickler.press, 2007.

[10] Bikker, Jacco. Raytracing Topics & Techniques - Part 4: Spatial Subdivisions. *Raytracing Topics & Techniques - Part 4: Spatial Subdivisions.* 2004.

[11] Pohlheim, Dr.-Ing. Hartmuth. *Evolutionäre Algorithmen Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis.* s.l. : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.

[12] Schöneburg, E., Heinzmann, F. und Feddersen, S. *Genetische Algorithmen und Evolutionstrategien.* s.l. : Addison.Wesley Publishing Company, 1994..

Finite Elemente für den konstruktiven Alltag: Mit einer vereinfachten Anwendung zu besseren Ergebnissen

Hans-Peter Prüfer

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik, Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, D-44801 Bochum
Email: hans-peter.pruefer@itm.ruhr-uni-bochum.de; Internet: http://itm.ruhr-uni-bochum.de

Inhalt: *Für Festigkeitsnachweise werden in der Praxis zwei Ansätze verwendet. Auf der einen Seite gibt es die so genannten analytischen Verfahren für wenige, geometrisch sehr einfache Bauteilklassen, auf der anderen Seite steht die Methode der Finiten Elemente (FEM), mit der zwar beliebige Bauteile behandelt werden können, die aber nicht nur eine große Investition darstellt, sondern sehr viel Erfahrung verlangt und damit für kleine und mittlere Unternehmen keine realistische Alternative bietet. In diesem Beitrag wird ein neues Konzept vorgestellt, das die Berechnungslücke für Bauteile mittlerer Komplexität schließen soll. Es beruht auf der Idee, Bauteile so zu klassifizieren, dass sie durch Templates mit einer kleinen Anzahl von Parametern beschrieben werden können. Die Templates lassen sich für eine automatisierte Elementierung ausnutzen, so dass der Anwender mit der FEM nicht mehr unmittelbar in Berührung kommt. Gleichzeitig erlaubt das in den Templates enthaltene konstruktive Wissen eine bedarfsgerechte Aufbereitung der Analyseergebnisse. Die Realisierung dieses Konzeptes soll im Rahmen einer Forschungskooperation mit einem Industriepartner in ein Softwareprodukt integriert werden.*

Abstract: *Stress analyses are either performed by so called analytical methods, i.e. mathematical formulae for parts with low-end geometry, or using the Finite Element Method (FEM), which may handle arbitrary shapes. However, the application of the FEM demands for major investments in software, even more in experienced engineers, who must be able to deal with modelling issues and result evaluations. Therefore the FEM is by no means a feasible solution for small and middle enterprises. In the paper an alternative approach is presented. Parts of moderate complexity are classified and characterised by parameterized templates. They contain a complete – parametric - description of a typical part, including the required result data, thus presenting the design knowledge. An automatic meshing is derived from these templates as well as a part-related interpretation and presentation of the analysis results. The implementation of this concept is the objective of a joint research project with an industrial partner.*

Stichwörter: *FEM, Parametrisierung, Templates, Wissensmanagement, automatische Netzgenerierung, Ergebnisauswertung*

Keywords: *FEM, parametrics, templates, knowledge management, automatic meshing, result interpretation*

1 Motivation

Festigkeitsnachweise sind ein unverzichtbarer Bestandteil der konstruktiven Praxis. Für ihre Durchführung gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze. Allgemein bewährt sind die analytischen Verfahren. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie aufgabenspezifisch konzipiert sind. Daher lassen sie sich leicht nutzen; meist benötigen sie nur wenige Eingabedaten, die Ergebnisse sind zuverlässig und reproduzierbar. Eine Bauteil-konstruktion mittels CAD ist nicht erforderlich. Typische Standardaufgaben sind Wellenauslegungen, Verzahnungs- und Schraubenberechnungen. Wegen ihrer Einfach-heit und Verbindlichkeit – die meisten dieser Nachweise haben Normcharakter – sind sie problemlos ohne zusätzlichen Aufwand nutzbar; sie sind darüber hinaus auch als Softwarepakete [1,2] verfügbar. Da jeder Konstrukteur im Rahmen seiner Ausbildung diese Art der Festigkeitsberechnung kennen gelernt hat, ist zu ihrer erfolgreichen Anwendung insbesondere keine zusätzliche Schulung erforderlich.

Bei Bauteilen mit einer komplexeren Gestalt sind diese Verfahren nicht mehr einsetzbar. Hier greift man dann meist auf die Methode der Finiten Elemente (FEM) als Verfahren der Wahl zurück [3,4]. Die FEM eignet sich grundsätzlich für die Bearbeitung beliebiger (nicht ausschließlich) mechanischer Aufgabenstellungen. Ihre Flexibilität ist eine unmittelbare Folge der Modellbildung: Die Bauteilgeometrie wird durch eine Näherung aus diskreten Elementen ersetzt. Die Vorteile der FEM sind durchaus wohlbekannt. Ihre Anwendung erfordert allerdings nicht nur den Erwerb geeigneter Softwareprodukte, sondern viel mehr noch eine hinreichende Erfahrung bei ihren Anwendern. Damit lohnt sich ihr Einsatz nur bei wirklich komplexen Aufgabenstellungen. Darüber hinaus ist die Modellbildung, die so genannte Elementierung, keineswegs starr festgelegt, sondern unterliegt einer großen Variationsbreite, die zu durchaus unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Selbstverständlich sind diese Abweichungen nicht beliebig groß; ihre Existenz schließt aber zunächst die prinzipiell gewünschte Reproduzierbarkeit der Festigkeitsberechnung aus.

An dieser Stelle können wir ein Dilemma identifizieren. Es gibt Bauteile, bei denen eine Festigkeitsrechnung mit den einfachen analytischen Methoden nicht mehr möglich ist, die aber andererseits auch nicht so komplex sind, dass sie typische Anwendungsfälle für die FEM bilden. Als Beispiele sind hier Mehrschraubenverbindungen, Flansche mit Momenteneinleitungen oder Tonnenfedern zu nennen. Für derartige Bauteilklassen mittlerer Komplexität gibt es bislang keine allgemeinverbindlichen Berechnungs-vorschriften, die in ähn-

licher Weise wie die analytischen Verfahren einfach und reproduzierbar genutzt werden könnten.

2 Eine kurze Problemanalyse

Sollen in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) Bauteile der erwähnten mittleren Komplexität behandelt werden, so ergibt sich fast unmittelbar die Wunschvorstellung, dass die Vorgehensweise den gewohnten Pfaden folgen soll. Es sollte also genügen, wenige beschreibende Daten einzugeben, und dann sollte ein reproduzierbares Verfahren ablaufen, welches Ergebnisse in einer ebenfalls reproduzierbaren Standardform liefert. Die FEM in ihrer klassischen Form, mit dem gesamten Workflow vom CAD-orientierten Preprocessing über den Solver zum Postprocessing mit der Ergebnisaufbereitung, ist unter derartigen Bedingungen nicht einsetzbar. Da die analytischen Methoden hier auch keine Lösung bieten, bleibt nur die Suche nach einem *missing link*.

Fasst man diese Überlegungen vorläufig zusammen, so ergibt sich die Notwendigkeit einer parametrisierten Bauteilbeschreibung verbunden mit einer verallgemeinerten Rechentechnik. Dabei sollten keine über die übliche Ausbildung hinausgehenden Spezialkenntnisse vorausgesetzt werden müssen.

3 Die Idee

Geht man davon aus, dass die analytischen Methoden in den betrachteten Fällen keine Lösung liefern können und die FEM nicht einsetzbar ist, ergibt sich zunächst ein scheinbar unauflösbarer Widerspruch, da geeignete Berechnungsmethoden nicht verfügbar sind. Ein naiver Ansatz könnte darin bestehen, für interessante Bauteilklassen spezielle Algorithmen zu entwerfen, die dann als Analogie zu den traditionellen analytischen Verfahren zu verstehen sind. Angesichts des erforderlichen Aufwandes für die Spezialisierungen erscheint dieser Ansatz eher unrealistisch. Er weist jedoch in eine Richtung, deren Verfolgung vielversprechend aussieht. Die entscheidenden äußeren Merkmale der analytischen Verfahren sind die Bauteilbeschreibung durch eine festgelegte Parametrisierung sowie eine standardisierte Ergebnisbildung. Die Berechnungs-algorithmen müssen dagegen keinesfalls sichtbar sein; es genügt, sie als *blackbox* betrachten zu können. Sie stellen gewissermaßen eine Übertragungsfunktion dar. Mit anderen Worten: Man kann die Berechnungsalgorithmen durch andere ersetzen, solange die Beziehung zwischen Ein- und Ausgabe nicht verändert wird.

An dieser Stelle kommt uns die Universalität – die Aufgabenunabhängigkeit – der FEM zu Gute. Setzt man für die gesuchte Übertragungsfunktion eine FE-Berechnung ein, so kann man grundsätzlich korrekte Ergebnisse erwarten. Was noch fehlt, ist die Reproduzierbarkeit in dem Sinne, dass die Ergebnisse unabhängig vom Anwender sein müssen. Dazu genügt nun die Überlegung, dass der benutzerabhängige Teil der FEM in der Modellbildung besteht. Sofern es also möglich ist, die Modellbildung zu automatisieren, ist die Frage der Reproduzierbarkeit positiv beantwortet. Ein Basiskonzept kann damit aus den folgenden Schritten bestehen:

Beschreibung eines Bauteils durch wenige makroskopische Daten

Automatische Erstellung eines FE-Modells auf der Basis dieser

Parametrisierung

Durchführung der Analyse

Bauteilspezifische Ergebnisbewertung

Mit den bekannten analytischen Verfahren hat diese Vorgehensweise gemeinsam, dass sie auf ein Bauteil bzw. eine Klasse von Bauteilen bezogen ist, da die Modellbildung von den bauteilspezifischen Eigenschaften abhängt.

4 Die Umsetzung

Wegen der Aufgabenabhängigkeit ist es zunächst unverzichtbar, geeignete Bauteilklassen bzw. Bauteilspektren zu identifizieren. Dies kann nur in Kooperation mit Pilotunternehmen geschehen, da weder die Gestaltung der interessierenden Bauteile noch der tatsächliche Berechnungsbedarf a priori bekannt sind. In diesen bauteilbezogenen Informationen steckt konstruktives Wissen, welches akquiriert werden muss. Es umfasst die Erstellung einer Bauteilbeschreibung durch Parameter, die im Wesentlichen einer Sachmerkmalsleiste entspricht, und die Festlegung der zu bestimmenden Analyseresultate zusammen mit einer formalen Ergebnisdarstellung, die den Anforderungen eines prüffähigen Nachweises genügen muss. Das in dieser Phase gewonnene Wissen, in dem die Erfahrungen der Konstrukteure der Pilotunternehmen enthalten sind, unterliegt selbstverständlich zunächst aus Gründen des Wettbewerbs der Vertraulichkeit. Die Struktur der beschreibenden Daten wird zusammen mit den Forderungen an die Ergebnisauswertung in einer Wissensbasis gespeichert.

Im nächsten Schritt muss das FE-Modell in der geforderten reproduzierbaren Weise erstellt werden. Dazu wird ein programmierbarer Netzgenerator benötigt. Er wird aus der

Wissensbasis mit den beschreibenden Parametern versorgt und erzeugt eine bauteilangepasste Elementierung. Zur Sicherung der Qualität sind hier weitere Vorarbeiten erforderlich. So muss durch einen erfahrenen FEM-Anwender die Art der Elementierung in Abhängigkeit von den Anforderungen an die Berechnung vorab festgelegt werden. Dieses besondere Regelwerk kann nur enger Zusammenarbeit von Konstrukteuren und FEM-Experten erstellt werden. Gleiches gilt für die Ergebnisauswertung. Die FEM liefert bekanntlich detaillierte knoten- und elementbezogene Daten. Hieraus müssen die für das Bauteil charakteristischen Festigkeitswerte extrahiert bzw. abgeleitet werden.

Es ist offensichtlich, dass für die Implementierung dieser Vorgehensweise die bekannten marktgängigen FE-Systeme eher ungeeignet sind. Sie bieten zwar alle durchaus die Möglichkeit einer automatisierbaren Netzgenerierung und können angepasste Ergebnisreports erstellen, für den Einsatz in einem KMU sind sie jedoch viel zu kostspielig. Zudem würden sie auch nur in einer stark eingeschränkten Weise genutzt, so dass die übliche Form einer Nutzungslizenz unwirtschaftlich ist.

Einen gangbaren Ausweg aus dieser Situation bietet der Einsatz von Opensource-Software. Auf den ersten Blick erscheint dieser Gedanke möglicherweise abenteuerlich; sehr oft wird mit der Opensource-Bewegung das Prinzip unzuverlässiger Bastellösungen verbunden. Im Falle der FEM stellt sich die Situation jedoch deutlich vorteilhafter dar. Es gibt inzwischen eine Reihe hochwertiger und validierter Solver, also derjenigen Softwarekomponente, die die eigentliche Berechnungsarbeit der FEM erledigt. Stellvertretend seien hier CalculiX [5] und Code_Aster [6] genannt. Beide Systeme werden professionell und produktiv eingesetzt. Frei verfügbare Software für die Elementierung ist nicht ganz so leicht zu finden; als Vorteil ist hier aber anzusehen, dass die in Frage kommenden Bauteile geometrisch eher einfach sind. Die CAD-Fähigkeiten von allgemeinverwendbaren Preprocessoren, insbesondere die Funktionen für den Import und die Manipulation von CAD-Modellen, werden hier nicht benötigt, so dass einfachere Produkte genügen. Das bereits genannte Paket CalculiX enthält auch einen einfachen Pre-/Postprocessor, dessen Möglichkeiten für den angestrebten Zweck ausreichen dürften.

Eine endgültige Festlegung der zu verwendenden Softwarekomponenten kann zur Zeit allerdings noch nicht getroffen werden. Hierzu müssen zunächst die diversen Bauteile und Bauteilspektren erfasst und analysiert werden.

Welche Vorteile die Berechnung nach diesem neuartigen Konzept im Vergleich zu einer konventionellen FEM-Analyse bietet, wird in Bild 1 deutlich. Der wesentlich höhere Anteil

automatisierbarer Prozessschritte verhindert wirksam die durch willkürliche Aktivitäten des Benutzers möglichen Fehler. Echte anwendergesteuerte Aktionen werden nur bei der Erfassung der Bauteile und ihrer Aufbereitung für die Wissensbasis benötigt, und an dieser Stelle ist infolge der Zusammenarbeit zwischen Konstrukteuren, FEM-Experten und Softwareentwicklern in jedem Fall ein tragfähiger Konsens sichergestellt.

Die bis hier geschilderten Aktivitäten sollen im Rahmen eines Verbundprojektes, an dem das Softwarehaus TEDATA in Bochum und der Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik der RUB beteiligt sind, als Erweiterung der Software MDESIGN implementiert werden. Für dieses Projekt, bei dem der Hochschulpartner den wissenschaftlichen Teil mit dem Wissensmanagement und der Modellbildung übernimmt und der Industriepartner für die softwaretechnische Umsetzung und die Vermarktung verantwortlich ist, ist unter der Kurzbezeichnung **ParaFEM** im Wettbewerb **Produktion.NRW** eine Förderung beantragt worden. Es wird erwartet, dass die Arbeiten im vierten Quartal 2009 beginnen können.

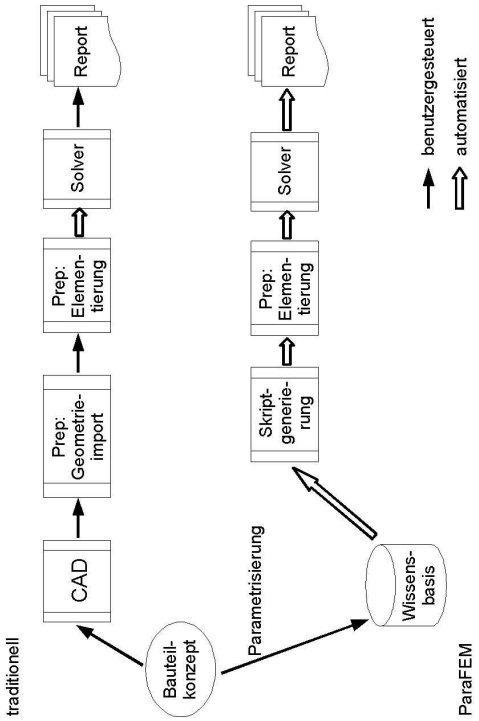


Bild 1: Traditioneller FEM-Workflow und ParaFEM-Workflow

5 Zusammenfassung

Mit dem Konzept von ParaFEM wird für KMU eine Softwareumgebung zur Verfügung gestellt, die Festigkeitsberechnungen für Bauteile ermöglicht, die mit den bisher ausschließlich genutzten analytischen Verfahren nicht durchführbar sind. Die dazu verwendete Methode der Finiten Elemente wird so aufbereitet, dass sie für den Anwender nicht sichtbar ist. Sie wird über ein bauteilspezifisches Regelwerk gesteuert. Aus der geplanten fortlaufenden Einbindung weiterer Bauteilklassen wird letztlich eine umfangreiche Bibliothek mit zuverlässigen Berechnungsverfahren entstehen.

Literatur

[1] MDESIGN: TEDATA GmbH, Königsallee 45, 44789 Bochum http://www.tedata.de

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

[3] Dubbel interaktiv: ISBN 978-3-540-14943-6, ISBN 978-3-540-14942-2

[4] Knothe, Klaus, Wessels, Heribert: Finite Elemente. Eine Einführung für Ingenieure. Springer, ISBN: 978-3-540-72188-8

[5] Velten, Kai: Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers. Wiley, ISBN: 978-3-527-40758-3

[6] Dhondt, Guido; Wittig, Klaus: CalculiX http://www.calculix.de

[7] EDF R&D, Code_Aster http://www.code-aster.org

Anforderungen des Technischen Designs an die Modellierung und Simulation in der virtuellen Produktentwicklung

Günter Kranke

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, TU Dresden
01062 Dresden
Email: guenter.kranke@tu-dresden.de; Internet: http://www.tu-dresden.de/design

Inhalt: *Aufbauend auf dem Beitrag, den das Technische Design in der Produktentwicklung leistet und welcher vor allem dem Erleben des künftigen Nutzers mit dem Produkt verpflichtet ist, werden die besonderen Anforderungen dieser Disziplin an den Entwurfsprozess herausgearbeitet. Um die rational und emotional begründeten Zielstellungen des Designs erreichen zu können, müssen innerhalb des Entwicklungsprozesses geeignete Entwurfsdarstellungen (Veranschaulichungsmittel) eingesetzt werden, die das ganzheitliche Erleben des Nutzers eines Produktes möglichst gut vorwegnehmen. Entsprechend der Theorie der psychischen Handlungsregulation spielen händisch generierte physische 2- und 3D-Darstellungen auch im Entwurfsprozess eine große Rolle. Virtuelle Modelle, wie sie sich im Konstruktionsprozess und für viele spezielle Simulationsaufgaben bewährt haben, sind im Designprozess durch dessen spezielle perzeptive Anforderungen kritisch zu hinterfragen. Für bestimmte Teilaufgaben sind sie bereits eine wichtige Bereicherung im Design, bei anderen ergeben sich aus Sicht des Autors jedoch Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Darstellungsqualität, multisensorischer Wahrnehmungsmöglichkeit und erlebensadäquater Handhabbarkeit.*

Abstract: *Industrial design is dedicated to future user experience. In this paper, related specific requirements to the design process are outlined. In order to reach the rationally and emotionally determined aims of industrial design, appropriate representational means for the anticipation of user experience have to be employed to the design process. According to the psychological action regulation theory, two-dimensional and three-dimensional representations made by hand are important to the design process. Due to specific receptive requirements in industrial design processes, the application of virtual representations as proven for engineering design or simulation tasks, must be scrutinized. For certain sub-tasks in industrial design, those virtual representations are important instruments yet. But for the application to other sub-tasks in industrial design, there is need for research and development concerning rendering quality, multi-sensory perception and handling adequate to user experience.*

Stichwörter: *Designentwurfsprozess, virtuelle Entwurfsdarstellungen, Produkterleben*

Keywords: *industrial design process, virtual design representations, product experience*

1 Technisches Design in der Produktentwicklung

Unter Ingenieuren ist die Auffassung weit verbreitet, dass gute Technik automatisch auch gut aussieht und bestenfalls kleiner formaler Korrekturen bedarf. Aus Sicht des Designers sieht das etwas anders aus. Die Entwicklung neuer technischer Produkte muss immer den Menschen als Nutzer, als Produzenten, als Betroffenen der Auswirkungen des Produktes usw. berücksichtigen. Das ist jedoch nicht durch eine solche „nachträgliche Produktkosmetik“ zu erreichen, sondern erfordert gemeinsam mit allen Partnern im Produktentwicklungsprozess eine problembasierte und menschzentrierte Konzeption bereits in einem sehr frühen Stadium der Produktplanung und -konzipierung. Dabei müssen die Probleme und Anforderungen der vorgesehenen Zielgruppe berücksichtigt werden. Darauf bauen dann der Entwurf und die Gestaltung des neuen Produktes auf [1].

Im Design-Entwurfsprozess werden vor allem die Eigenschaften des künftigen Produktes festgelegt, die das Erleben des Menschen beim Umgang mit dem Produkt bestimmt. Design kann sich deshalb – entgegen landläufiger Vorstellungen – nicht auf formale und farbliche Äußerlichkeiten des Produktes beschränken, sondern muss alle nutzerrelevanten Eigenschaften mit berücksichtigen und beeinflussen. Dieses Erleben ist ganzheitlich und umfasst alle Wahrnehmungssysteme des Menschen in allen Situationen, in denen Mensch und Produkt zusammentreffen.

Um Technik positiv erleben zu können, ist einerseits die Erfüllung objektiver Kriterien (z. B. funktioneller, technischer, ergonomischer, wirtschaftlicher, ökologischer u. a.) erforderlich, aber ebenso muss sie gefallen, was ein subjektives Geschmacksurteil ist [2]. Die bewusste Gestaltung der Anmutung eines Objektes ist bei Konsumprodukten völlig selbstverständlich und wird auch im Investitionsgüterbereich in immer stärkerem Maße einbezogen. Werden doch damit so wichtige Verkaufsargumente, wie Vertrauen, Perfektion, Markenimage u. ä. ganz wesentlich unterstützt und damit eine Hervorhebung aus dem immer stärker nivellierten Produktangebot verschiedener Anbieter ermöglicht. Diese Erlebensdimensionen und damit den Produkterfolg am Markt bereits frühzeitig im Prozess der Produktentwicklung zu beeinflussen, zu gestalten und zu überprüfen, ist ein wichtiges Ziel des Designers.

2 Entwurfsdarstellungen (Veranschaulichungsmittel) im Design

Im Designentwurfsprozess erfolgt, wie auch in der technischen Entwicklung, eine iterative Annäherung des Entwurfes an eine optimale Lösung. Im Design ist es aber oft so, dass sowohl der Ausgangspunkt unscharf definiert ist und dass gemäß der Zielstellung das künftige ganzheitliche Erleben der Technik als Maßstab dienen muss. Alle Zwischenergebnisse und Entwurfsvarianten werden sich in der Regel nicht verbal, in Zahlen oder Berechnungen niederschlagen, sondern in (selbstverständlich nur eingeschränkt) erlebbaren Veranschaulichungsmitteln repräsentieren müssen.

Im Sinne der allgemeinen Modelltheorie [3] sind alle Veranschaulichungsmittel Substitute, sind Verkürzungen eines Modells gegenüber dem (künftigen) Original. Die Eigenschaften von Modell und Original stehen in einer Analogiebeziehung, wobei sich diese Analogie auf die Merkmale bezieht, die dem Schöpfer des Modells (Subjekt der Modellrelation) wichtig erscheinen. Andere Merkmale fallen der Verkürzung zum Opfer: Sie entfallen oder werden vernachlässigt. Die Arbeit mit Veranschaulichungsmitteln durch den damit erfahrenen Designer selbst gestattet es ihm, bestimmte Modelleigenschaften gezielt zu bearbeiten und zu gestalten.

Die verschiedensten Veranschaulichungsmittel haben im Designprozess vier verschiedene Funktionen [4]: Sie dienen dem Entwerfer als Arbeits- und Denkmittel, sie ermöglichen Informationsaustausch und Kommunikation mit anderen an der Entwicklung beteiligten Partnern, sie gestatten die sinnliche Beurteilung eines noch nicht existierenden Produktes zu einem sehr frühen Zeitpunkt und sie haben eine Repräsentationsfunktion. Konkrete Entwurfsdarstellungen können dabei in unterschiedlichen Situationen verwendet werden und gleichzeitig mehrere Funktionen haben. Im Designprozess werden sie als Stellvertreter einer künftigen Realität quasi zur Vorwegnahme des Erlebens benutzt. Da es sich beim Erleben um ein „Kontinuum vom Bewusstlosen bis zum reflektierenden Bewusstsein“ [5] handelt, in das Komponenten des Wollens, Denkens und Fühlens gleichermaßen einfließen, ist das Erleben der Entwurfsdarstellung keinesfalls identisch mir dem Erleben des Originals. Dabei gewonnene Aussagen zum Erleben sind nicht ohne weiteres extrapolierbar auf die Realität. Für den Designer als Subjekt der Modellbeziehung ist es meist kein Problem, die ihm wichtigen Erlebenskomponenten zu selektieren, weil er die Analogiebeziehung selbst herstellt und ihm seine Erfahrung dabei hilft. Mit Veranschaulichungsmitteln unerfahrene Nicht-Designer, die aber regelmäßig als Entscheider gerade in Beurteilungsprozesse involviert sind, werden deren verkürzte Eigenschaften falsch interpretieren, sich

von Merkmalen, die nicht in die Analogiebeziehung einbezogen wurden, beeinflussen lassen und damit sehr wahrscheinlich mit beiderlei Vorzeichen zu falschen Urteilen gelangen.

3 Möglichkeiten und Grenzen virtueller Modelle für den Designprozess

Der Designprozess ist und bleibt ein – insbesondere in frühen Phasen des Entwurfes – von händischer Arbeit geprägter Prozess. Das hat seine Ursache vor allem in der notwendigerweise sehr intuitiven und spontanen Vorgehensweise beim „Zeichnendenken" oder „Modellierendenken", bei dem ein Dialog zwischen dem „entwerfendem Kopf" und seinen manuell angefertigten Darstellungen erfolgt. Im Verlaufe dieses Prozesses wird eine große Zahl von Skizzen erzeugt, gespeichert und zur Weiterverarbeitung wieder eingelesen. Diese Unmittelbarkeit des auch visuell und haptisch erlebbaren Spurenerzeugens auf dem Papier oder dem Schaum- oder Claymodell und das Festhaltens von Entwurfsgedanken ist eine wichtige Voraussetzung dieses Entwurfshandelns und ist in der psychischen Handlungsregulationstheorie von Hacker begründet [6]. Die einzelnen Zwischenschritte beim Entwerfen sind anfangs sehr skizzenhaft unscharf und nähern sich im Verlauf des Entwurfsprozesses dem späteren Ergebnis sukzessive und in rekursiven Schleifen an. Auch die Produkte dieses Prozesses – insbesondere im 3D-Bereich – gestatten eine sehr sinnfällige, unmittelbare und experimentelle Auseinandersetzung mit dem Entwurfs- bzw. Zwischenergebnis durch Berühren, In-die-Hand-Nehmen, Manipulieren, Verändern usw.
Die Arbeit mit dem Computer lässt momentan eine solche unmittelbare und intuitive Arbeitsweise und skizzenhaftes Annähern noch nicht zu. Sie erfordert meist exaktes Festlegen, ist mit wenig sinnfälligen Eingabemedien zu erzeugen und ist deshalb späteren Schritten der Ausarbeitung vorbehalten. Dort bietet der Computer wesentliche Vorteile, wie beispielsweise die bessere Abstimmung mit dem Engineering und die Integration in die Prozesse anderer Entwicklungspartner, umfangreichere Variantenbildung, die schnelle Generierung physischer Modelle durch Rapid Prototyping usw. Virtuelle 3D-Modelle aus CAD- oder Designsoftware stehen dann auch für mannigfaltige Verwendung im Design zur Verfügung. Sie werden von der Zeichnungsgenerierung bis zum Prototypenbau eingesetzt und bringen dort partiell einen hohen Nutzen. Bei scheinbar perfekter Qualität der virtuellen Darstellungen ergeben sich jedoch die immer gleichen Fragen nach der Perzeption, Veranschaulichungsmittel-Funktion und Handhabbarkeit solcher Darstellungen im Design-Entwurfsprozess, beispielsweise hinsichtlich:

- Dreidimensionalität: Am herkömmlichen Bildschirm sind die rechnerinternen 3D-Modelle zwar um alle Achsen frei beweglich und gestatten jegliche Betrachtungsrichtung. Am Bildschirm bleiben sie aber immer 2D-Darstellungen maximal in dessen Größe. Dreidimensional wird dies erst durch weitere Hilfsmittel wie 3D-Monitor, Powerwall oder Cave ohne bzw. mit entsprechenden Betrachtungshilfen. Dort ist auch die Immersion des Betrachters möglich. Die perspektivische Darstellung ist jedoch eine Kameraperspektive und entspricht damit nicht der multiperspektivischen menschlichen Wahrnehmung der Realität. [7]
- Arbeitsmittel: Die 3D-Darstellungen werden meist in CAD-Programmen erzeugt. Die Modelle werden in Präsentationsprogrammen für eine Darstellung in der VR umgewandelt und vorbereitet. Alle vorgesehenen Manipulationen mit (Teilen von) den Modellen oder evtl. unterschiedliche Konfigurationen derselben müssen dabei vorbereitet werden. Bei der VR-Präsentation sind die Modelle nicht unmittelbar und intuitiv handhabbar oder gar bearbeitbar.
- Erleben: Das Erleben des künftigen Produktes in der VR ist rein visuell und unterscheidet sich diesbezüglich in wesentlich stärkerem Maße, als ein herkömmliches physisches Modell von dessen Original. Materialität, Haptik, Bewegungs- und Berührungswiderstände, Geräusche, Objektveränderungen usw. sind einer virtuellen Umgebung (bis auf erste und dafür völlig unzureichende Ansätze) fremd. Das Nutzererleben positiv zu beeinflussen ist, wie eingangs ausgeführt, das zentrale Anliegen des Designs und lässt sich nicht auf den visuellen Wahrnehmungskanal beschränken.
- Kommunikation: VR-Darstellungen sind bislang nur für die eine getrackte Person (Master) korrekt darstellbar. Eine gleichberechtigte Darstellung für zwei oder mehrere Personen, wie sie zur Kommunikation über den Entwurf oder gar zur Interaktion mit weiteren Personen am dargestellten Gegenstand oft erforderlich ist, ist nur mit qualitativen Abstrichen möglich.

4 Schlussfolgerungen

Virtuelle Modelle werden als ein spezifisches Medium die anderen Entwurfsdarstellungen im Designentwurfsprozess nicht ersetzen, den Visualisierungsprozess jedoch bereichern. Sie gestatten auf einfache Weise und mit ohnehin im Prozess entstehenden CAD-Modellen eine schnelle Variantendarstellung und die schnelle Darstellung in Originalgröße – hier vor allem für sehr große Objekte, wie Fahrzeuge, Maschinen und Anlagen. Die Im-

mersion in einer Cave ist vor allem für die Gestaltung von Interieurs und Umgebungen wichtig, bei denen sich der Betrachter in diese hinein begeben kann und die visuelle Raumwirkung auf sich wirken lassen kann.

Virtuelle Modelle leisten damit im Kontext mit vielen anderen Entwurfsdarstellungen einen spezifischen und neuen Beitrag zum Mix mit anderen herkömmlichen Veranschaulichungsmitteln, der für die einzelnen Veranschaulichungsmittel-Funktionen die jeweils passenden Formen von Darstellungen bereit hält. Trotz der angesprochenen Schwachstellen ist die Virtuelle Realität auch für den Designprozess sinnvoll einsetzbar.

Darüber hinaus gilt es natürlich, virtuelle Darstellungsformen weiter zu verbessern, um sie aus Zeit- und Kostengründen auch für Aufgaben einsetzen zu können, die heute mit ihnen noch nicht oder nicht ausreichend gut zu erfüllen sind. Aus Sicht des Designers sind ergeben sich zahlreiche Wünsche für eine erlebensadäquate Darstellung von Entwürfen. Die erforderlichen Neu- und Weiterentwicklungen dieser Techniken sind von ihm selbst allerdings nicht zu lösen und stellen Anforderungen an Ingenieure sowie Soft- und Hardwareentwickler dar, die unmittelbar aus dem Designprozess kommen. Diese sind beispielsweise:

- realitätsnahe Darstellung von Oberflächen mit Strukturen, Schatten und Reflexen für hochkomplexe in Echtzeit zu bewegende Modelle: Beschränkt auf die visuelle Darstellung gibt es hier bereits große Fortschritte, die vor allem von der Rechenleistung der Hardware abhängt.
- Navigation durch die virtuelle Umgebung und Relativbewegung des Nutzers bezüglich eines Modells, die von seinem natürlichen Bewegungsrepertoire abgeleitet wird
- intuitive Handhabung der dargestellten Objekte im virtuellen Raum ohne erlebensbeeinträchtigende „Werkzeuge und Hilfsmittel“
- Wirkliche (nicht vorbereitete) Generierungs-, Veränderungs- und Bearbeitungsmöglichkeiten von Objekten in der Virtuellen Realität in dem Sinne, wie es zum Entwerfen gebraucht wird.
- Möglichkeiten multisensorischer Wahrnehmung in der VR über das visuelle Wahrnehmungssystem hinaus, insbesondere durch akustische und alle Varianten haptischer Wahrnehmung (Berührung, Druck, Temperatur, Struktur usw.)
- gleichzeitige und gleichwertig perfekte Darstellung und gemeinsame Handlungsoptionen in der VR für mehrere Nutzer (Multiuser-VR-Umgebungen) zur Verbesserung der Kommunikation.

Diese Fragestellungen sind natürlich nicht alle neu. An einigen der genannten Punkte wird bereits seit Jahren gearbeitet. Durch die raschen Fortschritte insbesondere der Computertechnologie und Darstellungsmittel sind heute Probleme gelöst, an die vor Kurzem überhaupt noch nicht gedacht wurde. In der virtuellen Welt bieten sich immer neue spezielle Anwendungsmöglichkeiten von Visualisierungen und Simulationen an. Für die umfassende Verwendung virtueller Techniken im Designprozess müssen die vielfältigen Spezialanwendungen zielgerichtet zusammengeführt und ergänzt werden, um dem ganzheitlichem Erleben gerecht zu werden. Das Fachgebiet des Technischen Designs braucht diese neuen Technologien und ist bereit, nach Kräften konstruktiv an deren Weiterentwicklung mitzuarbeiten, sie einzusetzen, zu validieren und künftig hoffentlich auch im Entwurfsprozess zu nutzen.

Literatur

[1] Kranke, Günter: *Technisches Design - Integration von Design in die universitäre Ausbildung von Ingenieuren.* Dr. Hut Verlag München, 2008 – ISBN 978-3-89963-800-4

[2] Uhlmann, Johannes: *Technisches Design; Kunst in der Technik – Grundlagen Teil 1*. TU Dresden, Vorveröffentlichung 2006

[3] Stachowiak, Herbert: *Allgemeine Modelltheorie.* Wien, New York: Springer, 1973 – ISBN 3-211-81106-0

[4] Kranke, Günter: *Untersuchungen zur Urteilsübereinstimmung zwischen einem Objekt in der Realität und ausgewählten Veranschaulichungsmitteln im Design.* Dissertation. Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, 1987

[5] Dörner, D.; Berg D.: *Psychologie. Eine Einführung in ihre Grundlagen und Anwendungsfelder.* Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz, 1985

[6] Hacker, Wilfried: *Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten.* Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1986 – ISBN 3-326-00164-9

[7] Groh, Rainer: *Vom Operieren und Orientieren - zu den Grundformen der Interaktion in 3D-Szenen.* In: Hentsch, N.; Kranke, G.; Wölfel, C. (Hrsg.): Industriedesign und Ingenieurwissenschaften, TUDpress, Dresden, 2008 – ISBN 978-3-941298-19-4, S. 119–131

Erweiterung der Funktionalität von Pro/ENGINEER unter Verwendung der Programmier-Schnittstelle J-Link

Reinhard Rahn, Klaus Brökel

Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD, Universität Rostock
A.-Einstein-Straße 2, D-18059 Rostock
Email: reinhard.rahn@uni-rostock.de, klaus.broekel@uni-rostock.de
Internet: http://www.kt.uni-rostock.de

Inhalt: *J-Link ist ein auf der Programmiersprache Java basierendes Entwicklungs-Werkzeug für das CAD-System Pro/ENGINEER. J-Link ermöglicht es unter anderem, den Funktionsumfang von Pro/ENGINEER zu erweitern, die Kopplung zu externen Programmen, für die kein direkter Übergang innerhalb des Systems vorgesehen ist, zu gestalten, Daten mit diesen Programmen auszutauschen, sowie auf diverse Daten in Pro/ENGINEER zuzugreifen, diese zu manipulieren und vieles mehr.*

Im Beitrag wird gezeigt, welche ersten Erfahrungen beim Nutzen dieser Programmiermöglichkeit gemacht wurden. Es wird darauf eingegangen, welche Philosophie bei der Nutzung von J-Link zugrunde liegt und welche Möglichkeiten gesehen werden, die Kopplung mit Berechnungsprogrammen außerhalb von Pro/ENGINEER sinnvoll zu gestalten.

Abstract: *J-Link is a Java-based development tool for the CAD system Pro / ENGINEER. J-Link allows, among other things, the capabilities of Pro / ENGINEER to extend the linkage to external programs for which no direct transition within the system is provided to make data exchange with these programs, as well as various data in Pro / ENGINEER access, manipulate, and more.*

The contribution will be shown the first experiences at the usefulness of this programming may have been made. It is to be received, what philosophy in the use of J-Link is based and what the options are seen, the pairing with calculation programs outside of Pro / ENGINEER to design sense

Stichwörter: *J-Link, Programmierschnittstelle, Berechnungsprogramm*

Keywords: *J-Link, interface, computation program*

1 Einleitung und Problemstellung

Die Funktionalität von CAD-Systemen hat in den letzten Jahren große Erweiterungen erfahren, so dass deren Einsatzmöglichkeiten dadurch immer vielfältiger wurden. Dennoch können bei weitem nicht alle Anwendungsfälle und Kundenwünsche durch ein noch so umfangreiches Angebot von diversen Tools abgedeckt werden. Um dem Anwender die Möglichkeit zu geben, die Funktionalität eines CAD-Systems den eigenen Bedürfnissen anzupassen, werden für alle CAD-Systeme Programmierschnittstellen bereitgestellt. Für

die Kopplung mit externen Software-Systemen werden entweder prozedurale oder objektorientierte Programmierschnittstellen und vereinheitlichte Datenschnittstellen verwendet. So bietet auch Pro/ENGINEER mit Pro/TOOLKIT und J-Link gleich zwei solcher Programmierschnittstellen an. Dabei basiert Pro/TOOLKIT auf der Sprache C und ist die ältere der Schnittstellen. Das umfangreiche Pro/TOOLKIT API bietet in seiner Bibliothek mehr als 3000 C-Funktionen. J-Link ist ein objektorientiertes Programmier-Tool, das auf der Programmiersprache Java beruht.

Ein Ansatzpunkt auf dem Gebiet der Konstruktionstechnik entstand aus der Notwendigkeit, Möglichkeiten zu schaffen, historisch gewachsene Berechnungsprogramme, die noch in FORTRAN IV geschrieben und im Laufe der Jahre weiter gepflegt und erweitert wurden, auch mit solch einem modernen Entwicklungswerkzeug wie Pro/ENGINEER in Verbindung zu bringen. Diese Notwendigkeit ergibt sich auch, wenn Berechnungs- und Simulationsprogramme für spezielle Maschinenelemente oder Baugruppen, für die in ihrer unkonventionellen Realisierung keine Standards existieren und keine kommerziellen Programme zur Verfügung stehen, mit einem CAD-System in einen direkten Kontakt gebracht werden sollen. Naturgemäß trifft dies auf viele Gegenstände gerade der maschinenbaulichen Forschung zu. Als ein Fall wären hier zum Beispiel Stevenrohrlager zu nennen, die als hydrodynamische Gleitlager ausgeführt werden und bei hochseegängigen Schiffen einen Nenndurchmesser von über einem Meter und ein Verhältnis Breite zu Durchmesser von mehr als zwei aufweisen. Erschwerend kommt noch hinzu, dass diese Gleitlager zur Verbesserung der Schmierungsverhältnisse bei verkanteter und/oder gebogener Welle mit unkonventionellen Schmiernuten versehen sind [2].

2 Was ist, was kann J-Link

J-Link ist ein objektorientiertes und aufwärtskompatibles Programmier-Tool, mit dessen Hilfe Anwender von Pro/ENGINEER die Möglichkeit haben, eigene plattformunabhängige Applikationen zu entwickeln oder Pro/ENGINEER anzupassen. Somit lassen sich die Vorteile von Java und die Funktionalität des CAD-Systems vereinen. Grundlage ist das J-Link-API, das auf dem Pro/TOOLKIT-API aufbaut. Alle Methoden und Funktionen in J-Link gibt es deshalb auch in Pro/TOOLKIT, umgekehrt jedoch nicht. J-Link wird ständig erweitert, um Anwendern einen besseren Zugang zu Pro/ENGINEER aus Java-Anwendungen zu ermöglichen.

Dieses Java-basierte Anpassungswerkzeug bietet vor allem folgende Möglichkeiten:

Zugriffe auf Daten und Modelle in Pro/ENGINEER
Anpassung der Benutzeroberfläche
Schaffen und Modifizieren von Parametern
Einfügen, Lesen und Modifizieren von Familientabellen
Manipulieren von Ansichten und Fenstern.

J-Link-Applikationen können sowohl in einem zur aktuellen Pro/ENGINEER-Sitzung synchronen Modus als auch in einem davon unabhängigen, asynchronen Modus ablaufen. Jedoch sind sie dann jeweils entweder für den einen oder den anderen Modus speziell erstellt und nicht etwa austauschbar. Da für ein direktes, bidirektionales Zusammenspiel von Pro/ENGINEER und einer J-Link-Applikation der synchrone Modus entscheidend ist, beziehen sich die weiteren Ausführungen darauf. In diesem Modus wird die J-Link-Applikation durch Pro/ENGINEER automatisch oder durch den Nutzer aus der Pro/ENGINEER-Sitzung heraus gestartet und ist somit vollständig von ihr abhängig. Die J-Link-Applikation muss für diesen Modus durch eine Registry-Datei in Pro/ENGINEER registriert und damit bekannt gemacht werden. Die Applikation muss außerdem in ihrer Klasse eine *start*-Methode enthalten, in der dann die Aufrufe weiterer (J-Link)-Methoden erfolgen.

J-Link bietet in einer Vielzahl von Paketen eine Sammlung von Klassen mit unterschiedlichen Methoden und Interfaces für vielfältige Aktionen, die sowohl auf einzelne Modelle, andere Sitzungselemente, geometrische Daten, Baugruppen und ihre Elemente, Teile der Oberfläche der Sitzung und andere diverse Repräsentationselemente wie z.B. Einträge in Familientabellen, Toleranzen oder Koordinaten gerichtet sind.

3 Erste realisierte Applikationen

Erste Arbeiten am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD der Uni Rostock richteten sich zunächst auf die Untersuchung von Möglichkeiten, über Jahre gepflegte Berechnungs-Programme mit Pro/ENGINEER in Verbindung zu bringen. Im speziellen Fall stand ein in FORTRAN geschriebenes Programm zur Berechnung der Druckverteilung in hydrodynamischen Radialgleitlagern zur Verfügung [1]. Dieses sollte von Pro/ENGINEER aus dem Modellierer heraus aufgerufen werden können, wenn das Gleitlager dort während einer Sitzung modelliert worden ist.

Der einfachste Weg so etwas zu realisieren, ist die Erweiterung des Tools-Menüs um zusätzliche Buttons, die mit Kommandos hinterlegt werden. Solch ein Kommando startet das Berechnungsprogramm aus der aktiven Sitzung von Pro/ENGINEER (Bild 1).

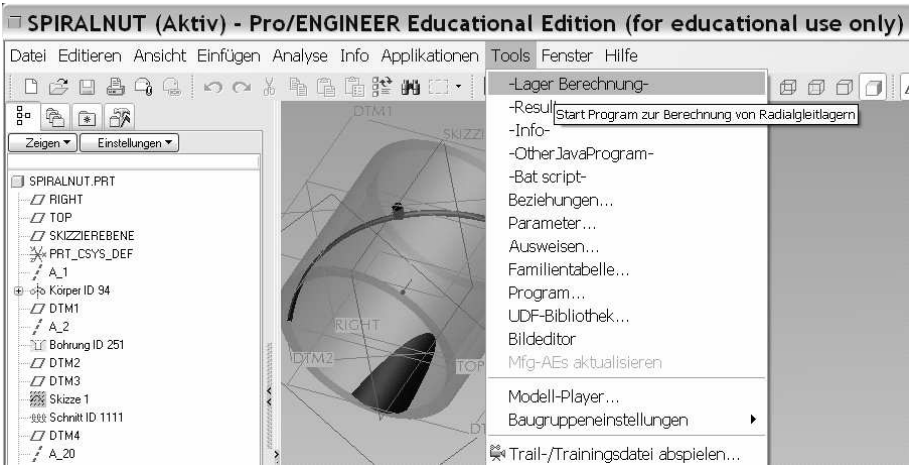


Bild 1: Erweitertes Tools-Menü in Pro/ENGINEER

Dies ist nur ein erster Schritt und zeigt, dass es relativ schnell möglich ist, die vorhandenen Menüs von Pro/ENGINEER zu erweitern oder sogar zusätzliche Popup-Menüs einzuführen. Dazu müssen die entsprechenden Kommandos kreiert werden. Die Programme, die durch diese Kommandos aufgerufen werden, müssen existieren und - wie in der Grafikprogrammierung unter Java mit AWT bzw. Swing üblich - müssen für jeden Butten bzw. Menüpunkt Actionlistener definiert werden, die in der Lage sind, auf Aktionen mit der Maus oder der Tastatur entsprechende Reaktionen zu veranlassen [3].

In einer verbesserten Version wurde dann erreicht, dass nicht nur das Berechnungsprogramm SIRIUS, sondern auch ein Pre-Prozessor (UniGroove) und ein Programm zur Ergebnisdarstellung mittels Gnuplot aufgerufen werden können (Bild 2).

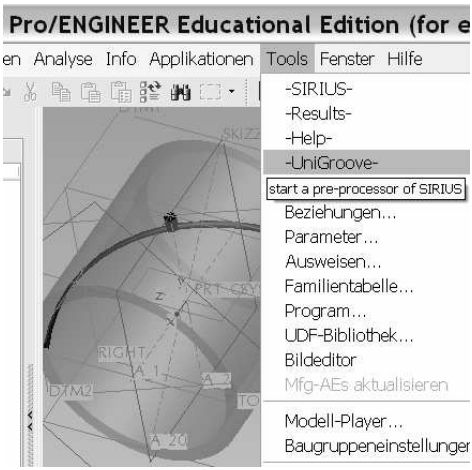


Bild 2: Tools-Menü mit Kommandos zum Start von Berechnungsprogramm, Ergebnisdarstellung und Pre-Prozessor-Aufruf

Die folgende Struktur der Programmverknüpfung zeigt jedoch den grundlegenden noch unerledigten Punkt einer wirklichen Kopplung zu Pro/ENGINEER (Bild3).

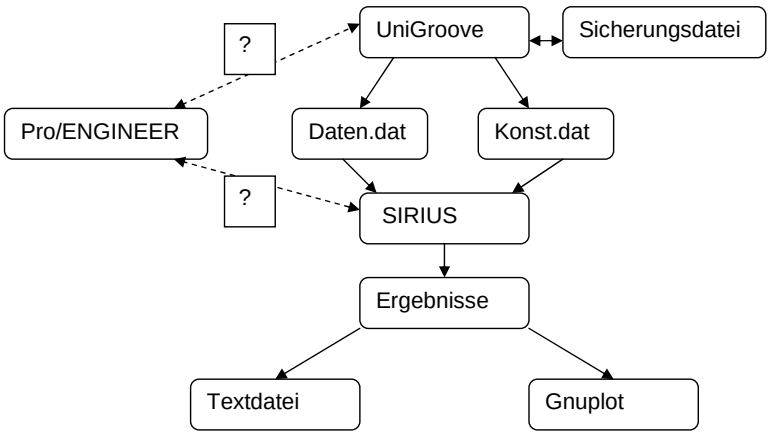


Bild 3: Programmstruktur mit fehlender direkter Verbindung zu Pro/ENGINEER

Der Mangel besteht vor allem darin, dass noch keine direkte Kopplung zwischen dem Modell der aktiven Sitzung in Pro/ENGINEER und dem Pre-Prozessor zur Aufbereitung spe-

zieller Koeffizienten und Parameter für die Berechnung sowie dem eigentlichen Berechnungsprogramm hergestellt wurde. Eine direkte Übergabe von geometrischen Daten findet nicht statt. Das Klicken auf die neuen Menü-Befehle bewirkt lediglich das Starten von verschiedenen externen Programmen, ohne dass damit gleichzeitig Daten an diese übergeben werden.

Im Rahmen weiterer Arbeiten wird untersucht, wie eine direkte Datenübergabe mit Hilfe der in J-Link verfügbaren Mittel (Klassen und Methoden) organisiert werden kann. Dabei ist die Verwendung üblicher Dateiaustauschformate zu umgehen und es muss ein möglichst direkter Weg gefunden werden. Dazu ist es zunächst erforderlich, eine Übersicht zu erlangen, auf welche Art von Daten und in welchem Modus (Skizze, Modell, Zeichnung, ...) J-Link Zugriffsmöglichkeiten bietet, wie diese Daten aufbereitet sind, welche Manipulationswerkzeuge existieren und ob eine Bidirektionalität der Datenübergabe erreichbar ist.

4 Modell einer direkten Kopplung zwischen externen Programmen und Pro/ENGINEER

Das Modell, das gegenwärtig entwickelt wird, ist in Bild 4 dargestellt. Dabei gilt es, insbesondere den Datenfluss zwischen den einzelnen Programmen bzw. Tools zu gewährleisten.

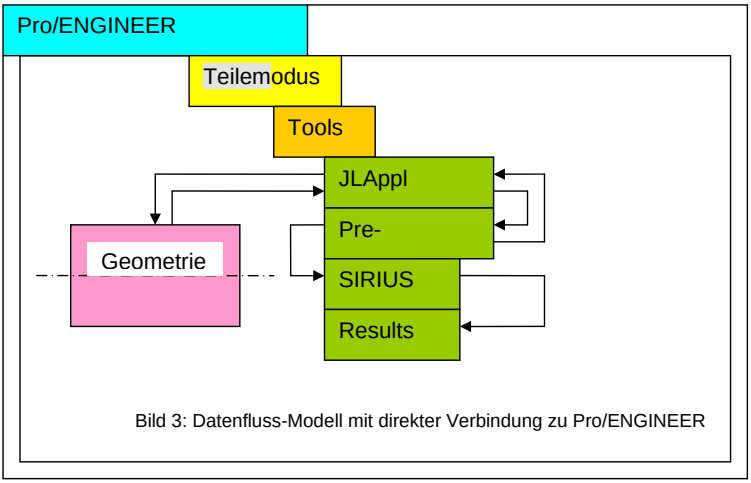


Bild 3: Datenfluss-Modell mit direkter Verbindung zu Pro/ENGINEER

Das Bild verdeutlicht, das eine J-Link-Applikation dafür verantwortlich ist, die relevanten Geometrie-Daten z.B. eines Lagermodells aus der aktuellen Sitzung abzufragen. Dies

kann als Auswahl aus der Liste der Model-Items oder auch interaktiv durch markieren der entsprechenden Konstruktionselemente (KEs) geschehen. Für die interaktive Auswahl stehen mehrere Klassen und ihre Methoden aus dem Paket *com.ptc.pfc.pfcSelect* zur Verfügung. Die Geometrie-Daten werden dann ausgewertet und für die Übergabe an den Pre-Prozessor entsprechend aufbereitet. Für die Abfrage und Auswertung von Geometrie-Daten stellt J-Link das Paket *com.ptc.pfc.pfcDimension* mit verschieden Klassen und Methoden bereit.

Im Pre-Prozessor wird aus diesen Daten, die ihm beim Aufruf übergeben werden, ein diskretisiertes Repräsentationsmodell erstellt und dimensionslose Koeffizienten für die Übergabe an das eigentliche Berechnungsprogramm aufbereitet [4]. Bisher musste das Repräsentationsmodell vom Nutzer selbst interaktiv erstellt werden, was einer zweiten Modellierung gleichkommt. Andererseits ist zu gewährleisten, dass Änderungen im Repräsentationsmodell des Pre-Prozessors vorgenommen werden können (um z.B. bestimmte Eingangsdaten für die Berechnung zu variieren). Diese Änderungen der Geometrie sollen sich dann auch im eigentlichen Teile-Modell widerspiegeln, d.h. die bidirektionale Assoziativität, wie sie der Grundphilosophie von Pro/ENGINEER entspricht, muss hier gewahrt bleiben. Dies ist derzeit noch Gegenstand umfangreicher Untersuchungen und Tests.

5 Fazit

Die Möglichkeit, ein CAD-System um eigene Applikationen zu erweitern ist durch die Programmierschnittstellen innerhalb eines solchen Systems wie Pro/ENGINEER prinzipiell gegeben. Die Notwendigkeit solcher Erweiterungen und Anpassungen an die ganz speziellen Bedürfnisse von Nutzern eines CAD-Systems ergibt sich oft durch sehr spezifische Anforderungen an zu entwickelnde Produkte oder auch durch die Pflege und unverzichtbare Verwendung von nichtkommerzieller Berechnungs- und Simulations-Software. Die Funktionsweise der vielen innerhalb eines solchen APIs bereitgestellten Funktionen bzw. Methoden und ihres möglichen Zusammenspiels ist zunächst schwer zu durchschauen und erfordert umfangreiche Entwicklungs- sprich Programmierarbeit - im Falle von J-Link auf dem Gebiet der objektorientierten Programmierung. Letztlich lassen sich jedoch bemerkenswerte Effekte erzielen, die diesen Aufwand lohnen.

Literatur

[1] Brökel, Klaus: *Das schwellend belastete Radialgleitlager unter Berücksichtigung der Verformung und eines Schmierstoff-Gasgemisches bei beliebiger Spaltgeometrie.* Diss., Universität Rostock, 1980.

[2] Barenthin, Torsten; Brökel, Klaus: *Stevenrohrlager mit beliebiger Nutgeometrie unter hydrodynamischen Aspekten.* Schiffbauforschung 4/2004 (Teil 1) und 2/2005 (Teil 2).

[3] Radev, Nedjalko; Brökel, Klaus: *CAD-Improvements with the help from integration of an external application.* Fifth International Congress Mechanical Engineering Technologies ´06, Varna, Bulgarien

[4] Wegmann, R.; Kreja, S.-U.; Brökel, K.: Modernes Verfahren zur Simulation stationärer und instationärer Belastungen beim hydrostatischen und hydrodynamischen Betrieb von Radialgleitlagern unter Berücksichtigung von Ölzufuhr und Wellenbiegung. VDI-Tagung Gleit- und Wälzlagerungen, Wiesloch 2009, VDI-Bericht 2069

Quantitative Studien über die Nutzung informationstechnischer Systeme im Produktentstehungsprozess

Rainer Stark, Kai Lindow, Grischa Beier*, Christian Kind*, Kaan Özgen

Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb,
Fachgebiet Industrielle Informationstechnik PTZ 4, Pascalstr. 8-9, D-10587 Berlin
Email: rainer.stark@tu-berlin.de; Internet: http://www.iit.tu-berlin.de
*Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (Fraunhofer IPK)
Pascalstr. 8-9, D-10587 Berlin
Email: grischa.beier@ipk.fraunhofer.de; Internet: http://www.ipk.fraunhofer.de

Inhalt: *Die Entwicklung innovativer und zugleich wirtschaftlicher Produkte sichert einem Unternehmen langfristige Wettbewerbsfähigkeit. Um wachsenden Anforderungen an Qualität, Zeit- und Kosteneffizienz in der Entwicklung gerecht zu werden, unterstützen informationstechnische Systeme den Entwicklungsprozess. Die Systemlandschaft entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses wurde im Rahmen zweier Studien untersucht. Eine Studie befasst sich mit dem Einsatz von CAx-Systemen in kleinen und mittleren Unternehmen, um Potenziale für die Nutzung und Weiterentwicklung der Systeme zu identifizieren. Die zweite Studie verfolgt das Ziel, Erkenntnisse über den Systemeinsatz in großen Unternehmen zu erlangen, um analysieren zu können, ob Unternehmen ihre Produktentstehungsprozesse an verfügbare Systeme anpassen oder die Systemauswahl anhand vorhandener Prozesse erfolgt.*

Abstract: *Developing innovative and economical products ensures a company's long-term competitiveness. Growing demands on quality, time and cost efficiency can be met with the help of supporting IT-Systems. The use of systems along the entire product creation process was subject of two studies. One study deals with the use of CAx systems in small and medium-sized enterprises. The second study aims at understanding the system deployment in large enterprises.*

Stichwörter: *Produktentstehungsprozess, rechnerunterstützte Konstruktion, CAx-Systeme, Studie, KMU*

Keywords: *Product creation process, Computer-aided design, Computer-aided technologies, Study, SME*

1 Einleitung

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die wichtigste Herausforderung für Unternehmen bei der Entwicklung und Herstellung industrieller Güter die ständige Verbesserung der Faktoren Qualität, Zeit- und Kosteneffizienz sowie Innovationsfähigkeit [1]. Die Unternehmen sichern sich dadurch ihre Wettbewerbsfähigkeit am Markt. Um dieses Ziel zu erreichen, stellen rechnerunterstützte Systeme (CAx-Systeme) wesentliche Elemente heutiger Produktentstehungsprozesse (PEP) in nahezu allen Branchen und Unternehmen fast jeder

Größe dar [2]. Allerdings kann kaum vorhergesagt werden, welche Potenziale in der Einführung und Anwendung der verschiedenen CAx-Systeme liegen und wie sich dadurch Unternehmensprozesse verändern [3].

Die Gesamtheit aller eingesetzten rechnerunterstützten Systeme entlang des PEP im Unternehmen wird als Systemlandschaft bezeichnet. Bild 1 zeigt schematisch die allgemeinen Einsatzgebiete verschiedener Systeme entlang des PEP. Die Systemlandschaft soll dabei einerseits an die Bedürfnisse der Anwender angepasst sein und andererseits den Geschäftsprozessen genügen [4, 5, 6].

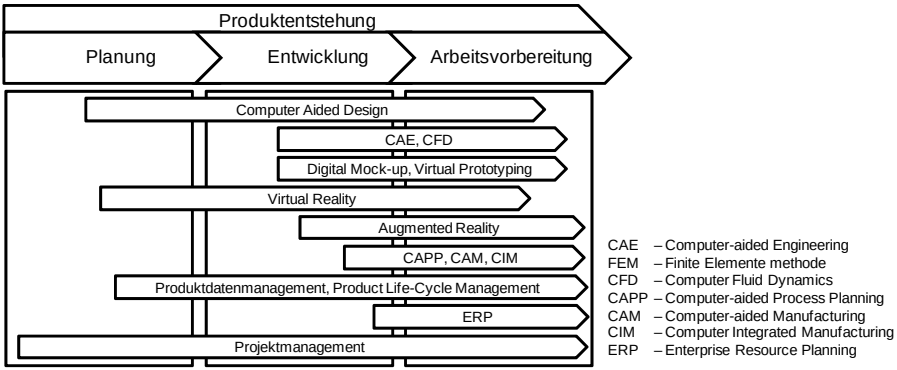


Bild 1: Systemlandschaft entlang des Produktentstehungsprozesses (nach [4, 5, 6])

Das Fachgebiet Industrielle Informationstechnik der Technischen Universität Berlin und das Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik haben zwei Studien durchgeführt. Ziel dieser Studien war das Erfassen und Analysieren von Informationen zum Einsatz von informationstechnischen (IT) Systemen entlang des PEP, um den tatsächlichen Nutzen sowie den Stellenwert von CA-Systemen im industriellen Umfeld mittels verschiedener Kriterien zu quantifizieren. Darüber hinaus wurde untersucht, inwiefern PEP mit eingesetzten CAx-Systemen wechselwirken. Die Studien basieren auf standardisierten Fragebögen, um die Antworten auf einer vergleichbaren Basis auswerten zu können. Die Ergebnisse der Umfragen werden in diesem Beitrag vorgestellt und ausgewertet.

2 Studie zum Einsatz von CAx-Systemen in KMU

2.1 Zielsetzung und Hypothese

Durch den Einsatz von CAx-Systemen ergeben sich in den unterschiedlichen Branchen Optimierungspotenziale. Diese Potenziale beeinflussen wichtige betriebswirtschaftliche

Kennzahlen wie Rentabilität, Effizienz oder Produktivität. Für Unternehmen stellt der zielgerichtete Einsatz leistungsstarker CAx-Systeme einen Ansatz dar, diese Kennzahlen positiv zu beeinflussen und damit den Produktentwicklungsprozess zu beschleunigen und zu verbessern.

Den hohen Investitionskosten für CAx-Produkte und eventuell notwendigen Schulungen der Mitarbeiter zum gewinnbringenden Einsatz dieser Produkte stehen dabei eine Kosten- und Zeitreduktion im Arbeitsprozess gegenüber. Die hohen Anschaffungskosten können sich somit frühestens mittelfristig amortisieren.

Um diese Effekte im industriellen Umfeld zu überprüfen, hat das Fraunhofer IPK eine Studie durchgeführt. Ziel der Studie ist, quantitative Potenziale für eine Optimierung der Produktentstehung in KMU durch die gezielte Einführung von CAx-Softwarewerkzeugen zu identifizieren.

2.2 Durchführung und Ergebnisse

Um den Stellenwert der verschiedenen IT-Systeme bewerten zu können, wurde ein Fragebogen an über 1000 deutsche KMU aus dem Maschinen- und Anlagenbau verteilt. KMU wurden für die Untersuchung ausgewählt, da die erteilten Auskünfte so ein ganzes Unternehmen und nicht nur Fachabteilungen mit unbekannter Abgrenzung zu anderen Entwicklungsabteilungen abbilden.

Der Fragebogen konzentriert sich auf die Frage nach Zeitersparnis, Kostenreduktion und Verbesserung des Innovationsgrades durch die Einführung oder den Wechsel von CAx-Systemen. Die Umfrage stellte dabei fünf Kategorien von rechnerunterstützten Systemen in den Mittelpunkt: CAD, CAE, CAM und PDM/PLM sowie IT-Anwendungen zur Unterstützung der Kommunikation in der Produktentwicklung.

Ungefähr 11% der befragten Unternehmen haben Auskünfte erteilt, was eine allgemeine Trendaussage erlaubt. Bild 2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der eingesetzten CAx-Systeme bei den teilnehmenden Unternehmen. Am häufigsten werden CAD- und CAE-Systeme eingesetzt, wobei die starke Diskrepanz der beiden Häufigkeiten überrascht, da bisherige Erkenntnisse eine starke Korrelation zwischen den beiden Systemkategorien nahe legen.

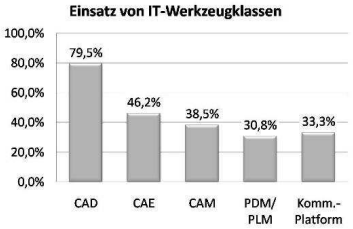


Bild 2: Häufigkeit der eingesetzten CAx-Werkzeuge

Alle Systemkategorien wurden in der Umfrage als ähnlich effizienzsteigernd in Bezug auf Zeitaufwand für eine Entwicklungstätigkeit eingeschätzt, wobei die CAD- und CAM-Systeme die größten Potenziale bieten (Bild 3).

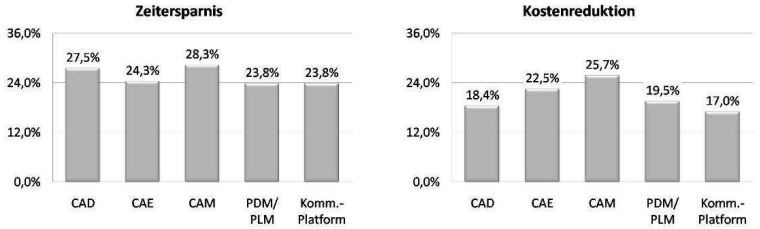


Bild 3: Prozentuale Zeit- und Kostenreduktion bei Einsatz des jeweiligen CAx-Systems

Bei der Einschätzung der Kostenreduktion durch die Einführung von Softwaresystemen werden Werkzeuge zur Unterstützung der Produktfertigung am besten bewertet. Mehr als ein Viertel der bisherigen Kosten kann durchschnittlich durch die Etablierung von CAM-Unterstützung eingespart werden (Bild 3).

Als Kernergebnis der Umfrage kann festgestellt werden, dass sich durch die Einführung von CAx-Systemen zur Unterstützung der Produktentstehung bei den betrachteten Unternehmen sowohl eine Steigerung der Kosten- und Zeiteffizienz als auch eine Verbesserung des Innovationsgrades ergeben hat (Bild 4).

2.3 Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Bild 4 fasst die erzielten Ergebnisse zusammen für den Zeitraum 2006 bis 2007 in Abhängigkeit von der Unternehmensgröße zusammen.

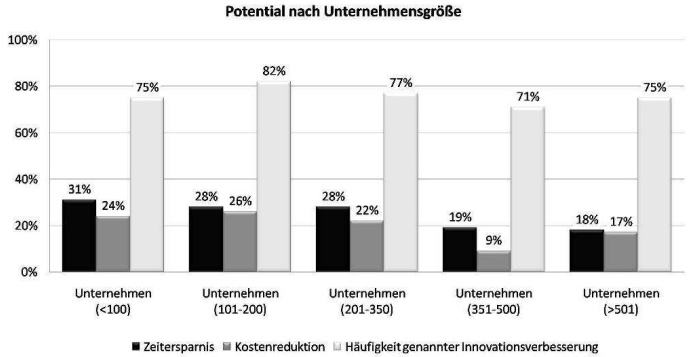


Bild 4: Überblick der Umfrageergebnisse nach Mitarbeiterzahl der Unternehmen

Auffällig ist die Tendenz einer wachsenden Zeitersparnis durch den Einsatz geeigneter CAx-Systeme, je geringer die Mitarbeiterzahl eines Unternehmens ist. Eine Beschleunigung der Entwicklungstätigkeit in einem Umfang von bis zu 31% bedeutet eine deutliche Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit.

Die Ergebnisse der Studie untermauern die Hypothese, dass die Einführung geeigneter CAx-Werkzeuge einen positiven Effekt für wichtige betriebswirtschaftliche Kennzahlen wie Rentabilität, Effizienz, Produktivität oder Innovation hat.

3 Studie zum Einsatz von CAx-Systemen in großen Unternehmen

3.1 Zielsetzung und Hypothese

In der Literatur finden sich zahlreiche Beispiele aus der industriellen Praxis, die aufzeigen, wie Informationstechnik den PEP verbessert hat. Ziel der zweiten Studie war es, die Ursachen einer erfolglosen Integration verschiedener Systeme in PEP großer Unternehmen zu identifizieren, um so Potenziale über die prozessorientierte Nutzung und Weiterentwicklung von CAx-Systemen abzuleiten.

Zentrale Fragestellung war, warum Unternehmen ihre Produkte nicht immer in der geplanten Zeit und Qualität sowie mit den kalkulierten Kosten auf den Markt bringen können. Dazu wurde folgende Hypothese aufgestellt: Die informationstechnische Unterstützung von PEP muss sich den Geschäftsprozessen anpassen, weshalb die Auswahl der Systeme prozessorientiert und nicht technologieorientiert erfolgen sollte.

3.2 Durchführung und Ergebnisse

Es wurden Experten-Interviews mit einer Gruppe von 15 Experten aus den Bereichen Entwicklung, Marketing, Logistik und Projektmanagement durchgeführt. Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, lag ein standardisierter Fragebogen vor. Die Experten stammen aus 15 Unternehmen unterschiedlicher Branchen, von denen 2/3 in der Automobil- und Zulieferindustrie tätig sind. Die Ergebnisse der Interviews lassen sich in folgende Kategorien zusammenfassen und beschreiben:

Zusammenhang zwischen den eingesetzten Systemen und der Zufriedenheit mit deren Nutzung im Unternehmen,

Zufriedenheit bei technologie- oder prozessorientierter Systemauswahl sowie Auswahl mit und ohne methodischer Vorgehensweise und

Verbesserungen der Faktoren Kosten, Zeit und Qualität im PEP durch technologie- oder prozessorientierte Systemauswahl.

Die Studie lässt die Vermutung zu, dass eine höhere Anzahl unterschiedlicher Systeme in einem Unternehmen die Zufriedenheit der Nutzung verringert. Einerseits lässt sich die Zufriedenheit mit der Nutzung in Abhängigkeit einer technologie- und prozessorientierten Systemauswahl darstellen und andererseits darlegen, welchen Einfluss eine methodische Systemauswahl auf die Zufriedenheit hat (Bild 5).

Die Ergebnisse zeigen, dass die IT-Unterstützung zu einer höheren Zufriedenheit bei den Unternehmen führt, die ihre Systemauswahl methodisch treffen und die Systeme an ihren Entwicklungsprozessen orientieren. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die prozessorientierte Auswahl im Vergleich zur technologieorientierten günstigere Auswirkungen auf verkürzte Entwicklungszeiten und daher geringere Entwicklungskosten aufweist.

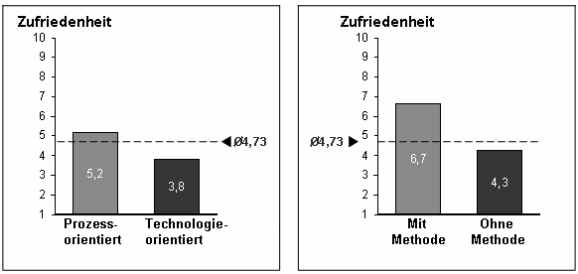


Bild 5: Zufriedenheit mit der prozess- und technologieorientierten Systemauswahl und Auswahl der Systeme mit und ohne methodischer Vorgehensweise

Darüber hinaus geht aus den Interview-Ergebnissen hervor, dass der Grund für ineffiziente Entwicklungsprozesse vermutlich auf die Technologieorientierung bei der Systemauswahl zurückzuführen ist. Bild 6 zeigt, wie sich Technologie- und Prozessorientierung auf die Faktoren Zeit, Kosten und Qualität im PEP auswirken.

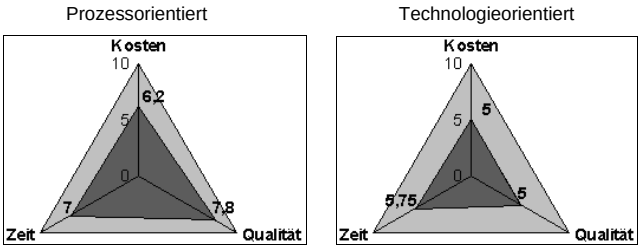


Bild 6: Verbesserungen der Faktoren Kosten, Zeit und Qualität im Produktentstehungsprozess durch technologie- und prozessorientierte Systemauswahl

3.3 Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Die Interviews haben gezeigt, dass die allgemeine Zufriedenheit über die informationstechnische Unterstützung um so stärker sinkt, je mehr unterschiedliche Systeme in einem Unternehmen verwendet werden. Folglich sollten Unternehmen entweder gezielt in einzelne Systeme oder in ganzheitliche Systemlösungen investieren. Es lässt sich ebenfalls feststellen, dass es keine besondere Kombination von rechnerunterstützten Systemen gibt, die den PEP in allen drei Faktoren (Zeit, Qualität und Kosten) gleichermaßen effizienter gestalten würden. Es ist daher nicht immer zweckdienlich, alle aktuell verfügbare Systeme für ein und dasselbe Einsatzgebiet zu implementieren. Nachdem Bild 5 und 6 zeigen, dass der Grund für ineffiziente Entwicklungsprozesse auf die Technologieorientierung bei der Systemauswahl zurückzuführen ist, sollten Unternehmen ihre Geschäfts- bzw. Entwicklungsprozesse durch IT-Systeme unterstützen. Noch effektiver ist allerdings eine methodische Vorgehensweise bei der Systemauswahl. Die Studie lässt den Schluss zu, dass Unternehmen, die sowohl methodisch vorgehen als auch ihre prozessorientiert auswählen, die größte Zufriedenheit aufweisen.

4 Zusammenfassung

Die erste Studie bestätigt die allgemein vorherrschende Meinung, dass der Einsatz von CAD gegenüber anderen CAx-Systemen in KMU dominiert und sehr etabliert ist. Andere CAx-Systeme werden von weniger als 50% der KMU angewendet. Dagegen ist die auffäl-

ligste Beobachtung der zweiten Studie, dass die Zufriedenheit im Unternehmen am größten ist, wenn die Systeme den bereits vorhandenen Prozessen angepasst werden. Ferner bestätigen die Interview-Ergebnisse, dass eine methodische Vorgehensweise bei der Systemauswahl die größten Verbesserungen mit sich bringt.

Literatur

[1] Stark, Rainer; Kind, Christian: *Industrielle Informationstechnik als Schlüsseltechnologie nachhaltiger Produktentstehung.* In: Eßer, G.; Krüger, J.: 80 Jahre Wandel der Fabrik. Berlin: INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, 2008

[2] Krause, Frank-Lothar; Jansen, Helmut; Kind, Christian; Rothenburg, Uwe: Virtual Product Development as an Engine for Innovation. In: Krause, F.-L.: The Future of Product Development. Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. Berlin: Springer-Verlag, 2007.

[3] Stark, Rainer; Krause, Frank-Lothar; Kind, Christian; Rothenburg, Uwe; Müller, Patrick; Stöckert, Henryk: *Competing in Engineering Design – the Role of Virtual Product Creation.* In: Roy, R.; Shehab, E. (Hrsg.): Competitive Design. Proceedings of the 19th CIRP Design Conference. Cranfield: Cranfield University Press, 2009.

[4] Vajna, Sandor; Weber, Christian; Bley, Helmut; Zeman, Klaus; Hehenberger, Peter: *CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung.* 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

[5] Spur, Günter; Krause, Frank-Lothar: *Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik.* München Wien: Carl Hanser Verlag, 1997.

[6] Krause, Frank-Lothar; Franke, H.-J.; Grausemeier, Jürgen (Hrsg.): *Innovationspotentiale in der Produktentwicklung.* 1. Auflage. München Berlin: Carl Hanser Verlag, 2006.

Experimenteller Beitrag zur Verbesserung virtueller Werkzeuge

van Bargen, Oliver; Just, Thomas; Lyszczan, Peter

Fachgebiet Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik, TU-Berlin, Strasse des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Email: sekretariat@fgktem.tu-berlin.de; Internet: http://www.ktem.tu-berlin.de

Inhalt: *Im Rahmen dieses Beitrages sollen drei Beispiele für virtuelle Simulationen vorgestellt werden. Hierbei handelt es sich um je ein Beispiel aus der Verbindungstechnik, der Antriebstechnik und der Schwingungstechnik. Anhand dieser Beispiele wird der Zielkonflikt bei der Durchführung solcher Simulationen herausgearbeitet. Dieser Konflikt besteht zwischen der Allgemeingültigkeit der Simulationsergebnisse auf der einen und der Erkenntnistiefe auf der anderen Seite.*

Abstract: *This paper presents three examples of virtual simulations taken from the fields of drive engineering, joining technology and vibration analysis. These examples show the interdependencies and conflicts between the goals of these simulations: namely exactness and generality of results.*

Stichwörter: *virtuelle Simulation, Rändelpressverband, gecrackte Pleuel, numerische Modalanalyse*

Keywords: *virtual simulation, knurled interference fit, cracked cod-rods, numerical modal analysis*

1 Einleitung

Die inflationäre Entwicklung zur Verfügung stehender Hardware hat in den vergangenen Jahren zu einer immer größeren Verbreitung von virtuellen Simulationstechniken im Ingenieursbereich geführt. Häufig ist bei der Anwendung die Tendenz zu erkennen, dass durch immer ausgefeiltere Modelle versucht wird, klassische Versuche und reale Messungen zu ersetzen.

Gleichzeitig ist immer wieder zu beobachten, dass sich in der Realität zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den durch virtuelle Simulationen vorhergesagten Eigenschaften eines Systems und den am realen System entsprechend vermessenen Eigenschaften ergeben. Die Praxis der virtuellen Simulation setzt zur Behebung dieses Problems häufig einen Schritt der Modell-Kalibrierung bzw. oft auch als „Bedatung“ bezeichnet ein.

Hierbei wird versucht, für möglichst viele Parameterwerte des betrachteten Systems Werte festzulegen, die entweder allgemein bekannt sind, oder aus Erfahrungswissen abgeschätzt werden können. Ferner ist häufig zu beobachten, dass virtuelle Modelle mit zum

Teil unphysikalischen Parameterwerten auf ein bestimmtes Systemverhalten getrimmt werden, dass aus anderweitig gewonnener Erfahrung heraus erwartet wird.
Obwohl die Modell-Kalibrierung in vielen Fällen zu beachtlichen Übereinstimmungen zwischen virtueller Simulation und realen Systemeigenschaften führt, ist sie als eine wesentliche Restriktion der virtuellen Simulation zu sehen. Insbesondere ist sie häufig stark von implizitem Wissen und Erfahrung des einzelnen Anwenders abhängig.
Ferner lassen sich brauchbare Daten für die Kalibrierung häufig nur mit Messungen von einzelnen Systemparametern gewinnen. Der direkte Abgleich des Modells mit kompletten Systemeigenschaften ist sogar erst nach Fertigstellung von zumindest einem in Bezug auf die betrachteten Eigenschaften vollständigen Prototypen möglich.
Diese Problematik schränkt einerseits die Einsparpotenziale durch den Einsatz virtueller Werkzeuge erheblich ein. Andererseits kann die angesprochene Bedatungsproblematik auch zu erheblichen Mehrkosten führen, wenn wesentliche Modellparameter des virtuellen Modells, wie in der Praxis häufig angewandt, aus ähnlichen Vorgängersystemen gewonnen werden. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass dem virtuellen System Eigenschaften zugeschrieben werden, die nicht bzw. nicht mehr gegeben sind. Hieraus resultierende Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Verhalten des Systems werden häufig erst nach Fertigung eines entsprechenden Prototyps erkannt und können oft nur noch durch hohen Zeit- und Kostenaufwand korrigiert werden.

2 Hintergrund und Begriffsabgrenzung

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass für virtuelle Simulationen zwei Arten von Eingangswerten benötigt werden. Zum einen grundsätzlich bekannte bzw. zugängliche Größen, wie etwa die Dichte der zu verwendenden Materialien oder die Geometrie des zu untersuchenden Gegenstandes. Diese Werte zeichnen sich dadurch aus, dass sie recht sicher bestimmt werden können und nur einen geringen Schwankungsbereich in den Simulationsergebnissen und nur geringe Abweichungen zwischen simuliertem und realem Verhalten erzeugen. Sie sollen hier als allgemeine Parameter bezeichnet werden. Zum anderen werden noch Größen benötigt, die spezielle physikalische Eigenschaften beschreiben, deren Wirksamkeit bzw. deren Vorhandensein abhängig von der konkreten Anwendung bekannt sind, ohne das diese direkt zahlenwertmäßig bestimmt werden können. Typische Beispiele für solche Größen sind etwa Reibwerte, Dämpfungen oder auch Kennwerte für plastische Verformungen. Diese Größen erzeugen üblicherweise durch ihren unscharfen

Charakter ein vergleichsweise breites Spektrum an möglichen Simulationsergebnissen bzw. Systemeigenschaften und sind häufig der Grund für Diskrepanzen zwischen Simulation und realem Verhalten. Sie seien hier als spezifische Parameter bezeichnet.
Insbesondere bei der Bestimmung der spezifischen Parameter wird häufig auf zum Teil scheinbares Erfahrungswissen zurückgegriffen, wenn in frühen Phasen einer Produktentwicklung noch nicht genügend belastbare Daten des Systems zur Verfügung stehen. Problematisch ist ferner, dass in der Realität spezifische Parameter durchaus direkt oder implizit von allgemeinen Parametern abhängen können und umgekehrt, sodass das reale System im Gegensatz zur virtuellen Simulation nicht sauber in die eingeführten Parametertypen zerlegt werden kann. Entsprechend findet man häufig in virtuellen Simulationen ebenfalls Vermischungen beider Parametertypen; etwa wenn durch Variation des E-Moduls in Schwingungssimulationen versucht wird, ein bekanntes Schwingungsverhalten des realen Systems nachzubilden, obwohl der E-Modul für die betrachteten Werkstoffe zahlenwertmäßig leicht bestimmbar ist. Zur Verdeutlichung der eingeführten Systematik sollen im Folgenden drei Beispiele für virtuelle Simulationen vorgestellt werden.

3 Modalanalyse eines Rotorprüfstandes

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zu Schwingungen in Luftfahrttriebwerken ist an der TU-Berlin ein Rotorprüfstand entwickelt worden. Von zentralem Interesse war hierbei vor allem das Schwingungsverhalten der Welle mit den auf ihr befindlichen Bauteilen.
Bereits ein früher Entwurf des Prüfstandes im 3D-CAD-System CATIA V5 (siehe Bild 1 links) liefert die meisten benötigten Eingangsdaten für eine Modalanalyse des Rotors mit der bekannten FEM-Software NASTRAN. Zugrunde gelegt werden hierfür lediglich die Innen- und Außendurchmesser der einzelnen Wellenabschnitte, sowie deren Längen und das Material aus dem die Bauteile gefertigt sind (E-Modul, Dichte, Querkontraktionszahl), sowie die Massen der einzelnen Bauteile. Alle diese Angaben können als allgemeine Parameter; also mit guter Nährung bekannte Werte; betrachtet werden. Berücksichtigt man ferner eine frei-freie Lagerung des Systems, so lassen sich im Rahmen der klassischen Maschinendynamik die Eigenfrequenzen der Rotorwelle bestimmen.

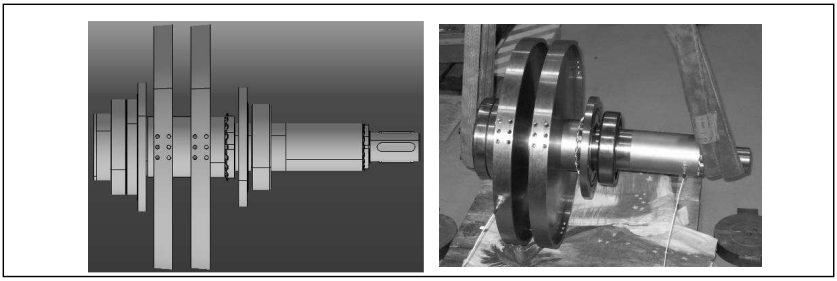


Bild 1: Versuchsrotor: CAD-Modell (links); reale Baugruppe (rechts)

Um die Aussagegüte dieser Simulation beurteilen zu können, werden im Folgenden experimentell am realen Bauteil (Bild1; rechts) ermittelte Eigenfrequenzen den Simulationsergebnissen gegenüber gestellt.

Um diese Daten gewinnen zu können, war vorab die Fertigung des vollständigen Rotors erforderlich. Dieser wurde dann an Tragschlingen an einem Brückenkran befestigt und mittels eines Modalhammers zu Schwingungen angeregt. Mit Beschleunigungsaufnehmern konnte dann der Amplitudenfrequenzgang der Stillstandseigenfrequenzen des Rotors bestimmt werden

Auffällig ist, dass die Eigenfrequenzen des realen Systems deutlich von denen der virtuellen Simulation abweichen. Die erste Biegeeigenfrequenz liegt beim realen System bei ca. 400 Hz und damit fast 50 % niedriger als bei der virtuellen Simulation.

Die Erklärungen und Ursachen für die Abweichungen sind vielfältig. Zunächst weicht die Lagerung des realen Systems durch die verwendeten Traggurte von der idealisierten freifreien-Lagerung in der virtuellen Simulation ab. Entsprechende Unterschiede lassen sich beim Vergleich der Eigenformen von virtueller Simulation und Messung zwar nachvollziehen, sie genügen jedoch nicht, um die großen Abweichungen gänzlich zu erklären.

Des Weiteren sind viele spezifische Parameter zu Gunsten der einfachen Modellierung oder schlicht aus mangelnder Kenntnis ihrer Werte im virtuellen Modell nicht berücksichtigt. So besteht der reale Rotor aus diversen Bauteilen, die über verschiedene Verbindungstypen (Passfedern, Pressungen etc.) miteinander gekoppelt sind. Insgesamt handelt es sich also eigentlich um ein komplexes System von einer ganzen Anzahl von Körpern, die über zum Teil komplizierte Mechanismen wie Reibung, Pressung und Formschluss miteinander wechselwirken.

Jeder dieser Mechanismen einzeln kann mehr oder weniger befriedigend mit einer gewissen Anzahl an spezifischen Parametern beschrieben werden. Hierdurch ist allerdings nicht die Frage zu beantworten, wie die zugehörigen Parameterwerte in einer ggf. angepassten virtuellen Simulation zu wählen sind, um das reale Systemverhalten abzubilden.

4 Simulation von Rändelpressverbindungen

Rändelpressverbindungen sind Welle-Nabe-Verbindungen, bei denen die Welle mit achsparallelen Rändeln nach DIN 82 in eine meist weichere Nabe gepresst wird. Durch das Einpressen mit einem definierten Übermaß wird in der Nabe ein Negativprofil der Rändelzähne erzeugt.

Das Einpressen mit Übermaß und die dabei entstehende Verzahnung der Bauteile, führen zu einem kombinierten Kraft- und Formschluss in der Fuge. Der zusätzliche Formschluss ermöglicht dieser Welle-Nabe-Verbindung die Übertragung höherer Drehmomente als klassischen Pressverbindungen.

Da diese Art der Verbindung (Bild 2 links) bisher noch nicht systematisch untersucht worden ist und somit keine Informationen über die physikalischen Wirkmechanismen in der Fuge vorliegen, sollen diese näher untersucht werden. Ein wichtiger Bestandteil ist hierbei die Entwicklung eines FE-Modells für die numerische Berechnung der Druckverteilung in der Fügefläche, da diese nicht direkt gemessen werden kann.

Der Fugendruck soll dabei in zwei Phasen analysiert werden. In der ersten Phase ist die Druckverteilung nach dem Fügen zu bestimmen und in der zweiten Phase muss die Änderung dieser Verteilung bei verschiedenen äußeren Belastungen näher untersucht werden.

Beim Fügevorgang drückt bzw. schneidet sich die Rändelverzahnung der Welle in die Nabe und es kommt zu teilplastischen Verformungen und zu Materialabtrag (Bild 2 rechts).

Bild 2: Probe einer Rändelpressverbindung (links); Materialabtrag beim Einpressvorgang (rechts)

Diesen Materialabtrag realitätsnah bei der numerischen Berechnung zu berücksichtigen ist ein erhebliches Problem. Mit heutigen FEM-Programmen können bereits plastische Ver-

formungen bis zur Zerstörung des FE-Netzes berechnet und Aussagen über die dabei auftretenden Beanspruchungen und benötigten Lasten getroffen werden. Allerdings kann das verformte bzw. zerstörte FE-Netz nicht für weitere Berechnungen genutzt werden, was eine weitere Untersuchung des Betriebsverhaltens erschwert.

Für die Berechnung der Rändelpressverbindung sind somit begleitende experimentelle Versuche unerlässlich, die ausgehend von gemessenen Systemeigenschaften eine Kalibrierung der virtuellen Werkzeuge erlauben.

Es besteht die Hoffnung, dass ein mit Hilfe von experimentell ermittelten spezifischen Parametern für Materialabtrag, plastische Verformung der Nabe etc. kalibriertes virtuelles Modell ebenfalls brauchbare Aussagen über die Druckverteilung in der Fügefläche ermöglicht. Die entsprechenden Vorhersagen eines solchen Modells können wiederum nur am Systemverhalten des realen Bauteils (hier etwa dem übertragbaren Drehmoment) überprüft werden.

5 Simulation von gecrackten Pleuelschraubenverbindungen

Das Durchleuchten der spezifischen Bruchflächeneigenschaften hat das FVV geförderte Forschungsvorhaben „Experimentelle und numerische Untersuchungen von gecrackten Trennfugen an Pleueln“ zum Ziel. Insbesondere stehen bei diesem Projekt das Relaxationsverhalten der Pleuelverschraubung sowie die übertragbaren Querkräfte in der Trennfuge im Fokus der Untersuchungen.

Da die Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt eher Grundlagencharakter haben und auf Grund der Zielsetzung ausschließlich die Verschraubung des Pleuels von Belang ist, wurden die Verspannungskörper aus Pleueln herausgeschnitten (im folgenden Standardkörper genannt). Mit diesem Schritt werden Wechselwirkungen zwischen den zwei Verschraubungen an einem Pleuel vermieden (Bild 3).

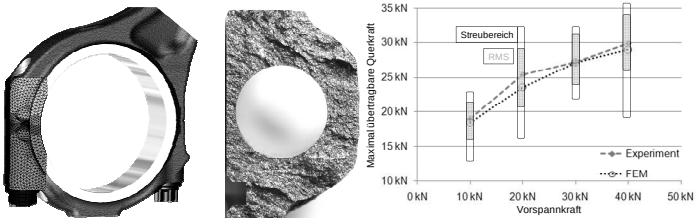


Bild 3: großes Pleuelauge mit dem Ausschnitt des Standardkörpers (links); Bruchfläche (mitte); Vergleich Experiment und Berechnung (rechts)

Der in dem Forschungsvorhaben gewählte Lösungsansatz umfasst sowohl numerische Berechnungen als auch experimentelle Untersuchungen. Im Fokus der numerischen Untersuchungen steht vor allem eine möglichst realitätsnahe Berechnung der maximal übertragbaren Querkaft bei möglichst geringem zusätzlichem Modellierungsaufwand. In den experimentellen Untersuchungen sollen unter anderem die Ergebnisse der FEM-Berechnungen überprüft und der Streubereich ermittelt werden.

Die Modellierung der Standardkörper erfolgte auf Basis der CAD-Daten des zugrunde liegenden Pleuels. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Abbildung der Eigenschaften der realen Bruchflächen in die numerische Simulation. Hierbei wird der Verspannungskörper einteilig mit Tetraederelementen vernetzt und danach im Bereich der realen Trennfugenposition geteilt (Reibkoeffizient im Kontaktbereich 0,1). Hierdurch entstehen Bruchflächentopologien im simulierten Verspannungskörper, mit denen grundsätzlich realitätsnahe Berechnungsergebnisse erzielt werden können (Bild 3).

Mit der numerischen Berechnung kann der Mittelwert der maximal übertragbaren Querkraft recht genau abgeschätzt werden. Die große Streuung, die in erster Linie aus der stark unterschiedlich ausgeprägten Wirksamkeit des formschlüssigen Anteils der Kraftübertragung der verschiedenen Cracktrennfugen resultiert, kann jedoch nicht von der Berechnung abgebildet werden. Grundsätzlich fehlt es hier an passenden spezifischen Parametern, um eine gezielte Berechnung und Auslotung der Randbereiche durchzuführen.

6 Schlussfolgerungen für den experimentellen Beitrag zur Verbesserung virtueller Werkzeuge

Anhand der vorgestellten Beispiele zeigt sich, dass es einen Zielkonflikt bei der Durchführung virtueller Simulationen gibt. Dieser Konflikt besteht zwischen der Allgemeingültigkeit der Simulationsergebnisse, also der Möglichkeit mit wenigen Simulationen ein breites Spektrum an Parameterkonstellationen und damit ggf. Einflussmöglichkeiten auf das Systemverhalten abdecken zu können auf der einen Seite. Und der Erkenntnistiefe der jeweiligen Simulation, also der Genauigkeit mit der eine bestimmte Konstellation untersucht und mit ihrem realen Verhalten in Einklang gebracht werden kann auf der anderen Seite. Insbesondere der Wunsch nach einer echten Substitution von kostspieligen Versuchen, erfordert eine hohe und vor allem verlässliche Erkenntnistiefe bei gleichzeitig hoher Allgemeingültigkeit.

Um im Rahmen dieses Zielkonfliktes zu tatsächlich höherwertigen Simulationen zu kommen, ist es notwendig, die Anzahl der betrachteten spezifischen Parameter zu erhöhen und diese gleichzeitig quantitativ besser abzusichern.
Es drängt sich hier der vordergründig paradoxe Schluss auf, dass eine verbesserte virtuelle Simulationstechnik in vielen Bereichen vor allem einen gesteigerten experimentellen Aufwand zur Absicherung der spezifischen Parameter bedeutet. Hierbei ist anzumerken, dass sachdienlich durchgeführte Experimente zu einem dauerhaften Zuwachs der Kenntnisse über spezifische Parameter führen, sodass sich die gewünschte Kostenersparnis durch verbesserte Simulationen mittelfristig realisieren lässt. Allerdings ist der Kenntniszuwachs häufig in Form von implizitem Wissen bei den jeweils beteiligten Anwendern gegeben, sodass sich für eine effektive Performancesteigerung der virtuellen Werkzeuge drei Forderungen ergeben:

Enge Vernetzung von experimentellen und virtuellen Simulationstätigkeiten
Iteratives Vorgehen zur gegenseitigen Absicherung und Verbesserung
Reichhaltiger Austausch des (impliziten) Erfahrungsschatzes zwischen experimentell und virtuell simulierenden Mitarbeitern