

Tagungsband

1. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2003

am 18. und 19.09.2003
im Ostseebad Kühlungsborn

Herausgegeben von

Klaus Brökel, Gerhard Scharr
Universität Rostock
Institut für Konstruktionstechnik

Frank Engelmann
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion

Ralph Stelzer
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

Shaker Verlag
Aachen 2003

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2249-9

ISSN 0945-0831

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Konstruktionstechnik, Konstruktionslehre, Konstruktion, Maschinenkonstruktion.

Schon die verschiedenen Bezeichnungen lassen auf die Vielfalt der inhaltlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten dieser technischen Wissenschaft schließen. Kommen noch die im Laufe der Jahre entstandenen Spezialisierungen wie Computer Aided Design, Leichtbau und Product Life Cycle Management hinzu, ergibt sich ein sehr viel bunteres Bild einer der klassischen Disziplinen des Maschinenbaus. Wie kann aus dieser Vielfalt eine Veranstaltung werden, die allen Teilnehmern ein attraktives Angebot für die Präsentation und Diskussion von innovativen Ideen macht? Die wichtigsten Gebiete der Konstruktion werden national und international durch große Kongresse wahrgenommen. Für intensive Diskussionen bieten sie in der Regel keinen geeigneten Rahmen. In Arbeit befindliche Themen darzustellen, die auch unkonventionelle und noch nicht voll durchdachte Ansätze enthalten, ist nicht üblich und wohl auch in diesem Rahmen nicht möglich.

Durch die drei beteiligten Lehrstühle und Institute aus Dresden, Magdeburg und Rostock wurde daher die Idee entwickelt, jährlich ein gemeinsames Kolloquium zu aktuellen Problemen der Konstruktionstechnik durchzuführen, welches die Einschränkungen sehr großer Veranstaltungen nicht aufweist und trotzdem für Teilnehmer aus anderen Universitäten, Hochschulen und Firmen offen und attraktiv ist.

In einem überschaubaren und individuell gehaltenen Rahmen wurde einer begrenzten Anzahl von Referenten die Möglichkeit gegeben, in ausreichender Zeit ihre ganz speziellen Diskussionsansätze darzustellen. Nicht nur fertige Forschungsergebnisse sondern offene Fragen, auch im Detail dargestellt und in wissenschaftlichen Nischen angesiedelt, wurden präsentiert. Der audiovisuelle Mitschnitt der anschließenden Diskussionsbeiträge und der Abdruck der wichtigsten Passagen der Diskussionen zu jedem Beitrag im Tagungsband geben der Veranstaltung einen auf Kreativität orientierten, innovativen Charakter. Das weit gefasste Motto des Kolloquiums „Konstruktionstechnik 2003“ ermöglichte es den Referenten, ein sehr breit gefasstes Bild offener Probleme der Konstruktionstechnik darzustellen. Unter den Schwerpunkten „Virtuelle und materielle Prototypen in der Konstruktionstechnik“, „Numerische und graphische Methoden der Modellierung und Simulation in der Konstruktionstechnik“, „Dimensionierung von Konstruktionselementen unter Berücksichtigung von Vor- und Eigenspannungen“ sowie „Modellierung, Berechnung und experimentelle Untersuchung von Maschinenelementen aus faserverstärkten Kunststoffen“ konnten die Teilnehmer einen sehr guten Blick auf die Breite und Tiefe der aktuellen Konstruktionsforschung gewinnen. Der gewählte ganzheitliche Ansatz der Darstellung und Diskussion hat sich als eine sehr gute Möglichkeit erwiesen, dem konstruktionsorientierten Generalisten unter den Konstruktionstechnikern ein geeignetes Forum zu bieten.

Allen Gästen und den an der Organisation der Veranstaltung beteiligten Mitarbeitern möchte ich für ihren Beitrag zum Gelingen des Kolloquiums danken und sie schon jetzt auf die Fortsetzungen der „Konstruktionstechnik“ 2004 und 2005 in Dresden und Magdeburg hinweisen.

Rostock, 10. November 2003

Klaus Brökel

Das Konstruieren als Experiment mit virtuellen Prototypen zur Entwicklung von Bauteilen und Baugruppen

Klaus BRÖKEL

Universität Rostock..... 1

Effiziente Wartung komplexer Systeme mittels Augmented Reality

Ralph STELZER, Bernhard SASKE, Wolfgang STEGER

Technische Universität Dresden..... 13

Methoden zum Erarbeiten und zur Bewertung innovativer Lösungen

Hans-Jochen GÜNTHER

Hochschule Wismar..... 25

Entwicklung einer neuen Generation von hochgenauen Positionier- und Messmaschinen mit Hilfe von Virtual Prototyping

Günter HÖHNE, Markus LOTZ

Technische Universität Ilmenau..... 39

Wissensmodellierung als Basis für "Rule Driven Design"- ein Prototyp für den Einsatz in der schiffbaulichen Unikatentwicklung

Robert BRONSART, Ulf CANTOW, Ventzeslav PETKOV

Universität Rostock..... 51

Entwicklung und Simulation hydraulisch betriebener Vortriebsmaschinen für den Einsatz im Bergbau und Tunnelvortrieb

Martin LÜBBERT

Fachhochschule Gelsenkirchen..... 65

Schadenswahrscheinlichkeit – Grundlage einer neuen Auslegungsphilosophie ?

Dietrich SCHLOTTMANN

Universität Rostock..... 73

Interaktiver Simulator für Arbeitsmaschinen - Entwicklungserfahrungen und -potentiale

Günter KUNZE, Ines GUBSCH, Timo PENNDORF

Technische Universität Dresden..... 83

Ansatz zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit von FEM-Simulationen

Christian WEBER, Rüdiger MAUS

Universität des Saarlandes..... 93

Lernprojekte zur Virtuellen Produktentwicklung an verteilten Universitätsstandorten

Stephan KLÖCKER

Fachhochschule Gelsenkirchen, Abt. Bocholt..... 105

Nutzung von Rapid Prototyping in der studentischen Ausbildung

Frank ENGELMANN, Christiane BEYER, Sven-Jörg BROCKOP

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg..... 115

Automatisierte Optimierung parametrischer Bauteile

Sándor VAJNA, André JORDAN, Steffen CLEMENT

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg..... 127

VIBRATION TESTS AT DESIGN AND CONSTRUCTION OF PIPING FOR STEAM AND HOT WATER

Hristo DRAGANCHEV, Stefan STEFANOV, Petko MARKOV, Emil STOEV

Technical University of Varna 139

Simulation des zuverlässigkeitsbewerteten Ausfallverhaltens technischer Produkte unter Kollektivbeanspruchung

Henrik SCHNEGAS

Hochschule Wismar..... 147

Theoretische Untersuchungen einer starren Ausgleichsrollenkupplung

Zvjatko ATANASOV, Angel BALTADJIEV, Lubomir BOJINOV, Nedyalko RADEV,

Technische Universität Varna..... 153

Gezielt eingebrachte Vorspannungen in FVK-Elemente

Gerhard SCHARR

Universität Rostock..... 161

Fatigue Tests an komplexen Faserverbundstrukturen im Flugzeugbau

Ludger DETERS, Frank ENGELMANN, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gunnar HAASE , Airbus Hamburg..... 169

Mehrachsrig statisch und zyklisch beanspruchter Vergütungsstahl – eine berechenbare Größe

Hans-Peter LÜPFERT, Heinz-Joachim SPIES

Technische Universität Bergakademie Freiberg 179

Das Beanspruchungsverhalten einer Seiltrommel unter nicht rotations-symmetrischer Belastung

Steffen OTTO

Technische Universität Clausthal..... 189

Gestaltung von Arbeits- und Umlenkwalzen für große Geschwindigkeiten und Arbeitsbreiten

Dieter H. MÜLLER, Markus KOCHMANN

Universität Bremen - Bremer Institut für Konstruktionstechnik..... 201

Das Konstruieren als Experiment mit virtuellen Prototypen zur Entwicklung von Bauteilen und Baugruppen

Prof. Dr.-Ing. Klaus BRÖKEL

Universität Rostock

Abstract

Die Methoden der Konstruktionstechnik haben in Verbindung mit den digitalen Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten von Bauteilen durch Nutzung informationstechnischer Werkzeuge zu einer Annäherung von klassischem Experiment und konstruktivem Entwurf geführt. Durch die Betrachtung des Konstruierens als einen Prozess der Modellierung sowie iterativer Instanziierung der Modelle zu Bauteilen und Baugruppen wird es selbst zu einem Experiment mit dem Ziel, systematisch eine auftragsgerechte Lösung zu finden. Der Zusammenhang zwischen methodischem Konstruieren und systematischem Experimentieren wird an Hand von ausgeführten Konstruktionen und den angewendeten Methoden der Darstellung, Animation und Manipulation von virtuellen Modellen dargestellt und diskutiert

Keywords

Konstruieren, Konstruktionstechnik, Prototyp, Experiment, Produktmodell

Einleitung

Konstruktion und Experiment, für die Ingenieure ist dies die Trennung von konstruktivem Entwurf und geräte-experimenteller Untersuchung von Maschinen- und Konstruktionselementen, die oft an Proben oder im Musterbau gefertigten Prototypen durchgeführt wird. Die Methoden der Konstruktionstechnik (z.B. Zielbaumethode, Theorie des Konstruktionsprozesses, Ähnlichkeitsbetrachtung, ...) haben in Verbindung mit den Modellierungs- und Simulationsmöglichkeiten von Bauteilen und ihren Eigenschaften durch Nutzung informationstechnischer Werkzeuge zu einer Annäherung von klassischem Experiment und konstruktivem Entwurf geführt.

Schuld daran oder ermöglicht wurde die Verwischung der Grenze durch verschiedene Methoden integrierende Produktmodelle, verbunden mit der Implementierung extrem mächtiger und dabei innovationsfördernder Methoden. (TRIZ /6/, FEM /7/, Behavioral Modeling /8/, ...)

Die Tätigkeit eines Konstruktionstechnikers (auch kurz Konstrukteur genannt) ist die systematische Entwicklung elektrotechnischer, bautechnischer oder maschinenbaulicher Produkte. /14/

Da auch die Softwareentwicklung nach ähnlichen systematischen Gesichtspunkten erfolgt, wird auch im Bereich der Informatik von der Software-Konstruktion und dem „Software-Engineering“ gesprochen /1/, /2/.

Grundsätzlich muss in allen ingenieurtechnischen Disziplinen eine Maschine, ein Bauwerk, ein Schaltkreis oder ein Programm zur Erledigung einer Aufgabenstellung konstruiert werden, bevor es produziert werden kann. Konstruieren wird daher definiert als „Vorausdenken“ eines an sich beliebigen Produktes. In das Vorausdenken eingeschlossen sind die Untersuchung und laufende Modifikation des Produktes, bis die vorhandenen Eigenschaften den Anforderungen entsprechen. Als Basis für die Konstruktion dienen Modelle des Produktes, die im Laufe des Konstruktionsprozesses generiert und modifiziert werden. Ein Modell wird unter einem bestimmten Aspekt durch Abstraktion aus dem Original abgeleitet. Zu einem bestimmten Modellierungszeitpunkt (z. B. wenn das Original noch nicht existiert), kann das Modell selbst ein Original sein. /1/

Der Begriff der Evolutionären Modellierung in der Software-Entwicklung bedeutet die schrittweise Entwicklung von Produkten durch die Ableitung, Untersuchung, Veränderung, Transformation und Ausführung von Modellen, bis zu einem Zustand, an dem die Modelle alle gewünschten Produkteigenschaften aufweisen. Damit sind sie nach dem Abschluss dieser Manipulationen selbst Originale.

Auf dem Weg zum Original können auch so genannte Prototypen entstehen. Sie stellen ebenfalls Modelle dar, die allerdings Merkmale aufweisen, die zumindest teilweise (in einzelnen Aspekten) weitgehend den Produkteigenschaften entsprechen. Übertragen aus dem Software- Engineering sind Prototypen „einfach herzustellende und zu ändernde Modelle des Produktes, an denen vor dessen Produktion die wesentlichen Eigenschaften erprobt werden können.“ /1/

Zusammenfassend lässt sich eine weitgehende Übereinstimmung in Begriffswelt und Systematik ingenieurwissenschaftlicher Arbeiten feststellen.

Nach /3/ sind die Arbeiten des Konstrukteurs grob in folgende Kategorien einzuordnen:

- Konzipieren (Suchen des Lösungsprinzips)
- Entwerfen (Das Prinzip konkretisieren)
- Ausarbeiten (Erstellung von Unterlagen)
- Berechnen, darstellen und Informationsbeschaffung in allen Konstruktionsphasen.

Alle genannten Phasen der Produktentwicklung können durch materielle und/oder virtuelle experimentelle Untersuchungen begleitet werden. Die Deutung der „Konstruktion als Umkehrung des physikalischen Experimentes“ nach Rodenacker /4/, lässt sich bei Berücksichtigung der heute verfügbaren Modellierungsmethoden erweitern. Durch die Betrachtung des Konstruierens als einen Prozess der Modellbildung auf (mehr oder weniger) abstraktem Niveau wird es selbst zu einem Experimentierfeld mit dem Ziel, eine optimale Lösung zu finden.

2. Die Konstruktion als Experiment

Die gegenwärtige Konstruktionstätigkeit ist durch den Übergang von einer analogen Beschreibung des Konstruktionsobjektes durch Technische Zeichnungen, Stücklisten und

begleitende Dokumente (z.B. Berechnungen und Anleitungen) zu einer Beschreibung auf digitaler Ebene gekennzeichnet. Herkömmliche Produktdokumentationen sind nur interpretierbar, wenn das dazugehörige Normenwerk (DIN, ISO) im Sinne einer formalen Sprache mit Syntax und Semantik zugrunde gelegt wird. Auch die digitale Beschreibung von Produktmodellen erfordert ein Regelwerk für die Interpretation der gespeicherten Daten. (STEP, Dokumentation proprietärer Formate der CAD-Systeme). Die digitale Form allein bringt im Sinne des Experimentes noch keine wesentliche Änderung als neue Qualität des Konstruierens mit sich. Man denke nur an die reinen Zeichnungsprogramme, die als effektive Zeichenmaschinen in der Wirtschaft weit verbreitet sind. Erst die Verbindung der digitalen Technik mit den Grundgedanken der Konstruktionstechnik und der Produktmodellierung, basierend auf einer objektorientierten Betrachtungsweise, eröffnet die Möglichkeit, virtuelle Produktklassen zu definieren und im Verlaufe des Konstruktionsprozesses schrittweise zu instanzieren. Das Konstruieren wird damit zu einer Zuordnung konkreter Werte zu den Attributen der Produktmodellklassen im Sinne einer Objektorientierung in der Informatik. Ein auf logischer Ebene spezifiziertes Produktdatenmodell übernimmt die koordinierende Funktion zwischen der Konstruktion, Simulation, Prototyping, Fertigung.... im Sinne eines Lifecycle-Managements bis zum Recycling. Nach /12/ wird damit die höchste Stufe 3 der Integration rechnergestützter Systeme durch Weitergabe technischer Daten im integrierten System erreicht. Das Integrierte Produktmodell ist durch Objekte und Methoden definiert und gekapselt.

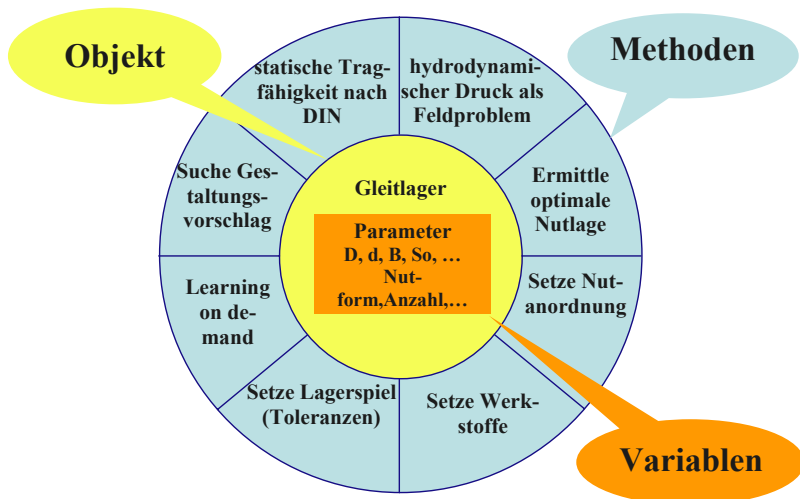


Bild 1: Objektorientierter Ansatz für die Gleitlagerkonstruktion

Die Konstruktionstätigkeit besteht nun darin, die im Produktdatenmodell vorhandenen Attribute von Objekten mit konkreten Werten zu verbinden. Im einfachsten Falle werden geometrische Produktkoordinaten $P(x, y, z)$ zu numerischen Werten $P(10, 20, 30)$. Bezogen auf das Gesamtprodukt entsteht eine in sich konsistente, d.h. widerspruchsfreie, redundanzfreie und vollständige Sammlung von instanziierten Objekten und Beziehungen zwischen diesen Objekten. In einem wieder sehr einfachen Falle werden zwei instanziierte geometrische Punkte als Endpunkte einer Strecke vereinbart. Wird diese Vorgehensweise

konsequent weiterentwickelt, so ergibt sich folgerichtig die Verwendung von parametrisierten Konstruktionselementen als Methode. Schon in /9/ wurde durch den Autor das rein geometrisch-topologische Modellieren als nicht hinreichend für die Konstruktion erkannt und eine Erweiterung um parametrische Ansätze auf Basis eines erweiterten Produktmodells vorgenommen.

Für die Konstruktionstechnik ergeben sich zwei Möglichkeiten der Betrachtung (Sicht auf) des Konstruierens. Zum einen aus einer rein phänomenologischen Sicht eines Nutzers von Konstruktionssoftware. Zum anderen aus softwaretechnischer Sicht als Entwickler von Konstruktionssoftware. Es gibt noch eine dritte hybride Art, die besonders effektive Lösungen ermöglicht: Die Erweiterung von CAD-Systemen durch den Nutzer um konstruktionstechnische Ansätze bei Nutzung einer Programmierschnittstelle.

Die Verbindung von Experiment und Konstruktion ist in allen Fällen möglich, wenn das integrierte Produktmodell die Basis sowohl für den Nutzer (Konstrukteur) als auch für den Softwareentwickler darstellt. Die parametrische Modellierung (Konstruktion) ist nichts anderes als die planmäßige Generierung eines digitalen Prototypen, dessen Parameter durch gezielte Variation so lange verändert werden, bis das Ergebnis befriedigt. Die Eigenschaften des Prototypen bei Änderung der Parameter stellen klassische experimentelle Ergebnisse dar.

Nach BROCKHAUS /5/ ist ein Experiment definiert als: „...das methodisch-planmäßige Herbeiführen von reproduzierbaren, meist variablen Umständen zum Zwecke wissenschaftlicher Beobachtung; wichtigste empirische Methode der Naturwissenschaften, aber auch anderer empirisch vorgehender Wissenschaften.“

Eine empirische Wissenschaft ist ebenfalls nach /5/ „...jede Wissenschaft, die ihre Sätze nicht durch Herleitung (Deduktion) aus Hypothesen gewinnt, sondern auf Beobachtung gegründete Erfahrungen.“ Die Zusammenführung von Simulation bzw. Berechnung und Experiment oder Versuch kann über das in beiden Fällen als Grundlage verwendete Modell erfolgen. Das Experiment benötigt ein Versuchsmodell und die Simulation ein Berechnungsmodell. Beide Modelle sind über das integrierte Produktmodell direkt mit dem Produkt verbunden. Sie unterscheiden sich lediglich in der Art der Sicht auf die Produktmodelldaten und können im Falle der Übereinstimmung von Modell und Original identisch sein. (siehe oben)

3. Ausgeführte Arbeiten unter experimentellen und informationstechnischen Gesichtspunkten

Einige Konstruktionen und ihre Verwendung für virtuelle Experimente sind Inhalt dieses Kapitels. Beispiele, die nur durch Animationen verdeutlicht werden können, werden durch verbale Beschreibungen und statische Bilder repräsentiert. Die Animationen können beim Autor per e-mail angefordert werden.

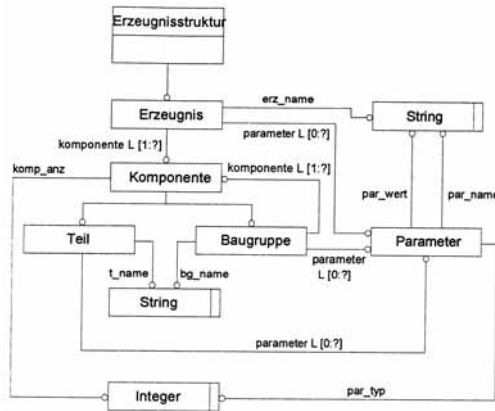


Bild 2: Erweiterung des Informationsmodells eines CAD-Systems /10/

Die Grundlage für eine objektorientierte Modellierung ist ein geeignetes Informationsmodell. Bild 1 zeigt ein STEP-EXPRESS-G-Schaubild für die Abbildung einer einfachen parametrisierten Teil-Baugruppen-Struktur eines Erzeugnisses. Sowohl Teil als auch Baugruppe sind mit Attributen versehen, die die Zuordnung von Parametern gestatten. Dies ist die minimale Voraussetzung, um konstruktionstypische Eigenschaften mit den geometrisch-topologisch definierten Teilen und Baugruppen im CAD-System zu verbinden. Konstruktionstypisch ist jede Eigenschaft, die das Produktmodell so erweitert, dass Versuch und Berechnung mit in das Produktmodell integriert werden können

Die Implementierung einer erweiterten Modellierung mit besonderer Berücksichtigung der Visualisierung von technischen Attributen am geometrisch-topologischen Modell zeigt Bild 2. Werden technische Attribute wie Oberflächenrauigkeiten oder die Härte der Oberfläche im Produktmodell berücksichtigt, müssen sie für den Konstrukteur in der graphischen Nutzeroberfläche verfügbar gemacht werden. Ein Beispiel, welches auf der Basis des geometrischen Modellierers ACIS entwickelt wurde, verdeutlicht die Vorgehensweise (Bilder 3 und 4). Beide Beispiele sind der Tätigkeit der Softwareentwicklung zuzuordnen. Sie schaffen damit die Möglichkeit für den Nutzer, Software für experimentelles Konstruieren zu verwenden.

Attribut	Fläche	Flächenbereich	Kante	Punkt
Maßtoleranzen	+		+	
Formtoleranzen	+		+	
Passungen	+			
Rauheiten	+			
Thermische Oberflächenbehandlung	+	+		
Beschichtung	+	+		
Härtewert	+	+		+

Bild 3: Zuordnung von technischen Attributen zu grundlegenden geometrischen Entities

Sie zeigen außerdem, dass es notwendig ist, ein hinreichend mächtiges Informationsmodell als Grundlage für eine integrierte Arbeit zur Verfügung zu haben. Das Informationsmodell bedarf einer angemessenen graphischen Interaktionsschicht. Nur so ist eine komfortable Arbeit des Konstrukteurs möglich.

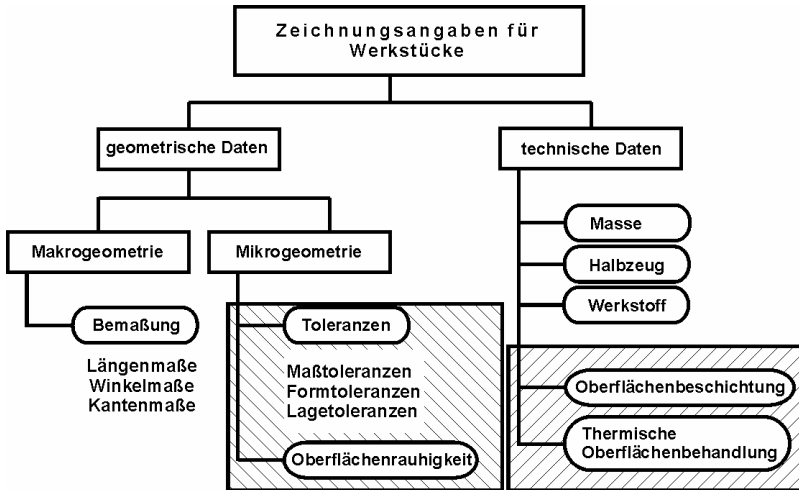


Bild 4: Geometrische und technische Informationen eines Teiles /15/

Für eine integrierte Arbeit in einem CAD-System müssen zusätzlich zu den geometrischen Informationen weitere produktbeschreibende Eigenschaften in das Produktmodell eingebunden werden. Informationstechnisch handelt es sich um Attribute eines Entities oder um variable Parameter von Objekten. Auf diese variablen Parameter können objektspezifische Methoden angewendet werden. Diese Methoden sind Berechnungsprogrammen, die an die modellierten Teile in einem CAD-System gekoppelt werden. Durch diese enge Verbindung von Geometrie, Material und weiteren Eigenschaften der Bauteile und Baugruppen mit Simulationsprogrammen wird die Arbeit des Konstrukteurs auf ein neues Niveau gehoben. Er kann während der hauptsächlich geometrisch geprägten Modellierung Simulationen von virtuellen Prototypen durchführen, die den Charakter von Experimenten aufweisen. /11/

Die direkte Kopplung von Berechnung und Simulation in einer parametrisierten 3D-Welt zeigt das folgende Beispiel. Ausgehend von den Grundlagen der Zahnradgeometrie werden die exakten Formen einer Evolventenverzahnung als dreidimensionales geometrisches Teil berechnet (Bild 4). Die reine Zahnform wird zu einem parametrisch beschriebenen Einzelteil erweitert. Durch Generierung weiterer Einzelteile können ebenfalls parametrisierte Baugruppen erzeugt werden. Das Zusammenwirken aller Bauteile und Baugruppen wird durch eine Animation getestet (Bild 5).

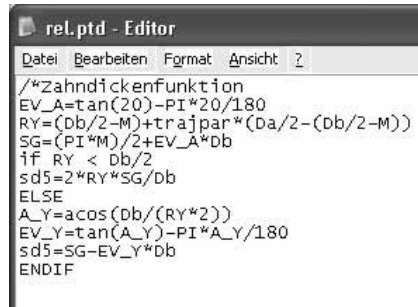
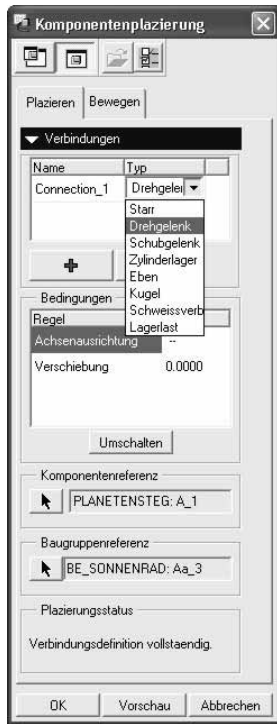


Bild 4: Berechnung der Verzahnungsgeometrie im CAD-System (Pro/ENGINEER)

Sowohl die Berechnung, als auch die Simulation der Bewegungsverhältnisse erfolgen in einem integrierten CAD-System. Somit gibt es keine Schwierigkeiten bei der Übergabe von Daten zwischen den Modulen. Die Animation ermöglicht verschiedene Ausgabeformate und kann gerenderte Darstellungen für Werbe- und Dokumentationszwecke enthalten.

Bild 5: Platzierung der Bauteile (Komponenten) für die Animation der Baugruppe

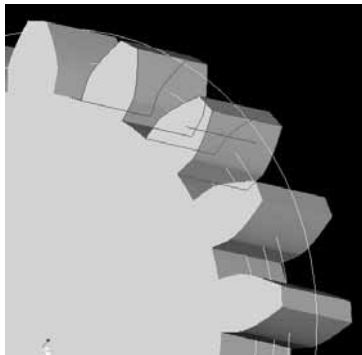


Bild 6: Generierung eines Bauteiles (Zahnrad) aus der im CAD-System berechneten Evolvente

Für die effektive Verbindung von Konstruktion, Animation und Rapid Prototyping eignet sich das Beispiel Verstellpropeller. Ausgehend von einer aufwändigen Beschreibung der Freiformflächen der Propellerflügel werden weitere Bauteile, Unterbaugruppen und Baugruppen modelliert. Die Beschreibung durch ein parametrisiertes 3D-Modell ermöglicht die schnelle und fehlerfreie Weitergabe der Daten an die RP-Vorbereitung. Aus den gleichen Daten wird eine Animation erzeugt, die das

Bewegungsverhalten des Propellers und seiner Bauteile im Betrieb darstellt.



Bild 7: Animation zur Darstellung der Wirkungsweise und der Montierbarkeit eines Verstellpropellers

4. Zusammenfassung

Mit modernen parametrisch und objektorientiert arbeitenden CAD-Systemen ist der Konstrukteur in der Lage, fast alle Konstruktionsmethoden auf Software abzubilden. Sowohl Baureihen können elegant durch Familientabellen realisiert werden, als auch komplexe Optimierungen lassen sich durch Methoden wie das Behavioral Modeling in die CAD-Welt integrieren. Komplexe Simulationen von virtuellen Prototypen ersetzen in vielen Anwendungsfällen die Versuche an Mustern. Anwendungsspezifische Berechnungsmethoden können direkt mit den geometrischen Modellen gekoppelt werden. Durch das Rapid Prototyping wird die Trennung von virtueller und materieller Welt zunehmend aufgehoben.

5. Literatur

- /1/ Horn, E.; Schubert, W.: Objektorientierte Software-Konstruktion. Hanser-Verlag 1993
- /2/ Pomberger, G.; Blaschek, G.: Software-Engineering; Hanser-Verlag 1993
- /3/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre; Springer, Berlin 2003
- /4/ Rodenacker, W.G.: Methodisches Konstruieren, Konstruktionsbücher Bd. 27 Springer; Berlin 1991 (4. Auflage)
- /5/ Brockhaus: [http:// www.brockhaus.de](http://www.brockhaus.de)
- /6/ Klein, B.: TRIZ/TIPS-Methodik des erfinderischen Problemlösens. Oldenbourg-Verlag 2002
- /7/ Pro/MECHANICA; Pro/MECHANICA Structure, Parametric Technology Corporation 2000
- /8/ Pro/ENGINEER: Pro/ENGINEER, Konstruktionsoptimierung mit dem Behavioral-Modeler. Parametric Technology Corporation 2000
- /9/ Brökel, K.: Technische Modellierung von Stirnradgetrieben auf der Basis von Produktmodellldaten. Promotion B Universität Rostock 1990
- /10/ Richter, G.: Entwicklung eines Pro/ENGINEER-Moduls unter Anwendung von Pro/DEVELOP. Projektarbeit Uni Rostock 1995
- /11/ Barenthin, T.; Wicklein, J.; Brökel, K.: Behavioral Modeling and hydrodynamic interacted surfaces – approach and solution in CAD-Systems. AMTECH 2003, Wisla/Poland 26. - 28.5.2003
- /12/ VDI 2211 Datenverarbeitung in der Konstruktion, Berechnung in der Konstruktion 1999
- /13/ VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte 1993
- /14/ VDI 2223 Methodisches Entwerfen technischer Produkte 1999
- /12/ Brökel, K.; Bösche, U.; Weidig,.; Entwicklung alternativer Möglichkeiten der Verarbeitung technischer Attribute in integrierten Produktmodellen. CAD '96 Kaiserslautern 1996

Diskussion

Prof. R. Stelzer

Das Modell ist von vornherein nicht das Original. Es kann es nur werden, wenn ich den Kontext ändere. Wenn ich nun Ihr mitgebrachtes Rapid Prototyping Modell benutze, um weitere Versuche zu machen, dann ist es für die Versuche, aber nur aus der Sicht dieser Versuche, das Original. Es wird aber niemals das wirkliche Original werden, es entspricht einem digitalen Modell.

Zum objektorientierten Ansatz, den ich natürlich sehr unterstütze, denn in diese Richtung machen wir ja auch einige Untersuchungen, wäre ich auch etwas vorsichtig. Besonders die These: Konstruieren sei nur das Belegen von Werten an die vorgegebenen Variablen, können wir ganz gewiss nicht so stehen lassen. Ich denke, dass der Objektansatz, den Sie vielleicht nicht mit dem Anspruch der Vollständigkeit gebracht haben, so natürlich sehr unvollständig ist. Sie sagen: Objekte sind Objekte plus Variablen plus Methoden. Ich denke, wir können Objekte nicht mit Objekten erklären. Für mich sind Objekte zuerst einmal Daten, also Modellelemente. Die beschreibt man mit Variablen und da gehören natürlich die Methoden dazu. Was für mich fehlt, und was ich auch sehr interessant finde, wenn wir die Ergebnisse der Informatik auf die Technik adaptieren, sind die Events, also die Ereignisse. Es passieren manchmal Dinge, die ich von außen in der Form nicht angestoßen habe. Also ich befrage nicht ein Gleitlager nach einem bestimmten Wert, sondern es tut einfach etwas. Es frisst fest, eine Welle bricht. Dies sind Ereignisse, bei denen ich beschreiben muss, was passiert unter bestimmten Umständen. Da sind Events eine ganz wichtige Sache. Was auch fehlt im Bezug zur Informatik ist das Interface, d.h. die Art und Weise, ein Objekt mit einfachen Mitteln zu kontrollieren.

Ansonsten aber denke ich, müssen wir mit diesen Vorstellungen weiterarbeiten, d.h. diesen objektorientierten Ansatz pflegen.

Prof. K. Brökel

Über die drei Thesen kann man natürlich diskutieren. Sie sind alle drei nicht ausgereift. Das war auch nicht mein Ziel. Aber was sie zum Schluss gesagt haben, Events kann man natürlich mit hinein nehmen. Events kann man ja auch im Produktmodell abbilden. Das ist auch kein Problem. Aber für mich war der Blick in die Informatik recht interessant, weil er doch Aufschluss gibt über die im Konstruktionsbereich noch etwas sehr diffus definierte Welt, in der wir uns bewegen.

Prof. G. Höhne

Mich würde interessieren, was sie mit ihrem Konzept machen, wenn es darum geht, Objekte zu behandeln, die es noch nicht gibt. Das ist ja eigentlich der Witz des Konstruierens. Eine Schraube wieder zu erfinden oder anzupassen, ist nicht das Problem. Aber erklärtes Ziel ist ja, Objekte, Elemente, komplexe Systeme zu erzeugen, die es noch nicht gibt.

Prof. K. Brökel

Das ist eigentlich kein Problem im Sinne des Produktdatenmodells. Solange das neue Produkt auf das vorhandene Produktdatenmodell abgebildet werden kann, kann es ruhig neu sein, deshalb muss das Produktdatenmodell nicht neu sein. Ich habe dann nur eine neue Instanz auf dem Produktdatenmodell. Das ist kein Widerspruch in sich. Wenn es aber um neue Produkte geht, für die das Produktdatenmodell nicht ausreichend ist, dann muss ich neue Klassen und neue Objekte definieren und abbilden. Das sind dann auch meist Produkte, die ich im CAD-

System nicht abbilden kann. Was ich im CAD-System abbilden kann, das ist auch kompatibel mit der Produktstruktur oder der Produktdatenstruktur, die hinter dem CAD-System liegt.

Prof. G. Höhne

Es gibt da einen zweiten Punkt, der auf diesem Weg liegt. Bevor ich ein Produkt vollständig entwickelt habe, muss ich unscharf arbeiten, ohne Parameter und mit unvollständiger Information. Wenn ich ein CAD-System starten will, brauche ich jedoch immer eine vollständige Information. Entweder es startet gar nicht, oder es gibt Fehlermeldungen aus. Wie behandeln sie abstraktere Ebenen und unvollständige Informationen.

Prof. K. Brökel

Ja, das ist eine hoch interessante Fragestellung. Wir sollten sie in der Diskussion weiter verfolgen. Das ist ganz eindeutig ein offenes Problem.

Dr. Wegmann

Da möchte ich eine Ergänzung machen. Ich habe in der Praxis jahrelang mit dem CAD-System Pro/ENGINEER gearbeitet. Nachdem ich eine gewisse Routine hatte, habe ich in der Weise mit „unscharfen“ Modellen gearbeitet, dass ich Skizzen modellierte, in denen viele Details fehlten und Maße nur vorläufige Werte hatten. Diese sind zwar in Form und Abmessung konkret, was man von Handskizzen nicht sagen kann, aber sie repräsentierten mit ihrer ganz einfachen Geometrie nur ein sehr abstraktes Bild von der zu suchenden technischen Lösung. Im Verlauf der weiteren Arbeit konnte ich diese abstrakten Entwürfe als Gerüst nutzen, in das ich konkret modellierte Einzelteile und Baugruppen eingefügt habe. In diesem Ablauf von der unscharfen Idee zur konkreten Lösung hat die Schnittstelle CAD-Mensch erstaunlich gut funktioniert. Ich muss aber zugeben, dass ich etwa vier Jahre damit arbeiten musste, bis ich einigermassen Routine hatte, damit kreativ zu arbeiten.

Effiziente Wartung komplexer Systeme mittels Augmented Reality

Ralph STELZER, Bernhard SASKE, Wolfgang STEGER

Technische Universität Dresden

Abstract

As a result of dramatically changed conditions for the engineering in the last years, the former Product Data Management improved to Product Lifecycle Management. In consequence the support of service and maintenance processes became more and more important. Configuration specific Online-documentations and the availability of maintenance systems (MRO) are already standard in some branches today. This article describes a solution concept of an PLM integrated, AR based maintenance system.

Keywords

Product Lifecycle Management; Maintenance; Augmented Reality

1 Einleitung

Veränderte Randbedingungen und damit verbunden auch neue Betrachtungsweisen kennzeichnen den Bereich des Engineerings in den letzten Jahren. (Abb. 1)



Abb. 1: Aktuelle Randbedingungen für das Engineering

Themen, wie die Verkürzung der Durchlaufzeiten, die zunehmend hohen Anforderungen aus der Produkthaftung oder der immer engeren Kooperation zwischen Zulieferern untereinander sowie zu den Kunden im Rahmen der Globalisierung bestimmen erforderliche Anpassungen und Neuentwicklungen der angewandten Methoden und Werkzeuge. Dabei tritt die ganzheitliche Betrachtung von Produkten über deren kompletten Lebenszyklus in den Mittelpunkt. Da dieser Prozess einhergeht mit einer laufenden Verkürzung der Durchlaufzeiten, verkürzten Innovationszyklen, immer komplexeren Produkten und einer stetigen Zunahme der Variantenvielfalt, ergeben sich vor allem auch für den Wartungsbereich immer höhere Anforderungen. Hier ist es notwendig, einfachere und komfortablere Unterstützungswerkzeuge bereitzustellen um sicherheitsrelevante Wartungsabläufe mit hoher Zuverlässigkeit durchführen zu können und die Ausfallzeiten der teuren Maschinen und Anlagen zu minimieren. Dem Einsatz virtueller Techniken kommt dabei eine zunehmende Bedeutung zu. Doch während sich derartige Werkzeuge im Bereich der Entwicklung bereits anfangen fest zu etablieren (Virtual Reality – VR – zur Produktanalyse bzw. –präsentation) [GAU-03], befindet sich deren

Einsatz im Wartungsbereich trotz intensiver Entwicklungsarbeiten [IND-03] noch in der Anfangsphase. Hier ist vor allem die Augmented Reality – AR –, also die Einbeziehung von virtuellen Verfahren in reale Arbeitsumgebungen, interessant.

2 Wartung als Komponente des Product Lifecycle Management

Systeme des Product Lifecycle Management (PLM) haben sich evolutionär aus den bereits seit vielen Jahren bekannten Systemen des Produktdatenmanagement (PDM) entwickelt (Abb. 2).

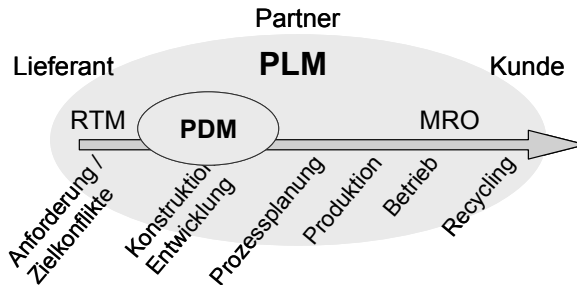


Abb. 2: PDM als Komponente des Product Lifecycle Management

Dabei stand das Bestreben im Mittelpunkt, auch die Phasen des Produktlebenszyklus außerhalb von Entwicklung und Konstruktion abzudecken. Dies betrifft auf der einen Seite den Bereich der Planung mit dem Anforderungs- und Zielmanagement (RTM), auf der anderen Seite all die Aufgaben, die nach Auslieferung des Produktes relevant werden, wie Aufstellung, Inbetriebnahme, laufender Betrieb, Wartung und Service, vgl. [MIL-03]. Vor allem für Produkte mit langer Servicelaufzeit kann sich die Wartung als ausgesprochen aufwendig erweisen. Häufig sind derartige Produkte durch komplexe Konfigurationen, umfangreiche Wartungsberichte sowie durch Wartung bedingte Änderungen des Produktes gekennzeichnet. Deshalb gehört die Planung von Wartungsintervallen, Inspektionen, dem Tausch sicherheitsrelevanter Teile sowie eine genaue Aufzeichnung der durchgeführten Arbeiten vor allem für solche Unternehmen zum alltäglichen Engineering, welche nach der Produktauslieferung für Betrieb bzw. Wartung zuständig bleiben. Dazu gehören üblicherweise die Flugzeug- und Verteidigungsindustrie, das Transportwesen oder der Schiffbau. Zum Einsatz kommen hier MRO-Systeme (Maintenance, Repair and Operating/Overhaul). Diese Systeme haben u.a. folgende Funktionen:

- Planung von Wartungsmaßnahmen und Ausführung von Instandhaltungsaufträgen
- Verwaltung aller Änderungen im Verlauf von Wartungsphasen
- Verwaltung von Zeitwechselteilen auf der Basis von Nenn- und Vorgabewerten
- Verknüpfung ausgelieferter Konfigurationen (as-build Struktur) zu der im laufenden Betrieb vorhandenen (as-maintained Struktur)

Auch Produzenten anderer komplexer Systeme, wie im Werkzeugbau, dem Druck- oder Tabakmaschinenbau oder dem Anlagenbau, stehen zunehmend vor der Forderung, eine bessere Unterstützung für den vor-Ort Service zu bieten. Dies ist mit den gebräuchlichen Serviceunterlagen nicht erzielbar. Online-Kataloge und –Handbücher brachten hier bereits

eine Verbesserung gegenüber den gedruckten Unterlagen. Derartige Kundendokumentationen lassen sich auf die konkret ausgelieferte Maschinenkonfiguration anpassen, sind strukturiert und somit semantisch analysierbar. So können wichtige Aussagen bzw. Informationseinheiten (z.B. Sicherheitshinweise, Warnungen usw.) zielgerichtet angesprochen und Querverweise zwischen zusammengehörigen Aussagen ausgewertet werden. Derartige Dokumentationen sind heute häufig XML-basiert und werden in Datenbanken verwaltet. Damit entstehen für den Produzenten große Einsparungen bei der Erstellung sowie eine höhere Sicherheit für eine konsistente Dokumentation. Trotzdem bleiben, vor allem aus Sicht des Kunden, immer noch eine Reihe von Unzulänglichkeiten. So ist keine Synchronisation des Informationsangebotes mit den aktuellen Wartungsszenarien während der Durchführung der Arbeiten möglich. Auch erweist es sich als mit steigender Produktkomplexität zunehmend schwierig, eine zum Auffinden bzw. Identifizieren kritischer Bauteile ausreichende Navigationsunterstützung an der Maschine zu bieten. Und schließlich ist zumeist keine Abstimmung mit der Wartungsplanung bzw. dem Wartungsberichtswesen eines MRO-Systems möglich.

Um vor allem eine bessere Unterstützung des Wartungsingenieurs vor Ort zu ermöglichen, laufen bereits seit einiger Zeit Projekte, Werkzeuge und Methoden der Augmented Reality (AR) für die Unterstützung der Wartungsarbeiten einzusetzen. Zu etwa 50% seiner Zeit ist der Serviceingenieur beschäftigt mit: *gehen* (Werkstatt-Betrieb), *suchen* (das defekte oder zu wartende Teil, Informationen zum Teil) oder auf etwas *warten* (auf das neue Teil, auf Informationen des Produzenten)! AR bietet hier die faszinierende Möglichkeit, direkt vor Ort kontextsensitiv alle benötigten Informationen zeitnah zur Verfügung zu stellen. Neben einer Reihe vor allem technischer Schwierigkeiten bei Einsatz von AR (erinnert sei hier vor allem an die Problematik geeigneter Displays und feldtauglicher Trackingverfahren) ist die nahtlose Einbindung derartiger Ansätze in ein geschlossenes IT-Konzept von Produzent, Kunde und Serviceunternehmen eine der zentralen Voraussetzungen für eine breitere Nutzung. Die in diesem Beitrag beschriebene Arbeit hat deshalb zum Ziel, einen AR-gestützten Wartungsmodul als integrale Komponente eines PLM-Systems zu entwickeln.

Wartung im allgemeinen Sinn sind alle Arbeiten zur Erhaltung des Produkt-Sollzustandes (DIN 31051). Unter Wartungsoperation wird eine in der Produktentwicklung festgelegte Maßnahme verstanden, die diesem Zweck dient (Funktionserhaltung, Sicherheit, gesetzliche Vorgaben,...). Solche Operationen sind zum Beispiel: Verschleißteile überprüfen/wechseln, Dichtheit prüfen, bestimmte Messwerte erfassen. Wartungspläne beschreiben die aus technischer Sicht notwendigen Handlungen, um Wartungsoperationen auszuführen bzw. vor- und nachzubereiten (Bedienhandlungen ausführen, Betriebszustände herstellen, Teile /Baugruppen aus-/ einbauen, einstellen, säubern o.ä.). Die Wartungspläne sind auf eine konkrete Produktkonfiguration bezogen und in der Regel in Form von Text/Bild- Dokumenten bereits Teil der konventionellen Produktdokumentation.

Alle für ein Produkt relevanten Informationen sind in verschiedenen Dokumenten (CAD-Modelle, HTML/XML basierte Infomodule von Dokumentationen, Handbücher und Kataloge, ...), Strukturen (Assembly- und Artikelstruktur, Konfigurationen...) und Planungsinformationen (Wartungspläne im MRO) im PLM-System gespeichert bzw. werden durch dieses verwaltet. Die Organisation und Speicherung der für den AR-Einsatz zusätzlich benötigten, wartungsrelevanten Informationen muss so erfolgen, dass Redundanzen weitgehend minimiert, vorhandene Daten optimal genutzt und die Anpassung an veränderte Produktkonfigurationen mit geringem Aufwand möglich werden.

3 Gesamtkonzept

Ziel ist es, ein System zu entwickeln, welches den Wartungsingenieur bei der Wartung mittels AR-Technologie bestmöglich unterstützt und informationstechnisch mit dem PLM System vernetzt ist. Wie Abb. 3 zeigt, besteht das System aus vier wesentlichen Komponenten:

- PLM System,
- Wartungsablaufdefinition / Szenegenerator,
- AR – Applikation (Visualisierung, Navigation),
- Datenrückführung.

Das System soll einen durchgängigen und replizierbaren Workflow bilden. Dessen Hauptergebnis ist ein digitales Dokument, der sogenannte Wartungsfile. Dieser enthält alle Informationen, die der Wartungsingenieur vor Ort benötigt, um die Wartung der Maschine / Anlage autark durchführen zu können.

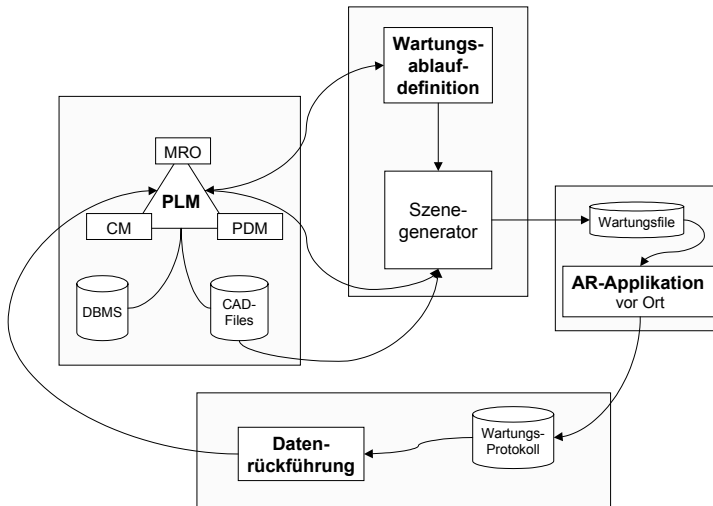


Abb. 3: Komponenten eines AR-gestützten Wartungssystems

Im PLM System werden alle Wartungsoperationen und die damit verknüpften CAD-Geometrien, relevante Dokumentationsteile und Teilpläne bereitgestellt. Für die Spezifikation konfigurationspezifischer Wartungsabläufe muss der Planer dieser Prozesse die bereitgestellten Informationen:

- zusammenfügen (Verkettung der Teilpläne technologisch sinnvoll und konfigurationsabhängig),
- ergänzen (textliche Informationen, Geometrie von Werkzeugen, aus der konkreten Konfiguration ableitbare Arbeitsschritte) und
- modifizieren (nicht notwendige Geometrie von Visualisierung ausschließen, Visualisierungsart festlegen).

Bei dieser Aufgabe wird er von einem Planungstool unterstützt.

Für die Visualisierung des Dokumentes in einer AR – Umgebung müssen anschließend alle Informationen in ein definiertes Format gebracht werden. Der AR – Szenegenerator verarbeitet alle im Vorfeld eingebrachten Informationen und erzeugt den Wartungsfile. Dieser File enthält die virtuelle Szene des Wartungsumfeldes, repräsentiert durch den sogenannten Szenegraphen, und ist auf dem tragbaren Computer des Wartungsingenieurs lauffähig.

Zur Durchführung der Wartung wird der Wartungsfile auf den AR - Computer (wearable PC, Laptop, Palm) übertragen. Die Darstellung der Informationen erfolgt über die AR-Applikation vor Ort. Für freihändiges Arbeiten und die direkte Unterstützung der Arbeitsschritte werden die Serviceinformationen mittels eines Head Mounted Display (HMD) direkt in das Sichtfeld des Wartungsingenieurs eingeblendet. Die dafür notwendige Ermittlung der Position des Wartungsingenieurs an der Anlage erfolgt über ein geeignetes Trackingsystem.

Die Wartungsarbeiten werden protokolliert. Erfasst werden Prüf- und Messergebnisse, ersetzte Zeitwechsellteile, festgestellte Mängel und Aufgaben für Wartungen und Reparaturen in der Folgezeit.

Diese Informationen werden über die Datenrückführung in das Unternehmensnetzwerk rückübertragen und verarbeitet. Die aufbereiteten Daten werden in das PLM System eingepflegt und stehen zeitnah nachfolgenden Prozessen zur Verfügung.

4 Wartungsablauf

4.1 Formale Beschreibung

Voraussetzung für die computerunterstützte Generierung und Bearbeitung von Wartungsplänen ist eine formale Beschreibung von Wartungstätigkeit. Diese ist Basis für die rechnerinterne Abbildung und die Bearbeitung eines Wartungsplanes mit einem Editiertool.

Die Vorgehensweise und die nachfolgend verwendete Notation lehnt sich an die Modellierungsmethode für Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) an, die in der Wirtschaftswissenschaft beispielsweise für die Modellierung von Geschäftsprozessen verwendet wird [KNS-92]. Ein schematischer Wartungsplan ist in Abb. 4 dargestellt.

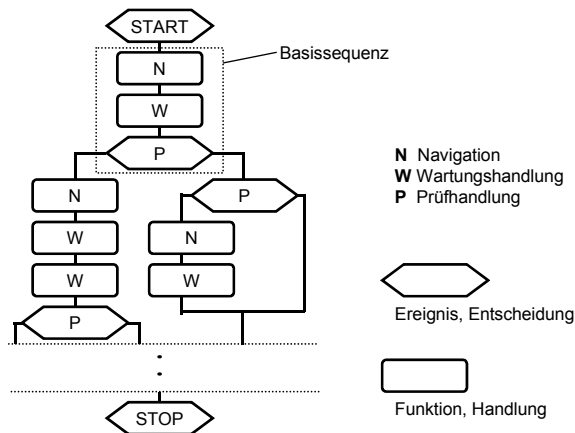


Abb. 4: Formale Beschreibung von Wartungsprozessen mit Ablaufdiagrammen

Wartungstätigkeit ist generell durch Handlungssequenzen gekennzeichnet und als von oben nach unten lesbares Ablaufdiagramm darstellbar. Im Ergebnis von Prüfoperationen kann es zu alternativen Abläufen im Wartungsplan kommen (Verzweigungen in Abb. 4).

Die Festlegung auf drei unterschiedliche Grundfunktionen (Navigation, Wartungshandlung, Prüfhandlung, gekennzeichnet mit N, W, P) erfolgt mit Blick auf die speziellen Anforderungen der Wartungstätigkeit und die spätere Transformation in die AR-Umgebung. Hier sollen für die jeweiligen Grundfunktionen Prototypen bereitstehen, aus denen der Szenegenerator den konkreten Szenegraph ableiten kann.

Eine einzelne Handlung lässt sich abgrenzen durch:

- eine definierte geometrische Umgebung
- Handlungsanweisungen, die als Text, Audio, Geometrieinformationen vorliegen und sich auf diese Geometrie beziehen,
- die spezielle Interaktion, aus der sich die folgende Operation ergibt.

Die Definition einer Basissequenz N, W, P widerspiegelt den prinzipiellen Ablauf von Wartung:

- Ort/Position der Tätigkeit aufsuchen
- Tätigkeit ausführen
- über Fortsetzung entscheiden.

Diese Basissequenz wird im Planungstool als Template hinterlegt werden. Durch löschen oder kopieren lassen sich bei Bedarf Grundfunktionen entfernen oder vervielfachen.

Jeder Handlungsfolge im Wartungsplan beginnt mit einer Navigation. Diese steht am Beginn, um den Wartungsingenieur an die Position zu führen, an der er die Wartungshandlungen auszuführen hat. Kennzeichnend für die Navigation ist die Verbindung mit dem Tracking-system, um Soll- und Ist-Position des Wartungsingenieurs abzugleichen. Die Funktion wird verlassen, wenn er die geforderte Position erreicht hat.

Eine Wartungshandlung wird immer an einer bereits eingenommenen Position ausgeübt. Im Blickfeld des Arbeiters müssen Teile der Geometrie des Wartungsobjekts, eventuell benötigte Werkzeuge/Hilfsmittel und textliche/auditive Informationen bereitgestellt werden. Die Beendigung der Funktion erfolgt durch Fertigmeldung (Interaktion) des Wartungsingenieurs.

Die Fortsetzung der Arbeit bzw. die Auswahl des folgenden Arbeitsschrittes erfolgt über die Prüfhandlung. Ausgehend von einer Messung oder Prüfung ergibt sich die jeweilige Fortsetzung. Besonderheit der Prüfhandlung ist die Interaktion, die wiederum im Prototyp der Prüfhandlung vorzusehen ist.. Über die AR-Umgebung muss ermöglicht werden, dass der Wartungsingenieur zwischen Alternativen wählen kann.

4.2 *Planungstool*

Die Erstellung der Wartungspläne erfolgt mit einem speziellen Editor. Dieser muss folgende Funktionen bieten:

Generierung und Manipulation der Struktur von Wartungsplänen.

Mittels Templates für die 3 Grundfunktionen und die Basissequenz kann eine effiziente Strukturerstellung erfolgen. Die aus dem PDM übernommenen Wartungsoperationen und Teilpläne müssen mit dem Editor in die Templates eingefügt und diese anschließend so angeordnet und ergänzt werden, dass der Gesamtplan mit allen Tätigkeiten in sinnvoller Abfolge und unter Berücksichtigung der Prüfoperationen und Alternativen entsteht.

Spezifikation der Geometrieumgebung für jede Funktion des Wartungsplans.

Wie oben dargestellt, ist jede Funktion durch ein spezielles geometrisches Umfeld ausgezeichnet. Über das PDM- System kann der Editor auf die entsprechenden CAD-Daten zugreifen, die das Wartungsobjekt und die Umgebungsgeometrie beschreiben. Aufgabe des Planers ist es, die relevanten Daten auszuwählen (welche Teile, Baugruppen sind darzustellen) und die Visualisierungsart zu spezifizieren (schattierte Darstellung/Kantenmodell, Ausleuchtung). Hierzu ist ein Dialog nötig, wie er ähnlich in CAD-Systemen zur Erstellung von Explosions- oder Zusammenbauansichten verwendet wird.

Erstellung der Handlungsanweisung

Zu diesem Zweck sind Texte und Bilder aus der Produktdokumentation zu übernehmen und bei Bedarf zu ändern oder zu ergänzen, beispielsweise durch speziell für die AR-Umgebung geeignete Darstellungen oder Symbole.

Auch hier ist die Verwendung von Templates oder Bibliotheken sinnvoll, die zum Beispiel vorgefertigte Elemente für

- Bewegungen (schieben, drehen, an-/abschrauben, zusammengesetzte Bewegungen für Schnellkupplung abziehen) oder
- Handlungssymbole (erwärmen, säubern, Messgerät anschließen, Werkzeug ansetzen) beinhalten.

5 AR-Applikation

5.1 *Der Szenegraph*

Für die Darstellung und Manipulation von Szenen innerhalb von VR/AR Umgebungen werden strukturierte Graphen genutzt. Diese Graphen enthalten verschiedene Elemente innerhalb einer hierarchischen Struktur und werden als Szenegraphen bezeichnet (Abb. 5). Die Szenegraphen sind gerichtete, azyklische und heterogene Graphen, die ausgehend von einem Rotelement definierte Eltern – Kind Beziehungen zwischen den Elementen eines Graphen aufbauen. Ein Element des Szenegraphen kann dabei keine Beziehung zu sich selbst haben [REI-03].

Der Szenegraph enthält neben Informationen zu Form (Geometrie) und Aussehen (Material) von Körpern auch Elemente wie Betrachterposition (Kamera), Beleuchtungsoptionen oder Bewegungspfade. Innerhalb des Szenegraphen werden Elemente über ein globales Koordinatensystem positioniert. Dabei erfolgt die Definition der Lage neben den Festlegungen zur

Orientierung über Transformationsknoten, die Geometrie selbst ist in untergeordneten Geometrieknoten gespeichert.

Zur Definition, Darstellung und Manipulation von Szenegraphen existieren Programmierbibliotheken wie SGI Optimizer, Java3D oder OpenSG die zum Teil frei nutzbar sind.

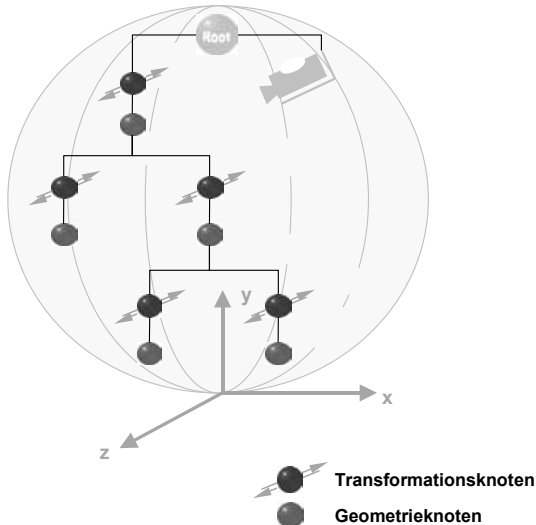


Abb. 5: Einfacher Szenegraph einer AR – Umgebung

Eine vereinfachte Generierung von Szenegraphen für die Darstellung von Objekten innerhalb von AR/VR – Umgebungen erlauben sogenannte Authoring Tools. Diese bieten die komfortablere Möglichkeit, die Visualisierung in einer vertrauten Windowsumgebung zu erarbeiten. Der Szenegraph entsteht automatisch im Hintergrund. Vertreter dieser Tools sind zum Beispiel Opus Studio (Fa. Magnum-Opus Studio, Singapur, www.magnum-opus.com.sg) Mantra4D (ComLogic Systeme GmbH, Darmstadt/Frankfurt, www.comlogic.de) oder EON-Studio (EON Reality Inc., Irvine, <http://www.eonreality.com>).

5.2 Prototyp für die Darstellung von Wartungsabläufen

Die Darstellung der im Wartungsablauf definierten Wartungshandlungen erfolgt innerhalb der AR - Umgebung über verschiedene wiederkehrende Grundelemente innerhalb des Szenegraphen. Diese Grundelemente können in einem allgemeingültigen Prototypen definiert werden, der je nach Wartungsfunktion Positionen, Geometrien, Informationen, Interaktionen und interne Abläufe zur Navigation, Wartungs- oder Prüfhandlung enthält (Abb. 6).

Es können für die Interaktions- und Informationsknoten des Prototypen Definitionen zur Art (Text, Symbol Audio...) eines untergeordneten Elements verarbeitet werden.

Neben den Prototypen für die Grundfunktionen (Navigation, Wartungshandlung, Prüfhandlung) enthält die Szene Elemente zur Speicherung der Betrachterposition und des globalen Ablaufes der Wartung.

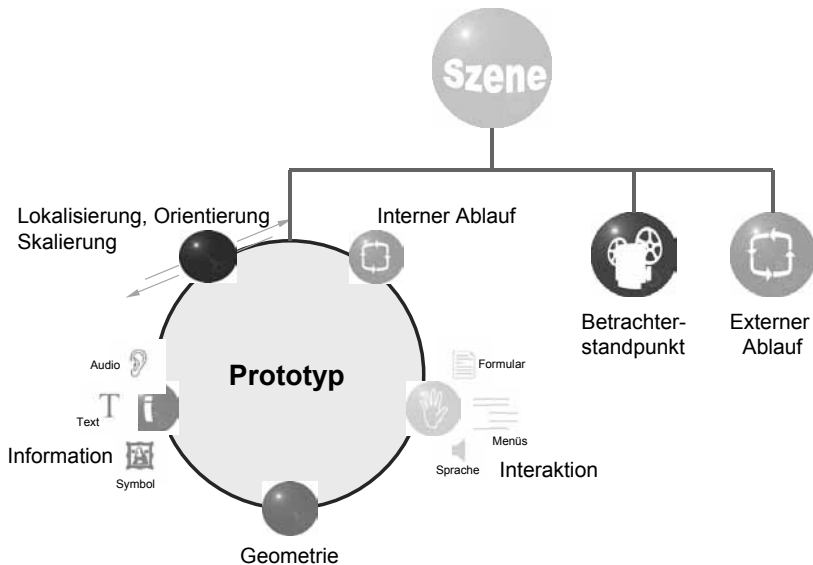


Abb. 6: Prototyp eines Wartungsknoten innerhalb einer Szene

6 Tracking

Zur Positionierung und Standortbestimmung von bewegten Objekten (Service Mitarbeiter) in einer virtuellen Umgebung werden Trackingsysteme eingesetzt. Es gibt eine Vielzahl eingesetzter Technologien welche mechanische, akustische, elektromagnetische, kinematische oder optische Verfahren bzw. deren Kombination nutzen.

Optische Verfahren liefern sehr genaue Ergebnisse (Abweichung < 1mm), stellen aber hohe Ansprüche in der Vorbereitung von Anlagen für AR- unterstützte Serviceaufgaben.

So haben zum Beispiel die FRAMATOME ANP und Siemens, beides Mitglieder des ARVIKA Konsortiums, in einem gemeinsamen Projekt zu Service- und Engineering-Lösungen im Kraftwerksbereich unter anderem festgestellt, dass der Einsatz eines markerbasierten optischen Tracking hohen Aufwand für das Einmessen der Marker in großen Umgebungen mit sich bringt und die benötigte Positionierung der Marker nicht immer gewährleistet werden kann [APP-03].

In vorgestellten Konzept geht es u.a. darum, den Aufwand für das Tracking möglichst klein zu halten. Zur Führung des Wartungsingenieurs wird eine abgerüstete Hüllgeometrie des Wartungsobjektes mit markiertem Zielobjekt oder markierter Zielposition und eine optische oder akustische Wegführung benötigt. Es wird davon ausgegangen, dass der Wartungsingenieur seinen Blick für die Dauer der Arbeit von sich aus auf das zu bearbeitende Objekt fokussiert, nachdem er dieses erreicht hat und sich in einem Arbeitsabstand von 60-80 cm befindet. Der Wartungsingenieur benötigt damit in dieser Zeit keine präzise Bildnachführung, da er selbst die eingeblendete Geometrieinformation mit dem real sichtbaren Teil der vor ihm befindlichen Anlage zur Deckung bringt. Damit wird es möglich, sich auf die Bestimmung

der Koordinaten des Betrachterstandpunktes und die Ermittlung der Orientierung der Blickrichtung zu beschränken und die Anforderung an die Genauigkeit des Gesamtsystems zu senken. Diese muss also nicht an den kleinsten zu manipulierenden Komponenten ausgerichtet werden.

7 Technisches Konzept zur Entwicklung eines Prototypen

Zur Umsetzung eines prototypischen AR- Wartungsassistenten wird ein tragbares System mit der Bezeichnung „CyberCompanion“ der Firma accavia GmbH Bremen, (www.accavia.de) in Verbindung mit einem opto - akustischen Trackingsystem verwandt. Benötigte Marker für das Trackingsystem sind fest in das HMD des CyberCompanion integriert. Das Gesamtsystem bietet eine Genauigkeit von ca. 1cm. Diese Genauigkeit ist für den vorgestellten Trackingansatz ausreichend. Die Überlagerung der realen Umgebung mit relevanten Wartungsinformationen erfolgt über die halbdurchlässige Brille des CyberCompanion. Die Daten und Trackinginformationen werden über ein WLAN an das Gerät übertragen und in der AR - Anwendung geladen. Eine 3D- Visualisierung kann über eine aktive stereoskopische Darstellung der Objekte realisiert werden.



Abb. 7: Cybercompanion als Hardwarebasis

Das Softwareumfeld zur Entwicklung des Prototypen bilden zum einen das PLM System EignerPLM (www.eigner.com) und zum anderen das oben erwähnte VR – Authoring Tool EONStudio. Beide Plattformen bieten Schnittstellen, welche die Programmiersprachen C++ und Visual Basic unterstützen.

Der Editor zur Erstellung des Wartungsablaufes wird neben dem Generator des Szenegraphen in eigener Entwicklung entstehen. Zur Visualisierung des erzeugten Szenegraphen wird der Viewer der EON Plattform genutzt. Die Steuerung des Viewers erfolgt über die integrierte Programmierschnittstelle.

Literatur

- APP-03** Appel, Mirko: Augmented Reality für innovative Service- und Engineering-Lösungen im Kraftwerksbereich, Beitrag 3. ARVIKA–Forum, Nürnberg 2003
- GAU-03** Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung; 2.Paderborner Workshop 4./5.06.2003; HNI-Verlagsschriftenreihe Band 123, Universität Paderborn 2003
- IND-03** INDEX GmbH: Augmented Reality im Service; 3.ARVIKA-Forum, Nürnberg; 03.07.2003
- KNS-92** Keller, G.; Nüttgens, M.; Scheer, A.-W.: Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage Ereignisgesteuerter Prozeßketten, Institutsbericht Heft 89, Universität Saarbrücken 1992
- MIL-03** Miller, Ed: State of the PLM Industry; PLMconference2003, Dearborn, MI, USA; 23.Juni 2003
- REI-03** Reiners, D.: Current Trends In Display Hardware And Their Effects On Scene-graph Systems, Beitrag 2. Paderborner Workshop – Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn 2003

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph STELZER

Dipl.-Ing. Bernhard SASKE

Dr.-Ing. Wolfgang STEGER

Technische Universität Dresden

Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion

01069 Dresden

email: ralph.stelzer@mailbox.tu-dresden.de

bernhard.saske@mailbox.tu-dresden.de

wolfgang.steger@mailbox.tu-dresden.de

Diskussion

Dr. F. Engelmann

Sie gehen bei dem System von zyklischen Wartungsintervallen aus, und Sie sprachen von Turbinen und Getrieben. Bei uns wurde an den Lehrstuhl heran getragen, dass die Wartungsintervalle nicht zyklisch sind und bei der Auslieferung Schwingungskurven bekannt sind. Der Wartungsingenieur fliegt um die Welt und vergleicht in zyklischen Abständen die Schwingungen. Muss das nun ausgetauscht werden, um gerade bei komplexen Maschinen die Wartungsintervalle so lang wie möglich zu gestalten und Stillstandszeiten zu minimieren? Berücksichtigen Sie das auch oder haben Sie andere Erfahrungen? Sie gehen doch davon aus, dass nach bestimmten Zeiten ein Teil ausgewechselt wird, ohne dass es verschlissen sein muss.

Prof. R. Stelzer

Innerhalb der Wartungsplanung gibt es Informationen, wann ein Teil zu prüfen ist und was zu prüfen ist. Dabei ist nicht nur zyklisches Warten gemeint, sondern es ist eine Kombination aller Möglichkeiten, die auftreten können. Auch auf nicht geplante Ereignisse muss und kann reagiert werden.

Methoden zum Erarbeiten und zur Bewertung innovativer Lösungen

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jochen Günther

Hochschule Wismar
 Fachhochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung
 Fachbereich Maschinenbau/ Verfahrens- und Umwelttechnik

Abstract

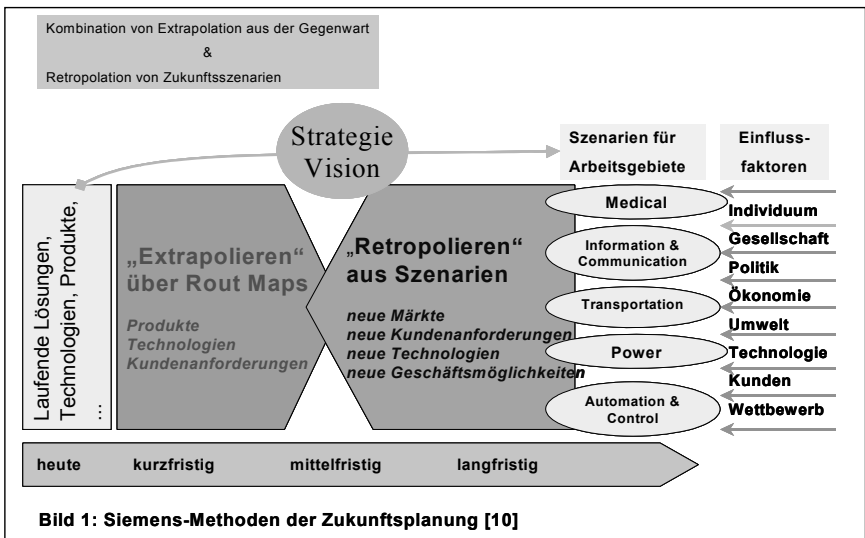
Die TRIZ-Methode wird nicht nur zur Erarbeitung innovativer Technologien und Erzeugnisse verwendet, sondern auch zur Bewertung des Innovationsniveaus bzw. der Idealität von Lösungen eingesetzt. Bewertungen oder Einstufungen werden abgeleitet aus der Nutzenerhöhung, der Kostenreduzierung und der Beseitigung schädlicher Wirkungen der zu vergleichenden Technologien oder Erzeugnisse. Vergleiche mit idealen Lösungen werden in die Bewertung eingeschlossen. Die Bewertungskriterien werden abgeleitet aus ausgewählter Werkzeuge dieser Methode, den Entwicklungsmustern der Evolution.

Keywords

Innovation, TRIZ-Methode, Evolutionsprinzip, Lebenszyklus, Idealität

1. Einleitung

Zuverlässige Prognosen sind für zukünftige Geschäftserfolge von Unternehmen unverzichtbar. Ziel und Schwerpunkte der Prognosen sind das Erkennen von Technologien mit hohem Wachstumspotential, das Identifizieren technologischer Durchbrüche und das Aufzeichnen der Entwicklung oder Veränderung der Kundenbedürfnisse sowie der zukünftigen Geschäftsmöglichkeiten. Nur bei klaren Vorstellungen von zukünftigen Technologien, Innovationsrichtungen, Markt- und Bedürfnisentwicklungen lassen sich das



F/E-Potential und der Mitteleinsatz eines Unternehmens erfolversprechend steuern. Erschwert wird diese Vorhersage zunehmend durch ein immer komplexer werdendes Umfeld und weiter abnehmende Produkt-Lebenszyklen.

Schwerpunkt der weiteren Betrachtungen ist die Entwicklung von Lösungsansätzen und die zukünftige Ausrichtung der Entwicklungsrichtungen (Trendsetter für Innovationen finden!). F/E-Strategien lassen sich nachhaltig optimieren durch zwei gegenläufige, sich aber ergänzende Sichtweisen.

Durch das „**Road Mapping**“, als „**Extrapolation**“ in die zukünftige Welt bezeichnet, werden bekannte Lösungen (Techniken, Technologien, Erzeugnisse, Produkte usw. als sichere Ausgangsbasis) durch eine Generationsfolge in die Zukunft weiterentwickelt [10].

Mit Hilfe der „**Szenariotechnik**“ versetzt man sich um größere Zeiträume in die Zukunft und entwirft ein umfassendes Szenario, das alle Einflussfaktoren (beginnend bei den politischen und sozialen Strukturen, die Umweltbelastungen, die Globalisierung, Technologie-Trends und neue Kundenbedürfnisse) berücksichtigen sollte. Aus diesen langfristigen Vorhersagen sollen mittels „**Retropolation**“ mittelfristige Vorhersagen abgesichert werden [10].

Die Szenarien sind ausgerichtet auf „neue Märkte“ mit hohem Innovationsbedarf und –potential, d.h. auf die Medizin (Bereiche des Lebens im Alter, Gesundheitswesen), der Energiewirtschaft (zukünftige Energien und Ressourcen), Umweltschutz in Verbindung mit der Kreislaufwirtschaft, der Informations- und Kommunikationstechnik sowie des Transportwesens und der Mobilität [10], [11].

Die weiteren Betrachtungen beziehen sich vor allem auf Methoden zur Lösungsbewertung und zielgerichteten Extrapolation von Entwicklung in die Zukunft. Eine Anwendung der vorgeschlagenen Methoden für die Szenariotechnik wird ebenfalls erfolversprechend sein. Die Vorgehensweise ist verbunden mit Bewertungen und Aussagen zu folgenden Schwerpunkten:

- Innovations-Niveau von Erzeugnissen und Technologien
- Möglichkeiten der Weiterentwicklung der Erzeugnisse und Technologien
- Entwicklungsschritte anderer angrenzender oder ähnlicher Erzeugnisse, Technologien und deren Übertragung auf die aktuelle Aufgabe

Grundlage der Lösungserarbeitung und –bewertung ist die TRIZ-Methode (Grundlagen der Theorie für die Problemlösung bei Erfindungen – Theory of Inventive Problem Solving), insbesondere die Analogien, d.h. die Evolutionsgesetze, Standardlösungen, einschließlich der Stoff-Feld-Modellierung sowie Innovations- und Separationsprinzipien.

Das gegenwärtige Innovationsniveau und die Trends einer Technologie im Vergleich zu Konkurrenzlösungen lässt sich bewerten oder einschätzen über die Entwicklungsmuster der Evolution. Die Evolutionsgesetze zeigen Möglichkeiten der Weiterentwicklung auf. Sie schließen die Entwicklung der Ressourcen (stoffliche, feldförmige, zeitliche, räumliche, funktionale Ressourcen und Informationsressourcen) ein. Unter den Bedingungen der Anwendung der TRIZ-Methodik werden die angestrebten „Innovativen- oder Starken Lösungen“ immer als Annäherung an die „Ideale Maschine“ oder an den „Idealen Prozess“ zu verstehen sein. Die Annäherung an die Idealität ist damit Bewertungskriterium neuer Lösungen. Die Idealität erhöht sich durch Verbesserung des Nutzens, einer Reduzierung des Aufwandes und der Verringerung der unerwünschten Nebeneffekte.

2. TRIZ-Methode (Grundlagen der Theorie für die Problemlösung bei Erfindungen – Theory of Inventive Problem Solving)

Methoden und Verfahren der Ideenfindung

Die gebräuchlichsten Erfindungsmethoden und Verfahren werden nach [2] in drei Gruppen eingeordnet. Die **intuitiv orientierten Methoden** sind gekennzeichnet durch subjektive und spontane Aktivitäten, die nur selten und zufällig zu starken Lösungen führen. Die **systematisch orientierten Methoden** stützen sich auf durchdachte, sachlich gegliederte, planmäßig durchlaufene, jederzeit wiederholbare Denk- und Handlungszyklen. Sie sind das Handwerkzeug in allen Bereichen der Entwicklung und werden auch zukünftig in unterschiedlichen Formen bzw. Variationen eingesetzt. Die **widerspruchorientierten Methoden** erfordern neben der systematischen Arbeitsweise das Ableiten von Widersprüchen aus den Aufgabenstellungen. WOIS (Widerspruchorientierte Innovationsstrategie) und TRIZ sind die bedeutendsten Vertreter und führen bei sachgemäßer Anwendung zu „Starken Lösungen“. Weitere Untersuchungen basieren auf der Anwendung der TRIZ-Methode, vor allem auch durch ihren effektiven Einsatz mittels der verfügbaren Softwaretools. Basierend auf der Arbeit Altschulers entwickelten TRIZ-Experten diese Methoden vor allem in den USA weiter. Leistungsfähige Software-Tools unterstützen den Erfinder in seiner Arbeit [3].

Methode oder Geistesblitz?

Innovationen lassen sich heute nur noch systematisch erarbeiten. Die Theorie verbindet Kreativität mit Systematik und hilft technisch-wissenschaftliche Aufgabenstellungen methodisch und systematisch zu entwickeln und ohne Kompromisse in „starke Lösungen“ zu überführen. TRIZ wurde entwickelt aus einer Breiten- sowie Tiefenanalyse und einer Klassifizierung von Erfindungsaufgaben der höheren Ebene. Ergebnis der Patentanalyse von über 2,5 Millionen Schriften ist die Erkenntnis, dass Innovationen nicht zufällig entstehen, sondern bestimmten Gesetzmäßigkeiten unterliegen:

- Die Entwicklung technischer Systeme verläuft evolutionär, nach vorhersehbaren Entwicklungsgesetzen bzw. bestimmten Mustern.
- Innovationen entstehen aus Widersprüchen / Konflikten zwischen unterschiedlichen Anforderungen.
- Die gesamte Lösungsfindung verläuft nach einem „Algorithmus der erfinderischen Problemlösung“ (ARIZ).
- Der Vielzahl von Erfindungen liegt eine vergleichsweise kleine Anzahl von Lösungsprinzipien zugrunde.

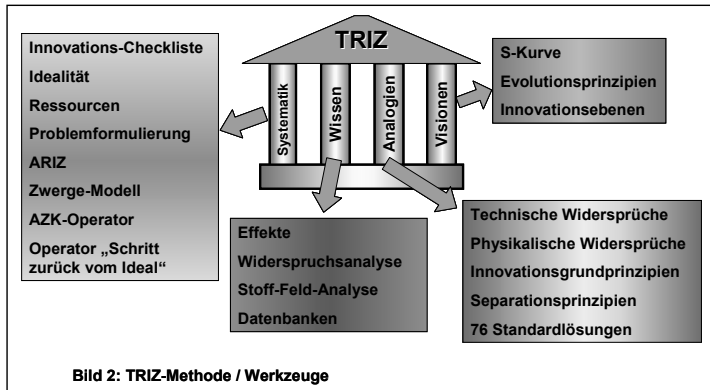
Innovationen ohne Kompromiss / TRIZ-Methode

Die TRIZ-Methode stellt dem Anwender eine Vielzahl von Werkzeugen (Bild 2) zur Verfügung, die ihn bei der systematischen Bearbeitung von Problemen unterstützen (auch mittels Softwarelösungen) und zu einer schnellen Findung von realisierbaren Lösungen beitragen:

- **Visionen:** Methode und Software stellen Trends der „technologischen Evolution“ und das „Idealitätsprinzip“ zur Verfügung mit denen viele Probleme in einem Schritt voraus gedacht werden können. Der Gedanke an einen Patentschirm führt zu umfassenden Lösungen.
- **Systematik:** Die TRIZ-Methoden bieten neben dem Algorithmus zur erfinderischen Problemlösung „ARIZ“, die „Innovations-Checkliste“, die „Objektmodellierung“ und die „Fehleranalyse“ an.
- **Analogien:** In 90- 95% aller Fälle bestehen schon irgendwo Lösungen, also branchenübergreifend, die sich auf das anstehende Problem übertragen lassen. TRIZ stellt dazu Lösungsstrategien, wie „Widersprüche“, „Innovationsgrundprinzipien“, „Separationsprinzipien“, „Standardlösungen“, „Messprobleme“ usw. bereit.

- **Wissen:** Kurze Entwicklungszeiten und bessere, „starke“ Lösungen werden durch den gezielten Einsatz von Ressourcen, Effekten, Beispielen und Patenten erreicht. Auf Grundlage der verfügbaren Bausteine können Erkenntnisse aus anderen Wissensbereichen genutzt werden und eigene Wissensbasen werden aufgebaut.

Dabei ist die Aufgabe des Anwenders, offen für neue Denkansätze zu sein, und durch geeignete Wahl der Methoden (Bild 3) eine effiziente Lösungsstrategie zu entwickeln.



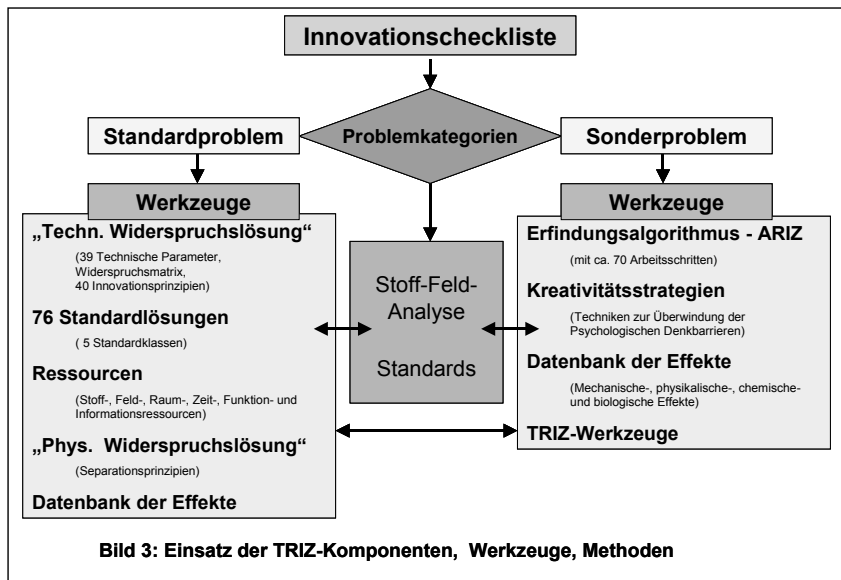
Denkblockaden überwinden!

Die Bearbeitung von aktuellen Aufgaben im Innovationsprozess wird wirkungsvoll und richtungsweisend unterstützt, Trendvorhersagen und die Beurteilung strategischer Ausgangslagen werden ermöglicht. Der mit der TRIZ-Methode und den Softwarelösungen [8], [9] umgesetzte Algorithmus dient dem systematischen Aufspüren von sogenannten starken Lösungen durch Erschließen bisher unbekannter Wissensgebiete für den Anwender (Adaption von Kenntnissen aus branchenfremden Bereichen) und damit der Überführung von Aufgaben der höheren Ebene in das Niveau der unteren, d.h. normaler Ingenieurstätigkeit. Mit der Anwendung der methodischen Werkzeuge wird der Denkprozess gelenkt und Denkblockaden werden überwunden. Die Problemstellungen werden bei der Aufbereitung in eine Modellebene überführt, in der die abstrakte Lösungssuche erfolgt.

3. TRIZ-Evolutionsprinzipien als Grundlage zur Bewertung von Innovationen

Die Standard-Entwicklungsmuster der technischen Evolution [1] beschreiben die Entwicklung technischer Systeme. Die Erfüllung der Aufbau- und Bewegungsgesetze ist Voraussetzung für die Lebensfähigkeit aller Systeme, auch biologischer Systeme. Trendgesetze kennzeichnen dagegen die Hauptentwicklung technischer Systeme. Die aktualisierten Evolutionsprinzipien [5] werden zur Bewertung von Innovationen genutzt:

- **Technologie-Lebenszyklus / Lebenslinie** (S-Kurve Bild 4 und Pkt. 3.1.)
- **Vergrößerung der Idealität** (Bild 5 und Pkt. 3.1.)
- **Uneinheitliche Entwicklung der Systemteile**
(Widersprüche entstehen daraus, dass sich Systemkomponenten nicht gleichmäßig entwickeln. Jede Systemkomponente hat seine eigene S-Kurve.)
- **Erhöhung der Dynamik und Steuer- bzw. Regelbarkeit**
(Technische Systeme durchlaufen eine Entwicklung zur höheren Dynamisierung und Steuerbarkeit.)
- **Über Komplexität zur Einfachheit**



(Im Verlauf der Evolution werden technische Systeme zunächst immer komplizierter, um dann erkennbar vereinfacht zu werden.)

- **Evolution mit passenden und gezielt nicht passenden Komponenten**
(Bei technischen Systemen verläuft die Entwicklung über die Verwendung von gezielt zusammenpassender oder gezielt nicht zusammenpassender Komponenten. Ziele sind der Ausschluss unerwünschter Effekte und die Verbesserung der Gesamtwirkung.)
- **Miniaturisierung und verstärkter Einsatz von Feldern**
(Die Evolution verläuft generell von der Makro- zur Mikroebene. Im Verlauf der Entwicklung erfolgt die Nutzung von Feldern, um Performance oder Kontrolle bzw. Selbststeuerung zu verbessern.)
- **Geringere menschliche Interaktion**
(Die Entwicklung verläuft in Richtung zur überwachenden und intellektuellen Tätigkeit, d.h. Selbststeuerung, Selbstkontrolle, Automatisierung. Denkansätze [4]: Eliminiere unterstützende Funktionen; Eliminiere Teile; Erkenne Selbstbedienung; Ersetze Einzelteile, Komponenten oder das ganze System; Ändere Funktionsprinzipien; Nutze Ressourcen.)

Aus den Evolutionsprinzipien 2, 5 und 8 lässt sich ein vereinfachter, sehr subjektiver Ansatz der Ideenbewertung ableiten. Dazu sind die nachfolgenden Fragestellungen zu beantworten (Tab.: 1). Verbesserung der Einschätzung sind möglich über nähere Betrachtungen der einzelnen Entwicklungstrends im nachfolgenden Abschnitt.

Evolutionprinzipien	Beantwortung der Fragestellungen zur Einstufung des Innovationsniveaus
(2) - Vergrößerung der Idealität	Wie weit ist die Idee vom Idealen Endresultat (IER) entfernt?
(5) - Über Komplexität zur Einfachheit	Wie genial einfach ist die Idee?
(8) - Geringere menschliche Interaktion	Wie weit ist die Idee eine „Von-Selbst-Lösung“?
Tab. 1: Fragestellungen zur Innovationsbewertung	

3.1. Lebenslinie

Die Entwicklung technischer Systeme oder Technologien ist kein chaotischer Prozess und hängt nicht von Erfindern ab. Sie unterliegt bestimmten Gesetzmäßigkeiten. Die zeitliche Veränderung (Lebenslinie – Bild 4) der Hauptmerkmale eines technischen Systems (Leistung, Kapazität, Geschwindigkeit,...) ist gekennzeichnet durch eine S-förmige Funktion, wie sie auch in der Entwicklung biologischer Systeme (Evolutionstrends) nachgewiesen wird. Trotz Besonderheiten der unterschiedlichen technischen Systeme sind charakteristische Abschnitte der „Lebenslinie“ erkennbar: „Kindheit“, „Reife“ und „Alter“.

Die realen Lebenslinien weichen deutlich von den zu erwartenden theoretischen Vorhersagen ab. Dies liegt begründet in einer Trägheit der ökonomischen Faktoren und subjektiven Neigungen (Furcht vor Aufgabe gewohnter Systeme). Die ökonomischen Faktoren passen sich der subjektiv bedingten Trägheit an und führen somit zu einer verschwerenderen Ausbeutung der vorhandenen Möglichkeiten (verstärkte Umweltbelastung eingeschlossen). Darin liegt auch die Begründung für den verspäteten Übergang zu einem neuen System auf höherer Ebene.

Die Eigenschaften der Lebenslinie sind gekennzeichnet durch Kennzahlen für „Anzahl“, „Niveau“ und „Durchschnittseffektivität“ der Erfindungen. Darüber lassen sich der gegenwärtige

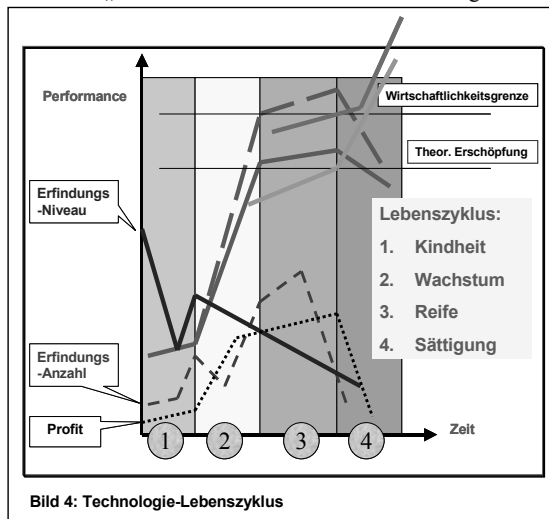


Bild 4: Technologie-Lebenszyklus

Entwicklungsstand einer Lösung und die möglichen Entwicklungsreserven einschätzen.

Die Weiterentwicklung lässt sich gezielt steuern (Directed Product Evolution - DPE). Die bewusste Nutzung zum Ableiten von Schutzschirmen für Lösungen ist denkbar.

Das Stadium einer Lösung, d.h. die Position eines betrachteten Systems auf der S-Kurve lässt sich bei der Nutzung der Kriterien „Erfindungsniveau“ und „Erfindungsanzahl“ festlegen. Das Erfindungsniveau ist am Anfang des Lebenszyklus am größten. Zum Zeitpunkt der Massenproduktion steigt das

Niveau noch einmal an. Nur Lösungen der beiden höchsten Erfindungsniveaus können Substitutionstechnologien auslösen. Diese Kriterien könnten bei der Beurteilung von Lösungen genutzt werden, erfordern aber die komplette Auswertung der Patentliteratur.

3.2. Problematik „Ideale Lösung“

Beim Einsatz der TRIZ-Methode oder auch schon bei der Anwendung der Verfahren der Konstruktionsmethodik werden viele Ideen zusammengetragen, von der eine Verbesserung der gegenwärtigen Lösungen bzw. Verfahren oder Prozessabläufe erwartet wird. Das Ziel des Methodeneinsatzes, vor allem bei der Anwendung der TRIZ-Methodik, ist die Generierung von „Innovativen Lösungen“ oder auch von „Starken Lösungen“ (Identische Bezeichnungen: „Ideales Endresultat – IER“ bzw. „Ideal Finale Resultat - IFR“).

Unter den Bedingungen der Anwendung dieser Methodik werden „Innovativen- oder Starken Lösungen“ immer als Annäherung an die „Ideale Maschine“ oder an den „Idealen Prozess“ zu verstehen sein. Die Ideale Maschine wurde als TRIZ-Werkzeug von Altschuller definiert:

„Die Ideale Maschine ist ein Eichmuster, das über nachfolgende Eigenheiten verfügt: *Masse, Volumen und Fläche des Objektes, mit dem die Maschine arbeitet, stimmen ganz oder fast vollständig überein mit Masse, Volumen und Fläche der Maschine selbst. Die Maschine ist nicht Selbstzweck.* Sie ist nur das Mittel zur Durchführung einer bestimmten Arbeit. [6]“

Beim Einsatz der TRIZ-Methodik muß im Denken klar auf ideale Lösungen orientiert werden. Schädliche Faktoren sind zu beseitigen. Anzustreben sind Lösungen,

- bei denen die schädlichen Wirkungen von selbst verschwinden,
- bei denen man sie mit anderen schädlichen Wirkungen zusammen beseitigt,
- bei denen schädliche Wirkungen in nützliche Wirkungen umgewandelt werden [1].

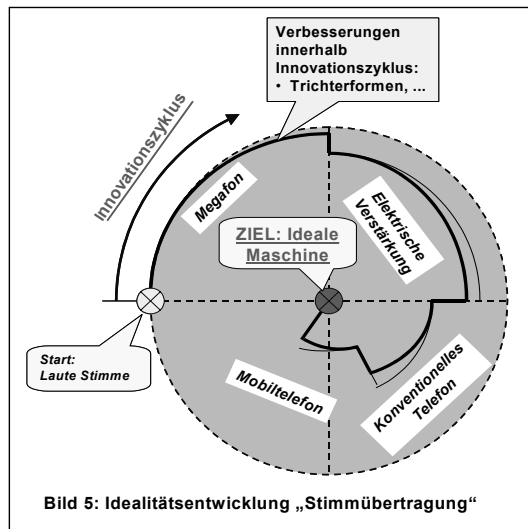
In verständlicher Form lässt sich das Altschuller-Resultat als Grundbedingung auf die nachfolgenden Kategorien anwenden:

- Die „Ideale Maschine“ stellt ihre Funktion zur Verfügung, existiert aber selbst nicht. Sie benötigt keinen Raum und keine Wartung.
- Das „Ideale Verfahren“ ermöglicht selbsttätig die geforderte Wirkung. Energie und Zeit werden nicht verbraucht, da die Wirkung im Vorhinein erzielt wird.
- Der „Ideale Stoff“ ist als Stoff nicht vorhanden, seine Funktion wird aber voll erfüllt.
- Das „Ideale Feld“ übt seine geforderte Wirkung aus, benötigt keine Energie und Zeit.

Die Vorteile bei der Formulierung der IDEALE liegen nach [7] in:

- Zeitlich begrenztes Denken erfolgt außerhalb der persönlichen Denkgrenzen.
- Der Anwender wird gezwungen, sich mit der Zieldefinition zu befassen. Das Idealkonzept stellt eine Zieldefinition oder Orientierungshilfe dar, die nicht in allen Fällen erreicht werden muss. Sie stellt ein Fernziel der Entwicklung dar.
- Durch Anbieten alternativer Lösungskonzepte werden empfundene oder wirkliche Barrieren überwunden.
- Trends lassen sich leichter erkennen, aufdecken, da die Ideenfindung mit der Orientierung am IDEAL (an der idealen Maschine, dem idealen Prozess, dem idealen Werkstoff oder dem idealen Feld usw.) beginnt.

Die Idealität erhöht sich sprunghaft, wobei die Länge der Innovationszyklen sich zunehmend verringert (Bild 5). Der Idealitätsanstieg innerhalb eines Zyklus ist unbedeutend.



4. Bewertung von Innovationensideen

Als Grundlage der Bewertung von Innovationen wird die Idealität genutzt. Die Idealität erhöht sich durch Verbesserung des Nutzens, einer Reduzierung des Aufwandes und der Veringerung der unerwünschten Nebeneffekte.

$$\text{Idealität} \uparrow = \frac{\Sigma \text{ Nutzen} \uparrow}{\Sigma \text{ Kosten} \downarrow + \Sigma \text{ Nebeneffekte} \downarrow}$$

Nebeneffekte sind alle schädigenden Wirkungen, ggf. bis hin zu den Problemen des Recyclings am Ende einer Nutzungsperiode mit den daraus entstehenden Kosten. Bei einer Bewertung ist davon auszugehen, dass immer nur eine verbaler Vergleich durch Unterschiede oder Veränderungen in den Kategorien Nutzen, Kosten und Nebeneffekte zwischen konkurrierenden Produkten bzw. Technologien möglich ist. Zum Vergleich können auch Ideallösungen oder Lösungen, gewonnen durch den Einsatz „Widerspruchorientierte Methoden“ (TRIZ, WOIS) herangezogen werden.

Zur Einstufung der Trends der Nutzungsverbesserung, der Kostenreduzierung und Vermeidung von unerwünschten Nebeneffekten werden Kataloge erarbeitet. Wissenschaftliche Grundlage der Kataloge sind TRIZ-Werkzeuge (Innovationsprinzipien, TRIZ-Standards, Stoff-Feld-Analyse, Evolutionsprinzipien und Ressourcen) und Bausteine der Software-Tools Trisolver 2.1 [8] sowie TechOptimizer 4.0 [9].

Die **Einstufung des Nutzens** ist möglich über Trends der Technologieentwicklung:

- Koordination und Abstimmung
- Zunehmende Steuerbarkeit
- Miniaturisierung
- Übergang zum Obersystem
- Geometrische Evolution

Innerhalb der einzelnen Trends ist eine Nutzungsverbesserung durch mehrere Einzeltrends möglich, die mittels TRIZ-Komponenten (Innovationsprinzipien, TRIZ-Standards) beschreibbar sind. Bild 6 zeigt dies für den Trend „Miniaturisierung“ am Beispiel der Drucktechnik und der Lagertechnik. Die Software [9] bietet entsprechende Bausteine zur Lenkung des Denkprozesses und Lösung von Blockaden.











Technologie-Entwicklung	Printing mechanism				
	 Letter printer  Matrix printer  Jet printer  Ion printer  Laser <hr/>  Ball-bearing suspension  Double-row suspension  Microball-bearing suspension  Gas suspension  Magnetic field suspension				
Innovationshöhe:	1 – 2 (-)	3 – 4 (-)	5 – 6 (0)	7 – 8 (+)	9 – 10 (++)

Bild 6: Nutzenerhöhung durch Miniaturisierung - Zerlegen

Die **Einstufung der Nebeneffekte** erfolgt nach dem Erkennen der Wirkungen von schädlichen Einflüssen und die Reaktion auf dies Wirkungen entsprechend Tab. 2.

Erkennen und Reaktion auf Nebeneffekte	Bewertungen / Einstufung	
Reaktion war möglich, erfolgte aber nicht	(--)	1 – 2
Reaktion war möglich und erfolgte durch Beseitigung der Folgen	(-)	3 – 4
Reaktion war möglich und erfolgte durch Beseitigung der Wirkung	(0)	5 – 6
Reaktion war möglich und erfolgte durch Beseitigung der Ursache	(+)	7 – 8
Reaktion war möglich und erfolgte durch Umwandlung von Schädlichen in Nützlich	(++)	9 - 10

Tab. 2: Bewertung der Reaktion auf schädliche Nebeneffekte

Die Einschätzung der **Kostenreduzierung** erfolgt nach einem Katalog von insgesamt 12 Kriterien, von denen hier nur die wichtigsten genannt werden:

- „Prinzip des Weglassens“: Eliminieren von Teilen und Funktionen
- Verwendung von Systemressourcen
- Universalität
- Selbstbedienung / Selbstversorgung / Von-Selbst-Arbeitsweise
- Systemoptimierung und Vereinfachung bei Bi- oder Polysystemen
- Abtrennen

Bei der Verwendung von Systemressourcen ist die vollständige Verwendung aller verfügbarer und bisher nicht genutzter Ressourcen anzustreben. Ressourcen im System, im Obersystem und in der Umgebung sollen mittels Checklisten (Zusammenstellung stofflicher-, feldförmiger-, räumlicher-, zeitlicher Ressourcen sowie Informations- und Funktionsressourcen) aufgedeckt werden (Bild 7, [9]).























Substances with special properties		
 Adhesive	 With strong odor	 Conductive
 Easily deformed	 With strong taste	 Semiconductive
 Easily breakable	 Ferromagnetic	 Transparent
 Bi-metal	 Ferromagnetic powders	 Photosensitive
 Changeable resistance	 Ferromagnetic liquids	 X-ray sensitive
 Changeable color	 Dielectric	 Luminescent
 With low friction	 Electrorheologic liquids	 Chemically-active
 With high friction		

Bild 7. Substanzen mit speziellen Eigenschaften

Die Ausführung der Bewertung kann mittels Softwaremodul „Feater-Transfer“ im TechOptimizer [9] vorgenommen werden. Die jeweils gewichteten Einzelkriterien (Wichtungsfaktoren 1 - 10) sind mit gewünschter Entwicklungsrichtung (steigern oder reduzieren) zu beschreiben und mit Maßzahlen (Skala 1 ... 10) zu bewerten. Als Einzelkriterien werden

die Trends oder Einzeltrends der Technologieentwicklung, die Reaktion auf Nebeneffekte und eine Abschätzung der zu erwartenden Kosten nach den angegebenen Kategorien eingesetzt und über Maßzahlen eingestuft.

5. Zusammenfassung

Ziel der beschriebenen Vorgehensweise ist eine Einstufung der einzelnen Varianten, entstanden aus der Ideenfindung zu bestimmter Themenstellung, auch im Vergleich zu anderen Lösungen und zur Ideallösung in eine Rangfolge einzuordnen. Vor allem sollte abgeschätzt werden, ob die ausgewählte Technologie- bzw. Produktvariante einen neuen Innovationszyklus bestimmt.

Eine Lösungsbewertung nach „Muss- oder K.o.-Kriterien“ (Realisierbarkeit der Idee, Komplementarität mit Unternehmensgrundsätzen, Übereinstimmung mit gesetzlichen Rahmenbedingungen, Sicherheit von Schutzrechten) und weitere „Kannkriterien“ (Benutzerfreundlichkeit, Sicherheit, Komfort, Funktionalität, ...) werden hier nicht berücksichtigt. Diese Schritte sollten sich unbedingt an die oben beschriebenen Verfahrensweise anschließen.

Literatur:

- [1] G. S. Altschuller: Erfinden - Wege zur Lösung technischer Probleme; Verlag Technik, Berlin, 1984
- [2] H. Obernik; INVENT, Methoden des wissensorientierten Problemlösens, Handbuch;T.IN.A, Technologie- und Innovationsagentur Brandenburg GmbH, April 1999
- [3] H.-J. Günther; Erfinder- und Innovationsstrategie mit TRIZ und CAI; Berichte des Innovations- und Bildungszentrums Hohen Luckow e. V., Nr. 10, Jahrgang 2000
- [4] P. Schweizer: Schulungsunterlagen „Entwicklungsmethodik“; Entwurf zu den Kapiteln TRIZ und CAI, Zürich, 22.07.1999
- [5] T. Herb: TRIZ – Erfinden mit System; hom page: <http://www.gtd-id.de>
- [6] Altschuller; G.: Erfinden - (k)ein Problem?; Anleitung für Neuerer und Erfinder, Verlag Technik; Berlin, 1983
- [7] Teufelsdorfer, H.; Conrad, A: Kreatives Entwickeln und innovatives Problemlösen mit TRIZ/TIPS, Einführung in die Methodik und Verknüpfung mit QFD; Publicis MCD Verlag, 1998
- [8] Software-Nutzung TRISOLVER 2.1
- [9] Software-Nutzung TechOptimizer 4.0
- [10] Pictures of the Future; Die Zeitschrift für Forschung und Innovation; Siemens Ag, Oktober 2001
- [11] AutorInnenpapier der Bundestagsabgeordneten H.-J. Fell, MdB; F. Kuhn, MdB; u.a.; Innovation - Mit neuen Produkten und Dienstleistungen neue Arbeitsplätze schaffen

Diskussion

Prof. Brökel

Sehr interessant ist die Idee mit der Gedankenübertragung. Man sollte vielleicht eine spezielle Sicht auf die Gedanken übertragen und nicht die Gedanken selbst!

Prof. Günther

Die Frage ist, wo geht die Entwicklung hin? Wir haben das ja eben gehört. Man kann viele Gedanken äußern, und wenn man dann mit den verhältnismäßig unbelasteten Studenten im Fach Konstruktionsmethodik diskutiert, dann kommen z.B. solche Ideen, wie intelligente Straße oder intelligenter Fußboden oder das intelligente Auto. Wir haben über die vorgetragene Methode z.B. das Problem der Fahrzeuginnereien gelöst, welches von Herrn Daum (DAUM GmbH Schwerin) patentiert wurde. Er kommt jetzt mit Forderungen, Autos mit Methoden zu kontrollieren, hinsichtlich irgendwelcher Sprengstoffablagerungen und anderer Sicherheitstechniken. Damit sind wir schon bei dem Problem „Intelligenter Fußboden“, bei einem Fußboden, der mir sagt, da schnüffelt es nach Sprengstoff und der den Spürhund erspart. Oder die Frage der intelligenten Straße, die mir sagt, wie z.B. der Straßenzustand ist. Man kann viele solche Beispiele finden.

Dr. Wegmann

Es werden ja hier Ideen erzeugt und dann werden sie wieder aussortiert, um zu einer Lösung zu kommen. Viele Ideen, die nicht brauchbar sind, werden verworfen. Bietet das System eine Möglichkeit, die Ideen, die momentan nicht brauchbar sind, zu einem späteren Zeitpunkt zu managen?

Prof. Günther

Dieses Management ist sowohl im TechOptimizer enthalten, als auch im Trisolver. Der Trisolver ist eine Software aus Hannover und relativ preiswert, wogegen der Tech-Optimizer sehr teuer ist. Die Hochschule muss dafür eine monatliche Lizenz erwerben. Man kann also bei diesen Software-Produkten die Ideen in Datenbanken ablegen. Dabei erfolgt eine Einordnung nach bestimmten Kriterien, wie Realisierungsaufwand, Marktpotential und Realisierungszeit. Die Software Trisolver bietet zwar nicht den Komfort wie der TechOptimizer, aber es ist möglich.

Prof. Höhne

Wie seriös sind die „routemaps“, die verwendet werden?

Prof. Günther

Es gibt ein monatliches update. Wenn man eine Lizenz hat, kann man das nutzen. Da wird zumindest auf Patente hingewiesen. Darauf muss man sich dann verlassen. Sie können natürlich auch die Patente einsehen. Dazu gibt es einen offiziellen Link zu den Patenten. Sie können also weltweit, leider nicht deutschlandweit, das ist das Kuriose dabei, Patentrecherche betreiben.

Prof. Rugenstein

Wenden sie diese Methode auch in der Ausbildung an, und wie sieht es mit dem Zeitfond aus?

Prof. Günther

Bestimmte Inhalte der Methodik werden in den Fächern „Konstruktionsmethodik“ und im Fachstudium „Innovationsmethodik“ als alternative Prüfungsleistung in Gruppen von

zwei/drei Studenten mit spezieller Themenstellung abgefordert oder wir kombinieren Inhalte mit dem Studienbeleg zu Themen aus der Praxis.

DI Cantow

Gibt es eine Zeiteinsparung in der Entwicklung bei der Nutzung der Software gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise unter Anwendung der Konstruktionsmethodik?

Prof. Günther

Eine Zeiteinsparung gibt es wahrscheinlich nicht.

DI Cantow

Wie wird man dahingeführt, dass man bessere Ideen hat, als in der herkömmlichen Konstruktionsmethodik?

Prof. Günther

Das Auffinden von besseren Lösungen wird gelenkt in Richtung auf „starke Lösungen“, d. h. Lösungen, die bei richtigem Methodeneinsatz einer Ideallösung entsprechen. Voraussetzungen dafür sind eine sichere Beherrschung der Methoden und der Software, verbunden mit exakter Arbeitsweise, ggf. auch unter Einbeziehung von Spezialisten. Der Methodeneinsatz erfordert als erste Voraussetzung eine Analyse und Zusammenstellung der Ausgangsdaten und Bedingungen. Daraus werden Entscheidungen zum weiteren Methodeneinsatz abgeleitet.

Ungenügende Ergebnisse waren bei einem untersuchten Problem beispielsweise auf unklare Beschreibungen der Ausgangssituation und das ungenügende Einbinden von Experten, z.B. Chemiker zurückzuführen. Man muss ggf. Spezialisten in das Lösungsteam einbeziehen, um eine hohe Qualität der Lösung zu garantieren. Der Methodeneinsatz wird scheinbar auch nicht billiger. Starke Lösungen sparen bestimmte Folgekosten.

Prof. Höhne

Es geht doch wohl in erster Linie bei dieser Methode nicht um platte Rationalisierung sondern vielmehr darum, eine größere Anzahl von Informationen in den frühen Phasen der Entwicklung mit einzubringen. Die Qualität und die Sicherheit für die nachfolgenden Prozesse können erhöht werden, das Geld, was ich hier hineinstecke, kann ich bei den nachfolgenden Prozessen sparen. Es kommt zu weniger Fehlentscheidungen und Rückrufen.

Prof. Günther

Das läuft auch bei namhaften Unternehmen so. Dort werden regelmäßig Workshops, mit allen Experten durchgeführt. Es wird bis zu einem bestimmten Punkt diskutiert, dann wird bewertet, selektiert, ausgewählt und danach nichts mehr geändert. Das ist eine Grundregel!

Entwicklung einer neuen Generation von hochgenauen Positionier- und Messmaschinen mit Hilfe von Virtual Prototyping

Günter HÖHNE, Markus LOTZ

Technische Universität Ilmenau

Abstract

Die Konfiguration einer Nanopositionier- und Messmaschine ist abhängig von ihren Einsatzfeldern. Durch Modularisierung der Struktur einer solchen Maschine können das entstehende Plattformkonzept und die Konstruktion der Maschine für ein weites Feld von technologischen Prozessen mit extremer Genauigkeit eingesetzt werden. Die funktionsorientierte Konfiguration wird durch eine Sammlung von Lösungsprinzipien für das Plattformkonzept unterstützt. Virtual Prototyping wird dabei genutzt, verschiedene Maschinentypen und Konfigurationen zu testen und zu evaluieren.

Keywords

Komplexität, Mechatronik, Modularisierung, Virtual Prototyping

1 Einleitung

Eine ständig steigende Komplexität kennzeichnet die automatisierten Maschinen und Geräte, welche in technischen Versuchs- und Herstellungsprozessen zum Einsatz kommen. Hier sind Mehrkoordinatenpositionier- und Messmaschinen gefragt, welche die höchsten Anforderungen in diesen Anwendungsfeldern im Bezug auf Genauigkeit, Geschwindigkeit, Reproduzierbarkeit und Stabilität erfüllen können. Und dies für eine präzise Positionierung bei immer größer werdenden Bewegungsbereichen.

Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung und Vermessung von Wafern für die Mikroelektronik. In Kürze wird hier ein Bedarf an Positioniersystemen mit Genauigkeiten im Nanometerbereich entstehen. Diese Geräte werden aus mechanischen, elektrischen, elektronischen und Software-Komponenten bestehen. Aus diesem Grund muss deren Entwurf als mechatronisches Projekt behandelt werden. Die Geräte benutzen eine große Anzahl von verschiedenen Werkzeugen, um ein breites Spektrum von Anwendungsfeldern abdecken zu können. Anwendungen sind beispielsweise in der Mikromechanik, der Nanotechnologie, der Gentechnik aber auch in der Metrologie zu finden. So entsteht eine neue Generation von Maschinen mit einer sehr großen Flexibilität.

Es stellt sich dabei die Aufgabe, die Anforderungen der verschiedenen Anwendungsfelder zu erfüllen, indem durch Konfiguration und Kombination geeigneter Module verschiedene Produkte für den gewünschten Einsatzfall entstehen. Daraus ergibt sich die Frage, ob und wie bei solch hohen Genauigkeitsforderungen ein Baukastenkonzept realisiert werden kann. Da es aus finanzieller Sicht nicht möglich ist, alle Lösungen experimentell zu testen, stellt sich als weitere Aufgabe die bestmögliche Lösung für den gesuchten Anwendungsfall unter Zuhilfenah-

me von Virtual Prototyping zu finden. Das Wissen, welches durch die Forschung auf diesem Gebiet entsteht, soll dem Konstrukteur systematische Prinzipien zur Entwicklung solcher Maschinen zur Hand geben.

2 Spezifikation der technologischen Anforderungen

Der erste Schritt bei diesem Systementwurf ist die Analyse der technologischen Prozesse, in welchem die Nanopositionier- und Nanomessmaschine zum Einsatz kommen soll (siehe Tabelle 1). Dazu ist es notwendig zuerst, alle Operationen, welche von der Maschine gemäß den bekannten Regeln zur Inspektion, zum Messen, zum Prüfen, zum Justieren und zum Bearbeiten ausgeführt werden sollen, zu beschreiben.

Tabelle 1 – Funktionen und Anwendungsfelder von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Funktionen von NPM-Maschinen	Anwendungsfelder von NPM-Maschinen						
	Elektronik	Optik	Fertigung	Chemie & Nanomaterialien	Biotechnologie	Metrologie	...
Kalibrieren	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	...
Messen	1.2 ■	2.2 ■	3.2 ■	4.2 ■	5.2	6.2 ■	...
Prüfen	1.3 ■	2.3 ■	3.3 ■	4.3 ■	5.3 ■	6.3	...
Manipulieren	1.4 ■	2.4	3.4 ■	4.4	5.4 ■	6.4	...
Bearbeiten	1.5	2.5 ■	3.5	4.5	5.5	6.5	...
Strukturieren	1.6 ■	2.6 ■	3.6 ■	4.6 ■	5.6 ■	6.6	...
Montieren	1.7	2.7	3.7 ■	4.7	5.7 ■	6.7	...
...

Zur Spezifizierung einer speziellen Applikation wird ein verallgemeinertes Modell verwendet. Es beschreibt die Gesamtfunktion der benötigten Maschine durch Bestimmung ihrer Interaktionen mit der erwarteten Umwelt, bestehend aus Benutzer, anderen technischen Systemen und der umgebenden Atmosphäre.

Das Ziel, verschiedene technologische Prozesse mit einer kleinen Zahl von unterschiedlichem technischen Equipment zu unterstützen, führt zu dem Konzept eines modularen Systems.

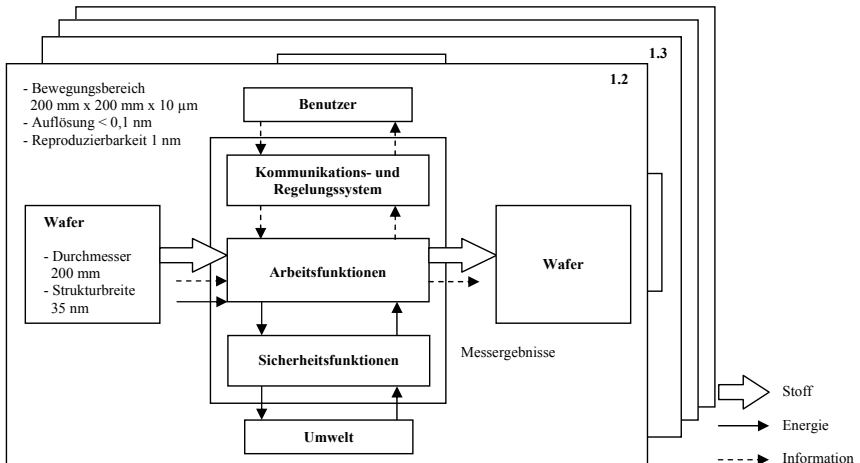


Abbildung 1 – Gesamtfunktion eines Nanopositioniersystems zur Wafer-Inspektion

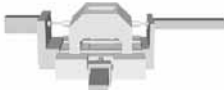

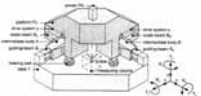



Die hier beschriebene Maschine (Abbildung 1) soll zum Messen und Prüfen der Oberfläche und der Strukturen von Wafern mit mikroelektronischen Schaltkreisen eingesetzt werden.

Diese Spezifikation des Einsatzfeldes 1.2 gibt ein Beispiel für die weiteren möglichen Einsatzfelder.

3 Stand der Technik und systematisches Vorgehen zu einer modularen Produktstruktur

Die aktuelle Situation auf dem Gebiet der ultra-hoch präzisen Positionier- und Messmaschinen ist gekennzeichnet durch spezielle Konstruktionen. So gibt es heute eine große Vielfalt von Einzellmaschinen; individuell entwickelt als einmalige Systeme [1, 2]. Tabelle 2 zeigt eine aktuelle Auswahl solcher Systeme, welche für Messungen von Mikro- und Nanostrukturen eingesetzt werden.

Tabelle 2 – Mehrkoordinaten Messsysteme mit Auflösungen im Nanometerbereich (Auswahl)

Bezeichnung	Technische Daten		Struktur
“Nano-CMM” University of Tokio	Anordnung: Bewegungsbereich: Reproduzierbarkeit:	seriell, y-Achse parallel x-, y-, z-Bewegungen 10 mm x 10 mm x 10 mm 20 nm	
“Small CMM” National Physical Laboratory UK	Anordnung: Bewegungsbereich: Reproduzierbarkeit:	seriell x-, y-, z-Bewegungen 50 mm x 50 mm x 50 mm < 50 nm	
“High Precision 3D-CMM” TU Eindhoven	Anordnung: Bewegungsbereich: Reproduzierbarkeit:	seriell x-, y-, z-Bewegungen 100 mm x 100 mm x 100 mm < 100 nm	
“Ultra Precision CMM” BUPE Korea	Anordnung: Bewegungsbereich: Reproduzierbarkeit:	seriell x-, y-, z-Bewegungen 300 mm x 300 mm x 300 mm 30 nm	
“M3 - Molecular Measuring Machine” NIST USA	Anordnung: Bewegungsbereich: Reproduzierbarkeit:	seriell x-, y-Bewegungen 50 mm x 50 mm 10 nm	
“NMM 1 – Nanopositionier- und Nanomessmaschine 1” TU Ilmenau	Anordnung: Bewegungsbereich: Reproduzierbarkeit:	seriell x-, y-, z-Bewegungen 25 mm x 25 mm x 5 mm 60 nm	
...

Analysiert man die Funktionen und Strukturen der existierenden Systeme, so können folgende Eigenschaften generell festgestellt werden:

- alle Systeme realisieren Mehrkoordinatenbewegungen zwischen einem Objekt und einem Werkzeug bzw. Messsystem
- die Bewegungen werden durch eine Regelung kontrolliert
- die extremen Genauigkeiten werden durch Präzisionsführungen mit besonderen Hilfsmitteln zur Vermeidung von störenden Einflüssen realisiert
- die Betten und Grundgestelle haben eine hohe Steifigkeit, gute Langzeitstabilität und sind auf die Minimierung von thermischen Deformationen optimiert.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen kann eine generelle Funktionsstruktur (Abbildung 2) für diesen Typ von Maschine aufgestellt werden. In Anbetracht der Aufgabe, verschiedene Funktionen aus den Anwendungsfeldern aus Tabelle 1 zu erfüllen, formt diese Funktionsstruktur eine Basis für die Entwicklung einer neuen Generation von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen. Sie soll den Nutzer mit der Realisierungstechnologie zum Messen, Prüfen, Bearbeiten etc. von Nano- und makroskopischen Objekten mit hoher Präzision ausstatten. Um diese Aufgabe realisieren zu können, muss die Konstruktion der Maschine, zusätzlich zu den verallgemeinerten Eigenschaften, folgende Hauptforderungen erfüllen:

- flexible Konfiguration im Bezug auf den benötigten technologischen Prozess
- Langzeitstabilität der Konstruktion
- gutes dynamisches Verhalten der Maschine
- Realisierung von großen Bewegungsbereichen von 200 mm x 200 mm und mehr
- hoher Gemeinsamkeitsgrad von verschiedenen Typen von Maschinen.

Unter Einhaltung der bekannten Regeln der Modularisierung [3, 4] folgt als Konsequenz der Aufbau einer Plattform, welche aus den wichtigsten Baugruppen besteht. Diese Plattform teilen sich alle Varianten.

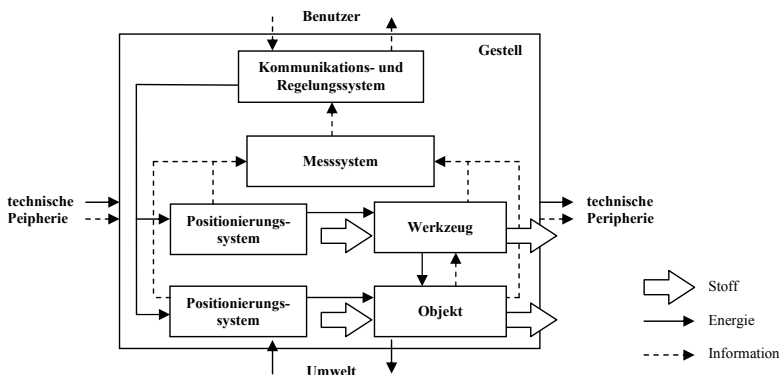


Abbildung 2 – Gesamtfunktionsstruktur

In dem dargestellten Fall (Abbildung 2) formen das Grundgestell, die Positioniersysteme, das Messsystem und das Kommunikations- und Regelungssystem die Plattformelemente. Werkzeuge und Messobjektbefestigung sogenannte Nicht-Plattformelemente, welche speziell für jeden Typ von Maschine gestaltet oder ausgewählt werden müssen. Diese Maschinen werden in geringen Stückzahlen gebaut, so dass eine funktionsorientierte Konfiguration angebracht ist.

4 Funktionsorientierte Konfiguration von Lösungsprinzipien und Erstentwurf

Die Reihenfolge der konstruktiven Tätigkeiten, welche notwendig für den Entwurfsprozess der beschriebenen Art von Maschinen sind, ist in Abbildung 3 gezeigt.

Nach der Bestimmung der Aufgabe im ersten Schritt ist es im zweiten Schritt notwendig, die technologischen Operationen, welche die Maschine ausführen muss, zu analysieren und festzulegen. Der Konstrukteur muss das Messobjekt und das Werkzeug, sowie die relativen Be-

wegungen zwischen diesen, und die Lage des Objektes bestimmen und beschreiben. Diese Untersuchung bestimmt die Gesamtfunktion der zu entwickelnden Maschine.

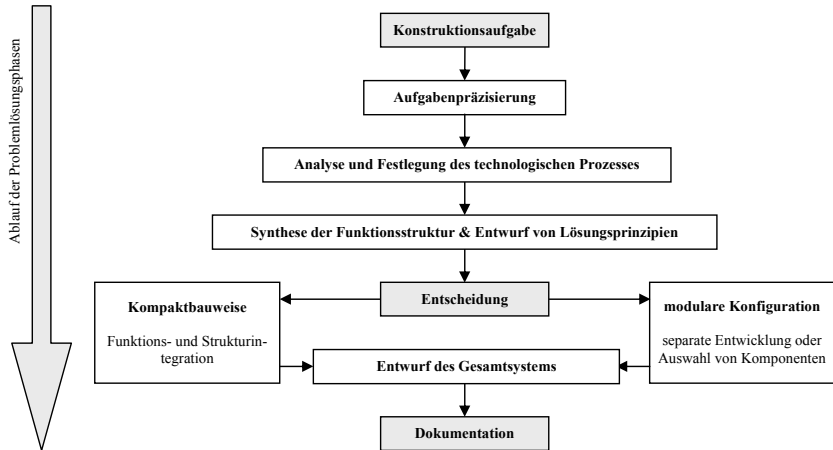


Abbildung 3 – Problemlösungsphasen während der Konstruktion

Bei dem hier dargestellten Beispiel der Wafer-Inspektion wird ein Wafer aus der Halbleiterindustrie mittels Tastspitze bzw. Cantilever untersucht. Dabei wird der Wafer unter der Spitze des Cantilevers auf einer vorgegebenen Bahn (Abbildung 4) bewegt, so dass seine Oberfläche und die sich darauf befindenden Strukturen ermittelt und vermessen werden können.

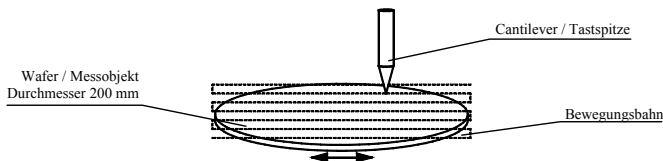


Abbildung 4 – Messung eines Wafers mittels Cantilever und Bewegungsbahn des Wafers

Der dritte Schritt ist der Entwurf der Struktur um die ermittelten Funktionen. Hier besteht die Möglichkeit, die Struktur der Maschine generativ aus den notwendigen Unterfunktionen oder durch die Reduzierung einer Maximalstruktur zu erstellen. Unter Berücksichtigung des Plattformkonzepts und der Möglichkeiten des Virtual Prototyping wird der zweite Ansatz bevorzugt. Es ist einfach, die Maximalstruktur mittels Computer abzuspeichern und darzustellen. Der Konstrukteur kann aus dieser dann die nicht benötigten Unterfunktionen eliminieren.

In Abbildung 5 ist eine Maximalfunktionsstruktur dargestellt. Sie enthält alle notwendigen Funktionen einer Positionier- und Messmaschine. Die grau hervorgehobenen Funktionen können für die Aufgabe der Wafer-Inspektion eliminiert werden, da sich das Werkzeug nicht bewegen muss. Dadurch entsteht eine spezielle Funktionsstruktur für einen Anwendungsfall, welche nur noch benötigte Funktionselemente enthält. Diese Vorgehensweise kann auf jeden beliebigen Anwendungsfall angewendet werden und ermöglicht somit ein systematisches Vorgehen bei dem Entwurf und der Konfiguration einer Positionier- und Messmaschine.

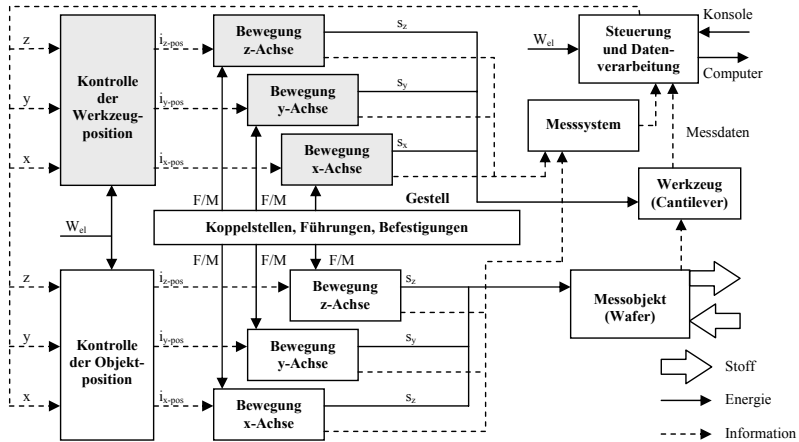


Abbildung 5 – Maximalfunktionsstruktur einer Nanopositionier- und Nanomessmaschine

Die Auswahl einer geeigneten Unterfunktion kann durch einen Entscheidungsbaum unterstützt werden. In Abbildung 6 ist dieser am Beispiel der Werkzeug- bzw. Objektbewegung dargestellt. Der hervorgehobene Pfad entspricht dabei der aktuellen Entscheidung.

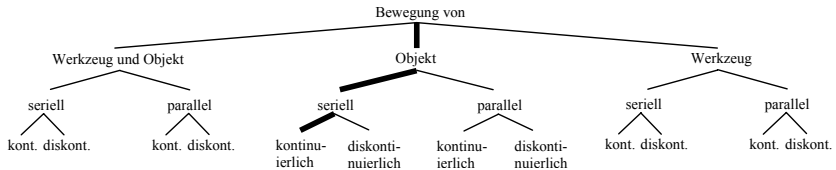


Abbildung 6 – Entscheidungsbaum für die Bewegungen von Werkzeug und Objekt

In dem dargestellten und untersuchten Fall der Wafer-Inspektion kann eine hohe Genauigkeit der Maschine erreicht werden, wenn das Messsystem bzw. das Werkzeug fest steht und das zu messende Objekt in drei Koordinaten bewegt wird. Dabei wird eine serielle Anordnung der Bewegungsachsen verwendet. Das Abbe-Prinzip wird hier durch eine spezielle Anordnung der Messsysteme für alle drei Koordinaten erfüllt (Abbildung 7).

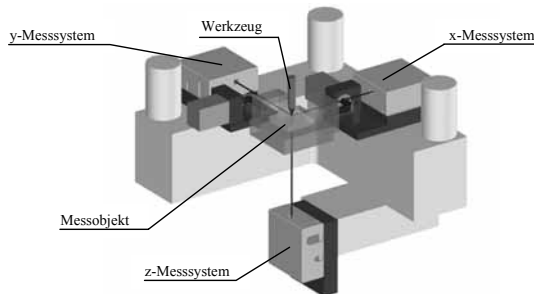

















Abbildung 7 – Anordnung von Messobjekt, Werkzeug und Messsystemen

Die festgelegte Funktionsstruktur und die Beschreibung der Bewegung sind die Grundlage für die funktionsorientierte Konfiguration der Maschine. Tabelle 3 enthält exemplarisch verschiedene Lösungsprinzipie für einzelne Plattformkomponenten. Diese Matrix kann beliebig erweitert werden, um neue potentielle Lösungen zu integrieren.

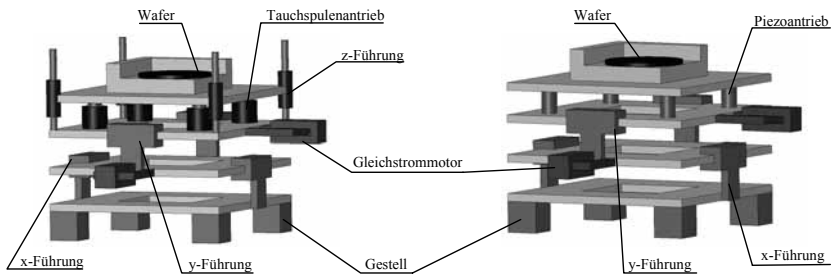
Tabelle 3 – Konfigurationsmatrix für Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Baugruppe	Varianten					
	1.1 Säulentyp	1.2 Portaltyp	1.3 Ständertyp	1.4 Konsolentyp	1.5 Brückentyp	
Gestell						...
Führung	2.1 Wälzführung 	2.2 Gleitführung 	2.3 aerostatische Führung 	2.4 magnetische Führung 	2.5 Federführung 	...
Antrieb	3.1 Tauchspulenantrieb 	3.2 Piezoantrieb 	3.3 Reibradantrieb 	3.4 Spindeltrieb 	3.5 linearer Schrittmotor 	...
Werkzeug	4.1 Atomkraftmikroskop	4.2 scannendes Tunnelmikroskop	4.3 Elektronenstrahl	4.4 Laserstrahl	4.5 Tastspitze / Cantilever	...
Messsystem	5.1 Interferometer	5.2 inkremental optisch	5.3 induktiv	5.4 kapazitiv	5.5 inkremental induktiv	...
...

5 Virtual Prototyping in den wichtigen Konstruktionsschritten

Der komplette Entwurf der Maschine wird als virtueller Prototyp durch Kombination ausgewählter Komponenten realisiert. Dadurch entsteht eine Zahl unterschiedlicher Varianten.

Zwei Beispiele der Positionierbaugruppe für die beschriebene Aufgabe der Wafer-Inspektion sind in Abbildung 8 dargestellt. Sie wurden aus den Varianten 2.1, 3.1 und 3.2 zusammen mit einem Cantilever (4.5) und einem Koordinatenmesssystem, bestehend aus drei Interferometern (5.1), aufgebaut.



Variante a) mit größerem Bewegungsbereich (10 mm)

Variante b) mit kleinerem Bewegungsbereich (10 µm)

Abbildung 8 – Varianten von 3 Koordinatenpositionierbaugruppen (Prinzip)

Die Analyse und Bestätigung der Leistung, Genauigkeit und anderer Eigenschaften der konfigurierten Maschinenvarianten werden durch das Virtual Prototyping unterstützt. Die Methode des Virtual Prototyping [5, 6] wird dabei benutzt, um zu kontrollieren, dass die einzelnen Funktionen erfüllt sind und dass der Gesamtaufbau fehlerfrei ist. Hier kommen unterschiedli-

che Werkzeuge, wie zum Beispiel Constraint Solver, MKS- und FEM-Programme, zum Einsatz [7, 8, 9].

Es ist ebenfalls notwendig, Abschätzungen zu treffen, welche Toleranzen und Fehler in den konstruierten Modulen und dem Gesamtsystem auftreten können. Diese können dann, wo dies möglich ist, durch Regelungs- oder Kompensationsmechanismen minimiert werden.

Bei dem betrachteten Beispiel der Wafer-Inspektion mittels Nanopositionier- und Nanomessmaschine kommen verschiedene Programme zum Einsatz. In den frühen Entwurfsphasen, zum Beispiel beim Erstellen des technischen Prinzips, steht der an der TU Ilmenau entwickelte Constraint Solver MASP zur Verfügung (Abbildung 9). Mit ihm können Bewegungsabläufe, auftretende Geschwindigkeiten und Beschleunigungen simuliert werden. Zudem ist es möglich, Aussagen zu treffen, inwieweit Toleranzen der einzelnen Glieder die Funktion beeinflussen.

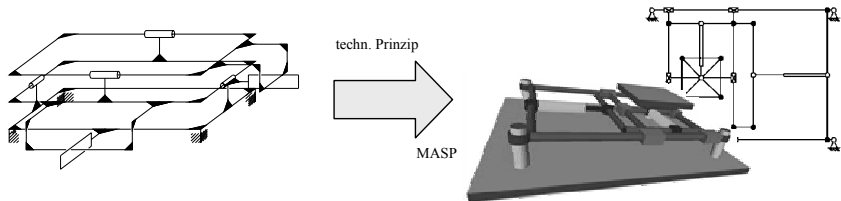


Abbildung 9 – Unterstützung der frühen Entwurfsphasen durch einen Constraint-Solver

Bei der Konstruktion der Teile und Baugruppen werden aktuelle 3D-CAD-Programme, wie zum Beispiel SolidWorks, genutzt. Durch eine Integration der FEM-Software in diese, hier zum Beispiel CosmosWorks, können bereits während der Konstruktionsphase verschiedene Simulationen leicht durchgeführt werden (Abbildung 10). Somit kann die Konstruktion vor den ersten physischen Prototypen besser - hinsichtlich verschiedener Kriterien wie Verformungen oder Spannungen - kontrolliert und optimiert werden.

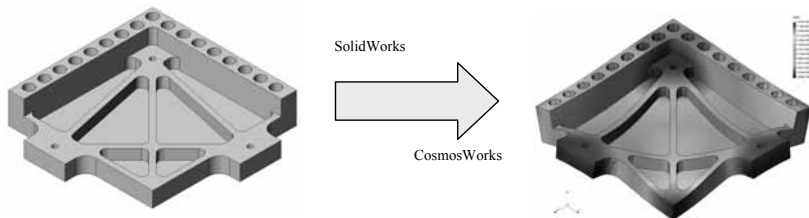


Abbildung 10 – Simulation des CAD-Modells mittels FEM-Programm

Der Einsatz von 3D-CAD-Programmen erleichtert zudem den Einsatz von MKS-Software. In diesen CAD-Programmen können die Massen, Massenschwerpunkte und Trägheitsmomente von Bauteilen und Baugruppen sofort ermittelt werden. Dadurch lassen sich Simulationen über das dynamische Verhalten von ganzen Baugruppen schneller durchführen (Abbildung 11). Die gewonnenen Ergebnisse fließen dem entsprechend zeitiger in den Entwurfsprozess ein und ermöglichen so eine Einschätzung und Verbesserung des Entwurfs bereits in frühen Phasen der Konstruktion.

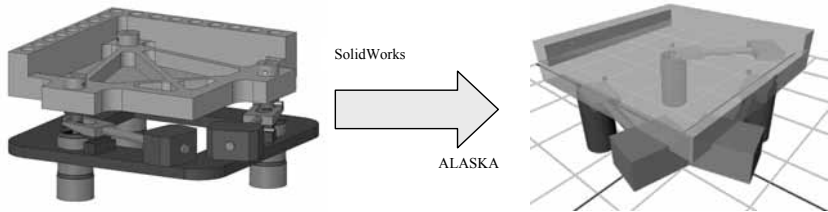


Abbildung 11 – Simulation des CAD-Modells mittels MKS-Programm

Neben der Ermittlung und Simulation von Eigenschaften der zukünftigen Maschine ist deren Visualisierung ebenfalls von großem Interesse. Durch den Einsatz aktueller 3D-CAD-Software können bereits während der Konstruktion recht realistische virtuelle Prototypen erstellt werden. Diese können als Grundlage für Modelle der Virtual Reality dienen. Bei diesen besteht das Ziel, die Wirklichkeit möglichst exakt nachzubilden, um zum Beispiel Kollisionsprobleme in der Maschine feststellen zu können (Abbildung 12). Sie dienen aber auch dazu, potentiellen Kunden ein Produkt und dessen Eigenschaften ohne physischen Prototypen vorzustellen.

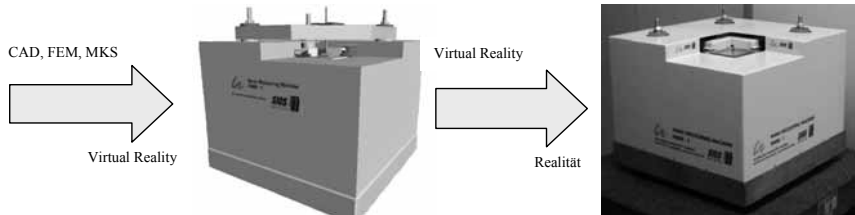


Abbildung 12 – Visualisierung des Prototypen mittels Virtual Reality und Foto

Durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen ab dem Stadium der Prinziplösungen und des Grobentwurfs ist es möglich, aussagekräftige Entscheidungen über die optimale Konstruktion bereits in frühen Phasen zu treffen.

6 Zusammenfassung

Im Beitrag werden ein Plan und erste innovative Ergebnisse zur Entwicklung einer neuen Generation von Positionier- und Messmaschinen mit extremer Genauigkeit vorgestellt. Durch Modularisierung der Struktur des Produktes kann die Konstruktion der Maschine einem sehr großen Bereich von Anwendungsfeldern zur Verfügung gestellt werden. Es ist offensichtlich, dass die Parameter bereits in den frühesten Entwicklungsstadien gesetzt werden müssen. Hierfür leisten die Methode des Virtual Prototyping und der Einsatz von Simulationswerkzeugen einen wesentlichen Beitrag für eine verbesserte Entwicklung. Um ihn bei der komplexen Aufgabe der Konstruktion zu unterstützen, wird der Konstrukteur ausgestattet mit:

- einem Modulkonzept, auf welchem die Konstruktion aufbaut
- einem Plan der Konstruktionsschritte der Maschine
- einer Matrix der Module, welche in der Maschine eingesetzt werden können, das heißt für eine Anzahl von virtuellen Prototypen
- eine Liste von verschiedenen Regelungs-, Simulations- und Bewertungsmöglichkeiten.

Danksagung

Die Autoren möchten der Deutschen Forschungsgemeinschaft und den Mitgliedern des Sonderforschungsbereiches 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“ an der Technischen Universität Ilmenau für ihre Unterstützung danken.

Literatur

- [1] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T., “Nanopositioning and measuring machine”, Proceedings of EUSPEN 2001, Vol. 1, Turin, 2001, pp.290-293.
- [2] Hausotte, T., “Nanopositionier- und Nanomessmaschine”, Dissertation, Isle, Ilmenau, 2002.
- [3] Hofer, A. P.; Gruenenfelder, M., “Product family management based on platform concepts”, Proceedings of ICED '01, Vol. 3, Glasgow, 2001, pp.C586/631.
- [4] Aarnio, J. P.; Riitahuhta, A. O., “Modularisation by integration (MBI) a means to modularise a mechatronics product”, Proceedings of NordDesign 2002, Trondheim, 2002, pp.1-8.
- [5] Spur, G.; Krause, F.-L., “Das virtuelle Produkt: Management der CAD Technik”, Hanser, München, 1997.
- [6] Kunz, A.; Meier, M., “Innovation at the digital product - the use of virtual product development process”, Proceedings of ICED '01, Vol. 1, Glasgow, 2001, pp.693-700.
- [7] Brix, T.; Brüderlin, B.; Döring, U.; Höhne, G., “Feature- and constraint-based design of solution principles”, Proceedings of ICED '01, Vol. 1, Glasgow, 2001, pp.613-6200.
- [8] Brix, T.; Döring, U.; Reefing N., “Multi-stage modeling in early phases of design”, Proceedings of ICED '03, Stockholm, 2003.
- [9] Hochmuth, R.; Meerkamm, H., “Approach to evaluate the precision of technical systems”, Proceedings of ICED '01, Vol. 3, Glasgow, 2001, pp.C586/031.

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Günter HÖHNE
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Konstruktionstechnik
98684 Ilmenau
e-Mail: guenter.hoehne@tu-ilmenau.de

Dipl.-Ing. Markus LOTZ
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Konstruktionstechnik
98684 Ilmenau
e-Mail: markus.lotz@tu-ilmenau.de

Diskussion

Prof. Klöcker

Sie haben dort als Schema eine Reihenschaltung der Freiheitsgrade gewählt. Das ist doch recht problematisch, zum Beispiel was Toleranzen anbetrifft. Wäre eine Parallelkinematik nicht interessanter gewesen?

DI Lotz

Es gibt ja zwei Randbedingungen. Zum einen müssen wir versuchen, den Bauraum möglichst klein zu halten für eine solche Maschine und auf der anderen Seite muss die Genauigkeit so hoch wie möglich sein. Wir untersuchen auch Parallelkinematiken, die für die X-Y-Ebene in Frage kommen. Für die Z-Achse ist dies schon schwieriger, so dass wir diese auf die X-Y-Ebene aufsetzen müssen. Aber wir versuchen es auch.

Prof. Klöcker

Ich dachte da an die Berücksichtigung irgendwelcher Bodenstrukturen.

DI Lotz

Ja, die haben natürlich auch Probleme durch die Gelenkstrukturen. Die Gelenke müssen spielfrei und sehr steif sein. Und dann ist die Regelung solcher Systeme aufwendiger.

Prof. Höhne

Noch eine zusätzliche Bemerkung. Es sind verspannte Wälzführungen, Kugelbuchsen, eingebaut, die man sehr genau als Führungszylinder nutzen kann. Es ist uns klar, dass diese Stapelbauweise auch Kippfehler hervorrufen kann, die nicht unerheblich sind. Diese Fehler werden kompensiert durch den Z-Antrieb. Die Verkippung der Spiegelecke, die das Objekt trägt, wird ständig gemessen. Neben den Interferometern, die hier gezeigt wurden, ist ein zweiter Sensor angebracht, der im Sekundenbereich die Verkippungen, die durch die Führungsfeder zustande kommen, misst. Drei Antriebe in Z-Richtung dienen zur Fehlerkorrektur der x-y-Führungen. Das wird als Regelkreis aufgebaut, der diese Führungsfehler kompensiert. Der Grund für eine Reihenschaltung war die Ankoppelung der Antriebe. Natürlich ist uns klar, dass wir für die X-Y-Bewegungen auch einen Tisch auf einem Luftlager verwenden könnten, aber dabei sind die Störungen, die Schwingungsanfälligkeit im Nanometerbereich, zu groß. Das sind einige Regeln, die wir aus der Feinwerktechnik kennen. Die Maschine besitzt eine hohe Temperaturempfindlichkeit. Wenn Temperaturänderungen vorliegen, ist das Problem, diese Störgrößen zu beheben. Parallelstrukturen sind in Arbeit, wir wissen aber noch nicht, ob sie für diese Anwendung ausreichend sind.

Prof. Lüpfert

Die Durchmesser der Waver verändern sich ja nach oben und deshalb die Frage: Inwieweit wird die Maschine erweiterbar sein in Bezug auf größere Waver, da die verwendeten 200 mm nicht mehr ganz der Stand der Technik sind?

Prof. Höhne

Die Erweiterung von 200 mm auf 300 mm ist sicherlich einfacher zu realisieren als der Sprung von 25 auf 200 mm. Es wurde auch heute schon nach „routemaps“ gefragt. Wir haben uns auch an solchen „routemaps“ für die Mikroelektronik. Danach benötigen wir diese Größen in den Jahren 2010/11 auch bezüglich der Strukturen, vielleicht auch schon eher. Aber es ist auch eine Kostenfrage. Die großen Rahmen, die die Messsysteme tragen, sind sehr kostenintensiv. Dieses ist dann ein Zwischenschritt, über den wir uns schon mit Partnern verständigt

haben. Es ist klar, dass wir auf die 300 mm müssen, wobei das Endziel 500 mm sind. Aber dafür sind noch ca. 6 bis 7 Jahre Entwicklungszeit nötig.

Wissensmodellierung als Basis für "Rule Driven Design"- ein Prototyp für den Einsatz in der schiffbaulichen Unikat- entwicklung

Robert BRONSART, Ulf CANTOW, Ventzeslav PETKOV

Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik, Universität Rostock

Zusammenfassung

Ein Modell für die Abbildung von Regeln und auf diesen aufbauenden Vorschriften sowie deren Implementierung wird als Basis für ein Wissensbasiertes System vorgestellt. Die Darstellung des Modells eines generischen Produktes und der generisch formulierten Regeln erfolgt unter Einsatz der Modellierungssprache EXPRESS. Die Möglichkeiten zur Anwendung im Entwurfs- und Konstruktionsprozess werden untersucht. Zwei Anwendungsfälle: Regeldefinition und Regelbenutzung werden diskutiert. Die Implementierung und Anwendung werden anhand eines Prototyps des Regelmanagementsystems demonstriert. Es wird gezeigt, wie der Entwicklungsprozess durch die Einbindung von definierten Regeln in CAE-Systeme unterstützt werden kann.

Abstract

A data model for technical rules and regulations and its implementation in a knowledge base system is presented. The data definition language EXPRESS is chosen to define a generic model for technical rules and products. A semiautomatic translation of existing rule definitions as well as product model schema forms the basis for an operating system independent implementation. Two use-cases: rule definition and rule utilization are discussed. A prototype of a rule management information system serves to demonstrate the use cases. The usage of defined technical rules in the design process through integration in CAE/CAD systems is outlined.

Keywords

Rule Driven Design, Knowledge Modelling, Product Modelling, Rule Evaluation

1 Einleitung

Beim Entwurf und der Konstruktion von maschinenbaulichen Komponenten hat der Konstrukteur in immer größer werdendem Umfang verschiedenste technische Regelwerke zu berücksichtigen. Im besonderen Maße gilt dies bei komplexen Produkten wie z.B. Schiffen. Hier sind internationale Vorschriften (IMO¹), Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften (z.B. GL², DNV³, ABS⁴), nationale Vorschriften (SBG⁵), allgemeine Vorschriften und Normen (ISO, DIN) und natürlich die Spezifikationen der Reeder zu beachten.

¹ IMO - International Maritime Organization

² GL - Germanischer Lloyd; DNV - Det Norske Veritas; ABS - American Bureau of Shipping

³ Det Norske Veritas

⁴ American Bureau of Shipping

⁵ SBG - See Berufsgenossenschaft

Die heutige Situation ist dadurch gekennzeichnet, dass der Entwurfs- und Konstruktionsprozess durch eine Vielzahl von rechnerbasierten Werkzeugen unterstützt wird. Die Überprüfung der Konstruktionen auf Einhaltung der anzuwendenden Bauvorschriften geschieht meist im Nachhinein und nicht während der Entwurfs- / Konstruktionsphase durch die verwendeten CAD-Werkzeuge [1].

In diesem Artikel wird ein Ansatz vorgestellt, den Dimensionierungsprozess rechnerbasiert zu unterstützen. Im Dimensionierungsprozess erfolgt das Festlegen von optimalen Produktparametern. Diese sollen als optimal angesehen werden, wenn ihr Wert in einem Wertebereich liegt, der durch die einzuhaltenden Regeln festgelegt wird. Die Unterstützung des Konstrukteurs soll einerseits durch die Vorgabe von Wertebereichen der Parameterwerte erfolgen, andererseits soll es auch möglich sein, sich gezielt über den Inhalt der Vorschriften zu informieren.

Durch die rechnerbasierte Verarbeitung von Regeln ergeben sich zukünftig neue Möglichkeiten im Umgang mit Regelwerken. Ausgehend vom derzeitigen Stand der Technik wird ein Datenmodell zur Formalisierung von Regelwerken entwickelt. Es bildet die Grundlage um eine rechnerbasierte Verarbeitung durch ein Regelinformationssystem zu ermöglichen. Damit können Funktionalitäten zur effizienten Navigation in Regelwerken und zum Dimensionieren von Produkten anhand von Regelwerken zur Verfügung gestellt werden.

2 Modellierung von Regelwerken

Regelwerke besitzen einen logischen Aufbau und können nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden. Dabei unterscheidet man die Darstellung einer Regel und den rechnergestützt interpretierbaren Inhalt einer Regel.

Die hier zu beachtenden Bauvorschriften sind an Produkte gebunden. Eine Regel kann dadurch nicht losgelöst vom Produkt, für das sie gültig ist, betrachtet werden. Damit ist die Formalisierung eines Produkts aus Sicht der Bauvorschriften verbunden.

2.1 Struktur einer Bauvorschrift

Die Darstellung von technischen Bauvorschriften erfolgt derzeit in Form von Büchern, die gedruckt oder elektronisch veröffentlicht werden.

Die Bestandteile der Bauvorschriften sind Regeln. Diese Regeln werden durch Unterteilungen (z.B. Band, Kapitel, Abschnitt) zusammengefasst. Auf diese Weise entsteht die Struktur einer Bauvorschrift, welche z.B. durch ein alphanumerisches Codierungsprinzip beschrieben wird. Diese Struktur ist eine Baumstruktur bei der die Unterteilungen als Knoten und die Regeln als Endknoten (Blätter) angesehen werden können. Die Verknüpfung der Knoten erfolgt durch Kanten (Zweige).

Die Modellierung muss nicht nur allein die Abbildung der o.g. Baumstruktur (Gliederungsstruktur) beinhalten, sondern auch die Repräsentation (Darstellung der Regeln und Regelmodule) abbilden.

Regelmodell (Struktur und Repräsentation)

In Abbildung 1 ist das modellierte Regelobjekt mit Hilfe der EXPRESS-G [7] Syntax dargestellt.

Das `Rule_object` ist der abstrakte Supertype einer Regel (`Engineering_rule`) oder eines Regelmoduls (`Engineering_rule_module`). Es wird die Hierarchie und die textliche Darstellung der Regelobjekte modelliert. Dieses Modellkonstrukt wird eingesetzt um eine Struktur und die Visualisierung der Bauvorschriften selbst abzubilden.

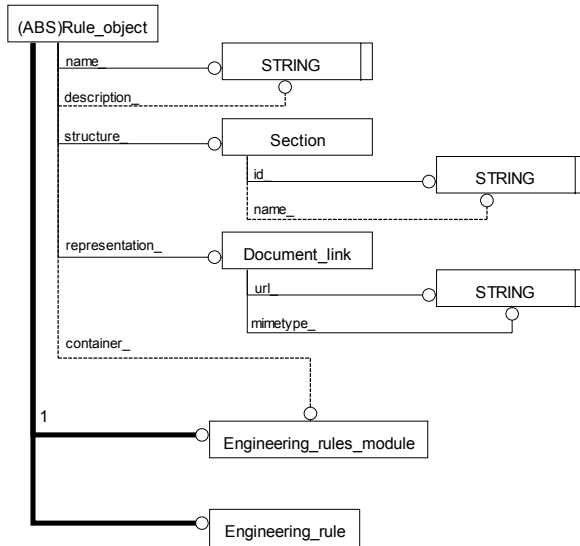


Abbildung 1: Rule_object (EXPRESS-G)

Die Attribute bedeuten:

- `name_`, `description_`: Name und Beschreibung in Form von Text. Hier wird der Name der Regel oder des Regelmoduls angegeben. Optional kann eine Beschreibung hinzugefügt werden.
- `structure_` dient zur Abbildung der Strukturebenenbezeichnung des Regelobjektes. `Section` bildet die alphanumerische Codierung der Bauvorschriften ab. Soll z.B. „Kapitel 1“ instanziiert werden erhält `id_` den Wert „1“ und `name_` den Wert „Kapitel“. Die Angabe von `name_` ist hier optional.
- `representation_` wird zur textlichen Anzeige des Regelobjektes benötigt, es wird auf ein Dokument über `Document_link` verwiesen. Es beinhaltet eine URL (`url_`) und einen Typ (`mimetype_`). Die Implementierung nutzt diese Informationen um den Inhalt einer Regel mit den jeweils erforderlichen Programmen anzuzeigen.
- `container_` ist ein optionales Attribut zur Modellierung der Struktur der Regelobjekte. Hiermit kann modelliert werden, dass ein Regelmodul aus Regeln und Regelmodulen bestehen kann. Es ist in der Implementierung sicherzustellen, dass keine Referenz auf dieselbe Instanz vom Typ `Engineering_rule_module` erfolgt (Konsistenzbedingung um eine Hierarchie und nicht ein Netzwerk zu modellieren).

2.2 Rechnergestützt interpretierbarer Inhalt einer Regel

Parameter einer Regel

Häufig wird innerhalb der Abarbeitung von Regeln mit Zwischenwerten gerechnet. Dazu ist es notwendig die erforderlichen Regelparameter zu definieren. Dies erfolgt in der Form, dass einem

Parameter ein logischer oder arithmetischer Ausdruck zugewiesen wird. Dementsprechend unterscheidet man arithmetische und logische Zuweisung.

Unter einem Ausdruck soll ein von einem Interpreter auswertbares Script verstanden werden. Die Syntax des Scripts wird durch den verwendeten Interpreter bestimmt. In einem Script können Variablen verwendet werden. Diese werden entweder direkt durch einen Wert oder ebenfalls durch ein Script definiert. Je nachdem wie der berechnete Wert des Scripts interpretiert wird kann ebenfalls zwischen logischen und arithmetischen Ausdrücken unterschieden werden.

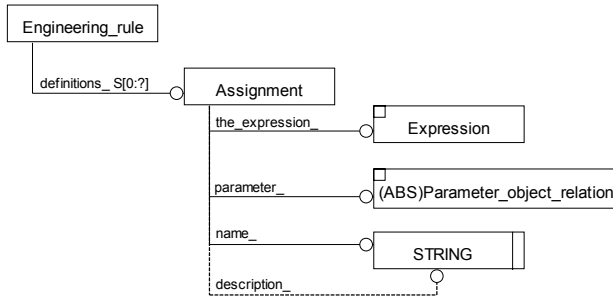


Abbildung 2: Entity Engineering_rule, Ausschnitt Assignment (EXPRESS-G)

Die Modellierung von Regelparametern erfolgt durch das Attribut `definitions_`. Die Einträge dieser Menge zeigen auf eine Zuweisung (`Assignment`), durch die ein Regelparameter mit einem Ausdruck verknüpft wird.

`Assignment` dient dazu, um einem Parameter einen Ausdruck zuzuweisen. Es besitzt die folgenden Attribute:

- `the_expression_`: Hier wird der Ausdruck (`Expression`) angegeben, der dem Parameter zugewiesen werden soll.
- `parameter_`: Hier wird der Parameter angegeben dem der Ausdruck zugewiesen werden soll. `Parameter_object_relation` ist der abstrakte Supertype eines `Ruleobject_parameter` (Datenmodell eines Regelparameters).
- `name_`, `description_`: Name und Beschreibung des Regelparameters in Form von Text.

Gültigkeitsbereich einer Regel

Um die Gültigkeit einer Regel festzulegen reicht es oft nicht aus, diese an ein einzelnes Produkt zu binden. In vielen Fällen ist es von Bedeutung, welche Relationen ein Produkt zu einem anderen Produkt hat. Dies ist der *Produktkontext*. Hieraus folgt ein wichtiger Modellieransatz:

Die Gültigkeit einer Regel wird nicht durch ein Produkt, sondern einen Produktkontext festgelegt.

Die Modellierung des Gültigkeitsbereiches einer Regel erfolgt durch das Attribut `valid_for_`. In dieser Menge wird die Gültigkeit einer Regel festgelegt. Die Einträge zeigen auf einen Produktkontext.

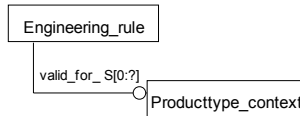


Abbildung 3: Entity Engineering_rule, Ausschnitt Producttype_context (EXPRESS-G)

Producttype_context ist die allgemeine Modellierung, in welcher Beziehung ein Produkt zu anderen Produkten steht. Durch die Möglichkeit der Instanzierung der Produktrelationen ist der Aufbau von Beziehungsnetzen möglich. Der Producttype_context gibt an, in welchem Zusammenhang, in welchem Kontext ein Produkttyp betrachtet werden soll. *Es wird der Pfad zu einem Producttype beschrieben.*

Interpretierbarer Inhalt einer Regel

In technischen Bauvorschriften wird oft die Einhaltung von Grenzwerten verlangt. Es wird ein Ist-Wert (ein Produktparameter) mit einem Soll-Wert (der Bauvorschrift) verglichen.

Nach Jensen [5] kann eine Regel durch die Boolesche Algebra formalisiert werden. Sie wird als logische Aussage betrachtet, die wahr ist, wenn die Regel erfüllt ist. Eine Regel (R) wird angewendet auf ein Produkt (P). Für dieses Produkt muss, unter Einhaltung einer Voraussetzung V(P) eine Bedingung B(P) erfüllt werden.

Damit kann das Ergebnis einer Regel durch die Verknüpfung logischer Aussagen durch die Implikation berechnet werden:

$$R(P) = V(P) \Rightarrow B(P)$$

mit der Bedeutung:

WENN die Voraussetzung erfüllt (wahr) ist, DANN muss auch die Bedingung erfüllt werden.

Eine Regel ist für ein Produkt nicht erfüllt, wenn die Voraussetzung erfüllt ist und die Bedingung nicht. In allen anderen Fällen ist die Regel erfüllt.

Die Modellierung des interpretierbaren Inhalts einer Regel erfolgt durch das Attribut criteria_. In dieser Menge ist die Regelfunktion modelliert. Die Einträge zeigen auf ein Criterion. Ein Criterion entspricht der Abbildung einer WENN – DANN Regel womit die Voraussetzung und die Bedingung angegeben werden.

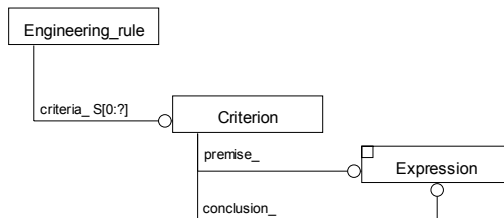


Abbildung 4: Entity Engineering_rule, Ausschnitt Criterion (EXPRESS-G)

Die Angabe der Voraussetzung (Attribut `premise_`) und der Bedingung (Attribut `conclusion_`) erfolgt als logischer Ausdruck woraus folgt, dass hier der Rückgabetyper der Expression vom Typ „boolean“ ist.

Regeln mit nicht interpretierbarem Inhalt

Die Komplexität der heutigen Produkte, deren schnelle Entwicklung und der Grad der Innovationen machen es unmöglich, für alle existierenden Bauarten Regeln zu formulieren. Darüber hinaus gibt es Aspekte die keiner quantitativen Darstellung unterliegen. In diesen Fällen handelt es sich um Regeln, die einen hinweisenden Charakter haben und nicht konkrete Berechnungsverfahren repräsentieren bzw. auf Berechnungsmethoden (FEM, CFD, ...) verweisen. Diese Regeln oder entsprechende Teile einer Regel werden `Advice` genannt. Sie werden durch das Modell dem Produkt bzw. dem Kontext zugewiesen und können damit dem Anwender angezeigt werden.

3 Implementierungsmethoden

Während der Entwurfs- und Konstruktionsphase soll der Konstrukteur durch ein Regelinformationssystem unterstützt werden. Das Prüfen und Dimensionieren von Produktparametern soll erleichtert werden. Weiterhin soll ein schneller Überblick über die für das jeweilige Produkt in dem spezifizierten Kontext zu beachtenden Regeln möglich sein.

3.1 Hauptfunktionen der rechnerbasierten Verarbeitung

Für die rechnerbasierte Verarbeitung von Bauvorschriften ergeben sich damit vier wesentliche Hauptfunktionen, die von dem Regelinformationssystem zur Verfügung gestellt werden müssen.

- *Relevanz*: Sind die Regeln anwendbar?

Als Ergebnis der Funktion *Relevanz* sind alle auf ein Produkt anzuwendenden Regeln eines Regelwerkes bekannt. Die Funktionen *Prüfen*, *Inhalt* und *Dimensionieren* benötigen diese Funktion zur Selektion der abzuarbeitenden Regeln.

- *Prüfen*: Sind die relevanten Regeln erfüllt?

Die relevanten Regeln werden mit der Funktion *Relevanz* ermittelt. Danach erfolgt die Abarbeitung der Regeln. Als Ergebnis steht fest, welche Regeln erfüllt werden und welche nicht.

- *Inhalt*: Anzeige der relevanten Regeln.

Um sich über den Inhalt von Regelwerken zu informieren, wird diese Funktion benutzt. Als Ergebnis wird der Zugriff auf die relevanten Regeln für die Anzeige ermöglicht. Die Verwendung dieser Funktion wird sich größtenteils auf die Implementierung von Hilfe- bzw. Informationssystemen beschränken.

- *Dimensionierung*: Hierbei sollen Daten so bestimmt werden, dass die relevanten Regeln erfüllt sind.

Die Unterstützung des Dimensionierungsprozesses erfolgt derart, dass Produktparameter aufgezeigt werden, die nicht mit den gültigen Regeln übereinstimmen. Die Änderung dieser Parameterwerte führt zur einer Regelkonformität des Produktes.

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Berechnung unbekannter Produktparameter. Dazu werden die relevanten Regeln ermittelt. Hierbei ist besonders zu beachten, dass bei der Abarbeitung der Regeln ggf. weitere unbekannte Produktparameter gefunden werden wodurch der zu bearbeitende Regelraum schnell groß werden kann und deadlocks vermieden werden müssen. Für die unbekanntenen Produktdaten sollen vom System Vorschläge gemacht werden, in der Form, dass alle relevanten Regeln erfüllt werden. Beispiele für solche Vorschläge könnten

sein: Dicke des Bauteils > 100 mm oder Zugfestigkeit des eingesetzten Werkstoffes $300..600$ N/mm².

Im besonderen Maße ist die Funktion *Dimensionierung* ein komplizierter und mit vielseitigen Interaktionen versehener Prozess. Die Auswahl und die Auswertung der Regeln hat vielfach einen rekursiven Charakter, s.o. Dies ist von vornherein bei der Abbildung der Regelwerke zu beachten.

3.2 Wissensbasierte Systeme

Die Theorie der Künstlichen Intelligenz (KI) kennt seit langer Zeit Konstruktionen wie die oben eingeführte Form der Regel: „Wenn ..., dann ...“. Diese Form wird am meisten benutzt um Wissen in sogenannten Wissensbasierten Systemen darzustellen. Das vorgestellte Datenmodell dient als Grundlage für die Entwicklung eines wissensbasierten Regelinformationssystems.

Ein wissensbasiertes System ist ein Softwaresystem, in welchem die Lösung des Problems von den üblichen Kontrollstrukturen der Programmiersprache getrennt ist. Ein solches System besteht aus zwei Hauptkomponenten: Wissensbasis und Inferenzkomponente. Die Wissensbasis enthält extensionales Wissen (Fakten) und intensionales Wissen (z.B. Regeln). Die Inferenzkomponente leitet aus bereits vorhandenem Wissen „neues“ Wissen ab. Klassische Systeme speichern das „neu“ abgeleitete Wissen wieder in die Wissensbasis. Diese Möglichkeit zum Prüfen und Dimensionieren ist in einem Informationssystem zur Anwendung technischer Regeln jedoch nicht von Bedeutung. Anwendungsgebiete können Erzeugung und Pflege der Regeln sein. Der Vorteil der Implementierung als wissensbasiertes System liegt darin, dass es möglich ist, Regeln zu erzeugen und zu editieren, ohne dass das System neu programmiert werden muss.

4 Integrationsmöglichkeiten

4.1 Systemarchitektur

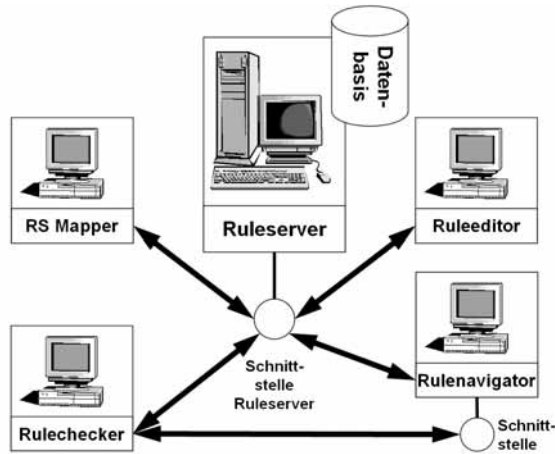


Abbildung 5. Systemarchitektur des Informationssystems

In der **Abbildung 5** ist die Systemarchitektur skizziert. Im Mittelpunkt steht das Regelinformationssystem (*RuleServer*). Es verfügt über eine Datenbasis zur Verwaltung der formalisierten Regelwerke. Über die Schnittstelle des *RuleServer*'s werden Funktionen zur Datenverwaltung (Erzeugen, Editieren), und zur Datennutzung (Navigation, Dimensionieren) zur Verfügung gestellt. Die Clientanwendungen verwenden diese Schnittstelle:

- Die Anbindung an externe Daten erfolgt mit dem *RS Mapper*. Diese Anwendung dient dem Übertragen der Regeln und der Produktmodelle in die generisch formulierte Datenbasis des *RuleServer*'s.
- Mit dem *RuleEditor* erfolgt die Bearbeitung der Regelinstanzen des Informationsmodells.
- Der *RuleNavigator* ermöglicht das Navigieren in den Regelwerken. Es werden unterschiedliche Filtermechanismen zur Verfügung gestellt. Der *RuleNavigator* verfügt ebenfalls über eine Schnittstelle, womit er von anderen Anwendungen (hier *RuleChecker*) direkt gesteuert werden kann.
- Das Überprüfen von Produkten auf Regelkonformität erfolgt mit dem *RuleChecker*. Dazu ist das Einlesen von Produktdatenmodellen implementiert. Nachdem ein Produkt überprüft wurde wird ein Prüfbericht erstellt. Die Schnittstelle des *RuleNavigator*'s wird benutzt, um sich über die für das Produkt gültigen Regeln zu informieren.

4.2 Überprüfung eines Produktes

Das Überprüfen eines Produktes erfolgt mit dem Programm *RuleChecker*. Diese Anwendung ist in der Lage, Produktbeschreibungen aus einer Datei einzulesen und zu überprüfen. Zum Überprüfen werden die Schnittstellenfunktionen des *RuleServers* genutzt. Zum Einlesen der Produkte verfügt der *RuleChecker* über eine eigene Schnittstelle.

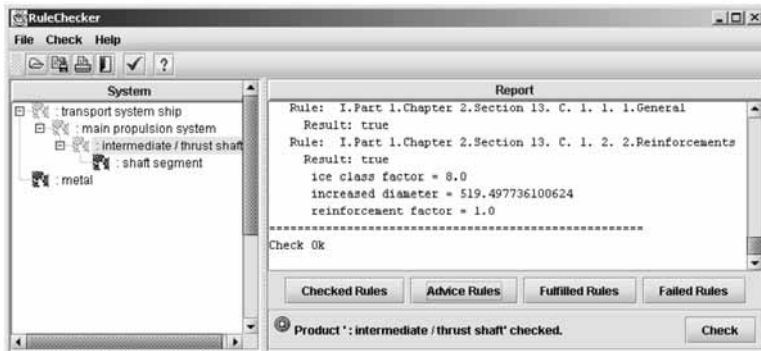


Abbildung 6: GUI des RuleCheckers

Das Hauptfenster dieser Anwendung besteht aus zwei Bereichen, siehe Abbildung 6. Auf der linken Seite wird die Produktstruktur der eingelesenen Produkte als Baum dargestellt. Auf der rechten Seite befindet sich die Darstellung des Prüfberichtes.

Abbildung 7 zeigt die Prototypimplementierung des *RuleNavigator*. Dieser verfügt über eine Schnittstelle, die der *RuleChecker* nutzt um die entsprechenden Regeln anzuzeigen. Auf der

linken Seite befinden sich die Fenster „RuleBook“ und „Rules for“. „Rule Book“ zeigt die Struktur der auf dem Server vorhandenen Regeln. Die Darstellung der in diesem Fenster ausgewählten Regeln erfolgt auf der rechten Seite. In „Rules for“ werden die gefilterten Regeln angezeigt. In dem dargestellten Beispiel sind dies die relevanten bzw. hinweisenden Regeln für eine Welle der Wellenanlage im Antriebsstrang eines Schiffes.

Im Menu „View“ kann mit „Back“ und „Forward“ zwischen den betrachteten Regeln navigiert werden. Im Fenster „History“ wird der Verlauf der Navigation dargestellt. „Synchronize“ selektiert automatisch die im rechten Fenster angezeigte Regel im Fenster der Buchstruktur „Rule Book“.

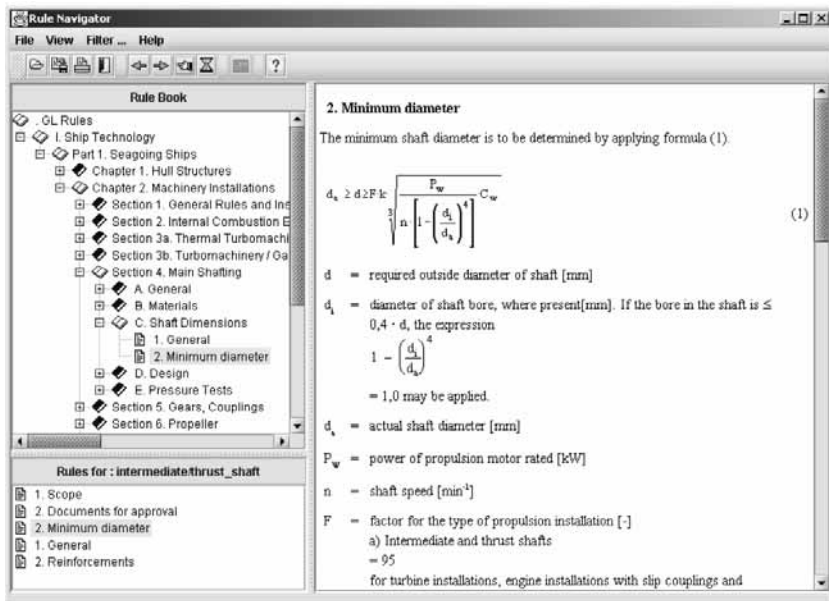


Abbildung 7: RuleNavigator mit den relevanten Regeln

4.3 Integration in CAE/CAD- Systeme

Die verteilte Architektur des Systems und die Kapselung der Logik der Regeln in die Softwarekomponente *RuleServer* ermöglicht die Nutzung des Systems von externen Programmen. Der *RuleServer* verfügt über eine Schnittstelle, welche die Funktionalität der Regelbearbeitung und Regelbenutzung zur Verfügung stellt. Diese, in Java implementierte, Schnittstelle kann direkt (local), oder als Java RMI (Remote Method Invocation) eingesetzt werden. Daraus ergeben sich zwei Strategien für die Integration des *RuleServer* mit einem CAE System:

- Die *externe* Integration erfolgt durch den Einsatz einer zusätzlichen Anwendung. Diese Anwendung extrahiert Produktdaten aus dem CAE/CAD System und dient weiterhin als Clientanwendung des *RuleServer*.

- Eine *interne* Integration kann realisiert werden, in dem das CAE/CAD System über die Funktionalität verfügt die Schnittstelle zu nutzen und im System Aufgaben wie *Prüfen* und *Dimensionieren* als Bestandteil des Systems zur Verfügung zu stellen.

Beide Strategien erlauben eine regelbasierte Unterstützung der Entwicklung und Konstruktion durch die Prüfung der Regelkonformität.

Danksagung

Die hier präsentierten Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Wettbewerbsvorteile durch informationstechnisch unterstützte Produktentwicklung im Schiffbau (WiPS)“ durchgeführt, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SX133A.

Literatur

- [1] Bronsart, R., Tools for the Assessment of the Ship Structural Steelwork - a State of the Art Survey, The 10th International Conference on Computer Application in Shipbuilding, Cambridge, 1999, Seite 137 ff
- [2] Bronsart, R., Cantow, U., Petkov, V., Knowledge Modelling and Implementation Methods in Distributed CAE-Environments, The 11th International Conference on Computer Application in Shipbuilding, Malmö, 2002, Seite 287 ff
- [3] LLOYD'S REGISTER, Rulefinder User Guide, London, 2002
- [4] GERMANISCHER LLOYD, Rules and Programs, Hamburg, 2002
- [5] Jensen, H., Überprüfung der Anwendbarkeit und Einhaltung technischer Regelwerke sowie Dimensionierung an Hand von Regelwerken mit Hilfe von Rechnern, Bericht 528, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1992
- [6] STEP; ISO 10303 - Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange, <http://www.nist.gov/sc4/www/stepdocs.htm>
- [7] ISO 10303-11, Industrial automation systems and integration - product data representation and exchange - Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual; Genf, 1994
- [8] JAVATM technology homepage; The Source of JavaTM technology; <http://java.sun.com>
- [9] Bigus, Jennifer; Bigus Joseph, Constructing Intelligent Agents using Java 2; John Wiley and Sons, New York, 2001
- [10] Ferber, J., Les Systèmes Multi - Agents. Vers une intelligence collective., Intereditions, Paris, 1995, 1997
- [11] Toparlak, I.A., Knowledge based processing of technical rules and regulation at the example of the shipbuilding rules, Bericht 552, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, 1995

Prof. Dr.-Ing. Robert BRONSART
 Dipl.-Ing. Ulf CANTOW
 Dipl. Math. Ventzeslav PETKOV

Universität Rostock
 Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik
 18051 Rostock
 email: {robert.bronsart,ulf.cantow,venzi.petkov}@mbst.uni-rostock.de

Diskussion

Prof. Rugenstein

Da die deutsche Sprache sehr vielgestaltig ist und es für ein Wort mehrere Synonyme gibt, würde mich interessieren, wie finde ich die zutreffende Regel?

Dipl.-Ing. Cantow

Die Maschine findet diese über den Produktkontext. Sie haben eine Regel und als erstes wird der Produktkontext - die Gültigkeit dieser Regel - festgelegt. Sie brauchen ein Produktmodell und ein Regelmodell dazu, und dort wird gesagt: wenn dieses Produkt in diesem Kontext auftritt, dann ist die Regel anwendbar. Wenn man ein Produkt übergeben will, dann überprüft man alle Regeln, ob dieses Produkt in diesem Kontext vorhanden ist und erhält so die relevanten Regeln. Man ist also nicht an Worte, sondern an Objekte gebunden.

Prof. G. Höhne

Ich entwerfe in einem CAD-System und komme bei einer Welle an. Woher weiß, ich ob es für diese Welle Regeln gibt?

Dipl.-Ing. Cantow

Indem ihr CAD-System das Datenmodell exportieren kann. Einige CAD-Systeme unterstützen z. B. AP214 von STEP. Wenn Sie mir die Daten im STEP Format geben, kann ich erkennen, das ist eine Welle, und in welchem Kontext befindet sich diese Welle. Gibt keine näheren Beschreibungen zur Welle oder ist die Welle in einem Getriebe eingebaut und alle Regeln, die für eine Welle in einem Getriebe gelten, müssen nun angewendet werden.

Das ist die Frage nach dem Produktmodell, die vielleicht auch in der Konstruktionstechnik ein Problem darstellt. Man hat mit Zeichnungen angefangen und dann kommen immer mehr Informationen dazu und das Ganze bläht sich ungeheuer auf. Es wird groß und oft auch unübersichtlich. Das ist besonders bei komplexen Produkten (z.B. Schiffe) der Fall.

Dipl.-Ing. Zirkel

Ist das Projekt gemeinsam mit einer kommerziellen Firma bearbeitet worden?

Dipl.-Ing. Cantow

Nein mit keiner Softwarefirma. Das Projekt wurde gemeinsam mit dem Germanische Lloyd bearbeitet, einem Partner, der genaueste Regelwerkkenntnisse besitzt.

Dipl.-Ing. Zirkel

Warum wurde eine eigene Software entwickelt? Es gibt doch für beide Ansätze, intern und extern, Anwendungen, die genau das Problem lösen. Die Externen sind: Archicad, ICAD, alles wissensbasierte und regelverarbeitende Systeme. Bei den Internen gibt es: Knowledgeware, CA-TIA, Knowledge fusion, Unigrafics, mit denen man genau die Dinge machen kann, die Sie bearbeitet haben.

Dipl.-Ing. Cantow

Wir haben damals diese Systeme untersucht, und vor drei Jahren haben wir kein System gefunden, das unseren Ansprüchen genügt.

Prof. R. Stelzer

Sie arbeiten mit STEP. Bei der praktischen Anwendung ist dieses Exportieren, um eine Regel zu überprüfen, recht umständlich. Ich kenne kein System, das den Ansatz des internen STEP-Formates hat. Was ist ihre mittelfristige Lösung? Woher bekommt Ihr CAD-System die Semantik z. B., dass eine Welle lang und dünn ist? Diese Beschreibung hat mit der CAD- Welt nichts zu tun. Als dritte Frage: im CAD-System werden nur Gestaltungsmöglichkeiten festgehalten, wo werden requirements, die im Entwicklungsprozess anfallen, festgehalten und haben Sie daran gedacht, diese Anforderungen in einfachere Regeln einfließen zu lassen?

Dipl.-Ing. Cantow

Wir unterstützen derzeit den Schiffsmaschinenbau. Da gibt es einen Normteil AP 226, in dem Produktdaten referenziert werden, und sie haben einen Teil, in dem nur Produkte beschrieben werden. Wenn sie Produktinstanzen herstellen wollen, dann verweisen Sie auf die Beschreibung, die irgendwo liegen kann. Wenn Sie eine Beschreibung haben, dann erkennen Sie, dass dieses Produkt auf die Beschreibung passt und Sie können die entsprechenden Regeln anwenden.

Wenn Sie kein Produktmodell haben, können Sie auch keine Regeln anwenden. Bei einer reinen Abfolge von Geometriedaten kann ich nicht sagen, ob das Teil z. B. zum Abgassystem eines Autos gehört oder nicht. Dann kann man auch nicht die entsprechenden Regeln anwenden. Man braucht ein Produktmodell, das diese Anforderungen erfüllen kann.

Dipl.-Ing. A. Jordan

Sie schicken also ein Objekt in ihren Regelchecker und das System prüft, ob die Regeln erfüllt sind oder nicht. Sehen Sie zukünftig die Möglichkeit, dass das System auch Vorschläge zur Lösung von Regelbrüchen macht? Also wenn eine Regel nicht gehalten wird, dass das System dem Konstrukteur Vorschläge bringt?

Dipl.-Ing. Cantow

Ja, das ist möglich. Es ist ein weiteres Ziel des Projektes gewesen, dass man ein Dimensionieren unterstützt. Im Moment ist das noch sehr umständlich. Man muss diesen Prozess noch automatisieren, damit man während der Konstruktion Hinweise erhält, ob der Durchmesser stimmt oder an der Drehzahl, der Leistung, dem Durchmesser etwas geändert werden muss.

Dipl.-Ing. A. Jordan

Die Entscheidungsmöglichkeit, welcher Parameter geändert werden kann, wird vom System aber nicht gegeben?

Dipl.-Ing. Cantow

Noch nicht, es ist aber möglich, da ja alle Parameter, z. B. bei der Welle, im System bekannt sind.

Prof. S. Klöcker

Sie haben vorhin den Regeleditor angesprochen, ich kenne den Germanischen Lloyd oder andere Regelwerke. Haben Sie sich eine Methode überlegt, wie Sie solche Regeln editieren und abwickeln können, wie solche Bücher und Regelwerke eingearbeitet werden?

Dipl.-Ing. Cantow

Hier sehen sie zwei komplette Bücher (beim GL Kapitel) eingelesen und als html - Seite dargestellt. Das sind ungefähr 700 Regeln. Aber die Hauptarbeit ist, die Regel rechnerauswertbar zu beschreiben. Man kann erst Teile umsetzen, z. B. für Maschinenanlagen. Regelfachleute des

Germanischen Lloyd wissen genau, welche Regeln nötig sind, und diese werden umgesetzt. Man braucht immer einen regelfesten Ingenieur jedoch (bedingt durch den Regeleditor) keinen Programmierer.

Dr. R. Wegmann

Es macht ja Mühe diese Regeln zu verschlüsseln und zu algorithmisieren. Haben Sie Überlegungen angestellt, die Regeln kritisch zu beleuchten, indem man sich fragt: sind hier redundante Regeln oder sind Regeln durch andere Regeln aufgehoben? Denn solche Regelwerke haben die Angewohnheit, zu wachsen und zu veralten.

Dipl.-Ing. Cantow

Zumindest ist das Potential da. Es wird daran gedacht, die Regeln zu verbessern. Alles was als advice - als Ratschlag angegeben ist, ist ungenau beschrieben. Wenn es nicht auswertbar ist, ist es schlecht beschrieben.

Als Nächstes kann man die Variablen ansehen, wie oft werden sie benutzt? Ist D_i immer der Innendurchmesser?

B. Culhan

Sie haben sicher auch Anwender im Konsortium. Was sagen die dazu, machen die da mit?

Dipl.-Ing. Cantow

Wir hatten wenige Anwender. Zum Ganzen gehört ein Editor, mit dem man Produkte anlegen und entwickeln kann. Der Gedanke vom GL war, den Editor zur Verfügung zu stellen. Die Nutzer können dann im Voraus abchecken, ob die Regelwerke erfüllt werden und sie den Stempel kriegen. Noch ist es kein Produkt, sondern wir brauchen eine Firma, die daraus ein Produkt macht.

Dipl.-Ing. Zirkel

Firmen wollen keine gedruckten Regeln abspeichern, sondern das immer angewandte Ingenieurwissen speichern, wenn Ingenieure ausscheiden. Denn dieses Potential soll in der Firma bleiben.

Dipl.-Ing. Cantow

Hier soll kein neues Wissen generiert werden. Dieses System kann sagen, ob das Produkt die Regel erfüllt oder nicht. Es speichert nicht ab, wie ich mich bei dieser oder jener Konstellation verhalten muss.

Entwicklung und Simulation hydraulisch betriebener Vortriebsmaschinen für den Einsatz im Bergbau und Tunnelvortrieb

Prof. Dr.-Ing. Martin LÜBBERT

Fachhochschule Gelsenkirchen

Keywords

Streckenvortrieb, Tunnelvortrieb, Teleskoplafette, Simulation hydraulischer Vortriebsmaschinen, Parallelhydraulik

1. Einführung

Die Industrie im Ruhrgebiet hat sich in der Vergangenheit sehr stark auf den Bergbau spezialisiert. Im Rahmen des Abbaus der Kohlegewinnung versuchen viele Firmen, das Know-How für den Untertage-Maschinenbetrieb auf den Tunnelbau zu übertragen. Für diesen Schritt sind viele Neuentwicklungen und Anpassungen erforderlich, um den veränderten Einsatzbedingungen zu entsprechen.

Die eingesetzten Maschinen werden fast ausschließlich hydraulisch angetrieben und gesteuert, da das Leistungsgewicht hydraulischer Aktoren gegenüber elektrischen Antrieben erhebliche Vorteile bietet. Elektronische Steuerungen wurden im Bergbau nur sehr selten wegen der Explosionsgefahr eingesetzt. Durch den Einsatz moderner Steuerungen ergeben sich große Entwicklungspotentiale im Bereich des Tunnelvortriebs.

Sowohl für den Konstruktionsprozess als auch für den Vertrieb sind zur Kostenreduzierung und zur Markteinführung Computersimulationen zwingend erforderlich. Mit Hilfe moderner CAD- und Simulationssoftware werden solche Projekte an der Fachhochschule Gelsenkirchen in Zusammenarbeit mit der Industrie durchgeführt.

Anhand einiger Beispiele wird die derzeitige Entwicklung in diesem Marktsegment und die Kooperation zwischen der Fachhochschule Gelsenkirchen und der Industrie vorgestellt.

2 Voraussetzungen für die Simulation in der Entwicklung

Die richtige Software als auch die ausgebildeten Bediener sind Voraussetzung zur umfassenden Simulation von Produkten während der Entwicklung von Prototypen hydraulisch betriebener Maschinen. Beides ist in der heutigen Zeit in den kleinen und mittelständigen Unternehmen keine Selbstverständlichkeit. Aufgrund dieser Tatsache entwickelt sich eine zunehmende Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Fachhochschulen. Die aktuelle Umge-

bung für die Entwicklung mechanischer Produkte ist in Abb. 1 aufgelistet. Genutzt werden ausschließlich marktgängige Softwareprodukte.

Simulation	Programm
Kinematik Kollisionsbetrachtungen	CAD – Systeme
Verformung	FEM
Hydraulikschaltungen (nur Schaltungslogik)	Fluid-Sim (Fa. Festo)
Mehrkörpersimulation	ADAMS
Regelungssimulation	WIN-FAKT

Abbildung 1: Verwendete Simulationssoftware

Durch den Umbruch in der Region, die in der Vergangenheit vom Kohleabbau geprägt war, ändert sich auch die Produktpalette der Firmen in der Region. Maschinen, die bisher den spezifischen Anforderungen des Bergbaus entsprechen mussten, können nun mit geändertem Anforderungsprofil in anderen verwandten Bereichen, z.B. dem Tunnelbau, eingesetzt werden. Die betroffenen Firmen müssen sich mit neuen Technologien auseinandersetzen (siehe Abb. 2). Um diese Technologien in den Produkten einzusetzen und am Markt zu platzieren kann auf die Simulationstechniken kaum noch verzichtet werden. So werden komplexe Bewegungen anschaulich simuliert, und auf Kollisionen untersucht. Die Kunden haben die Möglichkeiten schnell und umfassend einen Eindruck über die Maschinen zu erhalten.

Bergbau	Tunnelvortrieb
Explosionsschutz	-----
Vorwiegend reine Hydraulik-Steuerung	Hydrauliksteuerung in Kombination mit SPS-Steuerungen
Sehr raue Handhabung der Maschinen	Handhabung wie bei Baumaschinen

Abbildung 2: Unterschiedliche Anforderungen in den verschiedenen Märkten

3 Beispiele für die Simulation in der Produktentwicklung

3.1 Streckenvortrieb im Bergbau oder Tunnelvortrieb

In modernen Streckenvortrieben werden mehrere Maschinen parallel betrieben, um die Vortriebsleistung zu erhöhen. In Abb. 3 wird ein solches System gezeigt, in dem auf verschiedenen Ebenen Maschinen gleichzeitig arbeiten. Auf der Sohle arbeitet ein Bagger mit Kettenfahrwerk, und darüber eine Einschienenhängebahn mit einer Lafette, einem Ausbaumanipulator und einem bedienerstand.

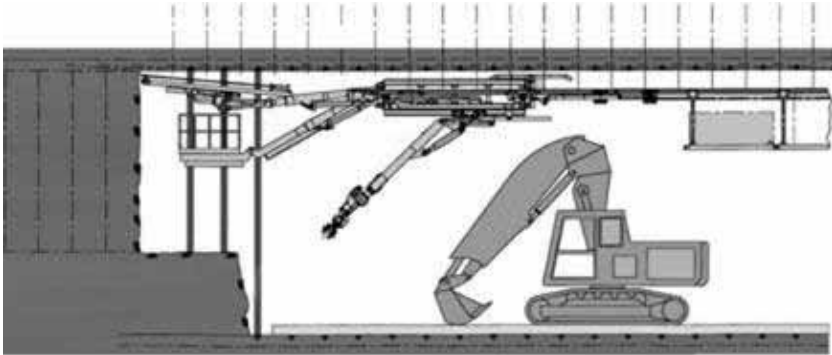


Abbildung 3: Moderner Streckenvortrieb

Ein solches Konzept wurde in einer Simulation in einen kompletten Streckenvortrieb eingearbeitet. In den Abb. 4 und 5 sind die einzelnen Maschinen dargestellt. Die erstellte Animation gibt den Arbeitsablauf und das Zusammenspiel der im Einsatz befindlichen Maschinen wieder. Aus der Simulation wurde ein Videofilm erstellt, der im Vertrieb sehr erfolgreich eingesetzt wurde.



Abbildung 4: Kompletter Streckenvortrieb in der Simulation



Abbildung 5: Einschienehängebahn für den Streckenausbau in der Simulation

3.2 Teleskoplafette mit automatischer Ankerzuführung

In der vorherigen Simulation wurden mehrere Bohrlafetten zur Ankerung des Gebirges eingesetzt. Solch eine Lafette wurde in teleskopierbarer Ausführung neu entwickelt. Der sehr komplexe Bewegungsablauf wird nur durch einen Hydraulikzylinder gesteuert. Zusätzlich wurde der Arbeitsvorgang des Bohrens und Ankerns teilautomatisiert. Zur Demonstration der Funktionalität sind die Bewegungsabläufe der Maschine in einer Animation deutlich gemacht worden.

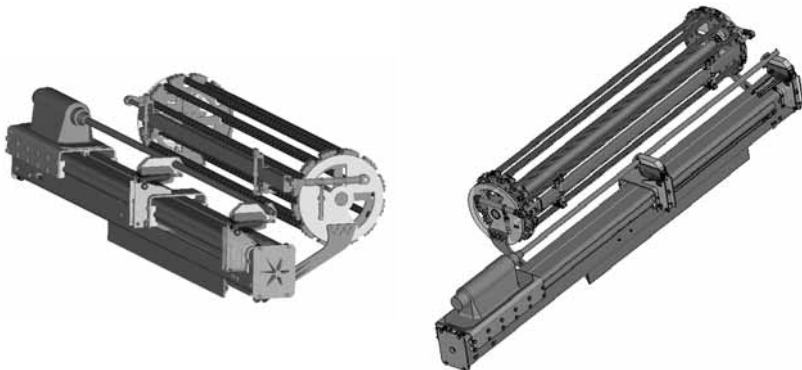


Abbildung 6: Animationsmodell einer Teleskoplafette in fotorealistischer Darstellung

Neben der reinen Bewegungssimulation wurde die Steuerung der Maschine mit dem Hydrauliksimulationsprogramm FluidSim der Fa. Festo entwickelt und getestet.

3.3 Entwicklung einer Parallelhydraulik

Für den Streckenvortrieb werden Manipulatoren benötigt, an denen Lafetten oder Bedienerplattformen befestigt sind. Diese im Raum beweglichen, und teleskopierbaren Arme werden in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt. Eine Neuentwicklung, bei der zwei Hydraulikzylinder eingespart wurden zeigt die Abb.7. Wichtigste Eigenschaft dieser Arme ist die Beibehaltung des Winkels zwischen den Anschlussplatten bei einer Bewegung im Raum.

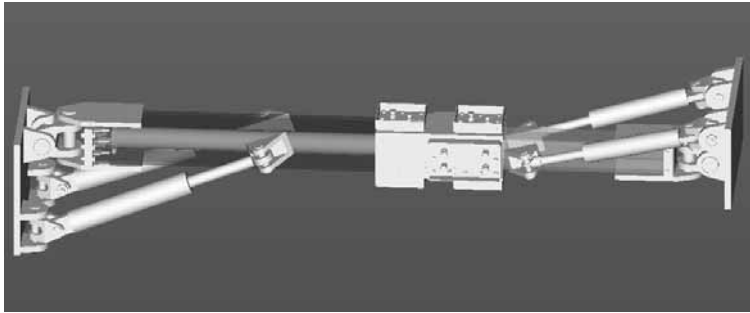


Abbildung 7: Parallelhydraulik

Alle Gelenke sind als Kardangelen ausgeführt, um einen möglichst großen Bewegungsraum zu realisieren. Dadurch verändern sich die Drehpunkte ständig im Raum. Die mathematische Beschreibung der Bewegungsabläufe wurde auf der Basis der Denavit-Hartenberg-Konvention entwickelt. Durch diese Beschreibung lässt sich die Steuerung des Armes programmieren und simulieren. Die Simulation wurde mittels des CAD-Systems durchgeführt, und parallel dazu numerisch berechnet. Die Abweichung dieser beiden Methoden lag bei ca. 0,1 mm. Der erreichbare Bewegungsraum ist in Abb. 8 dargestellt.

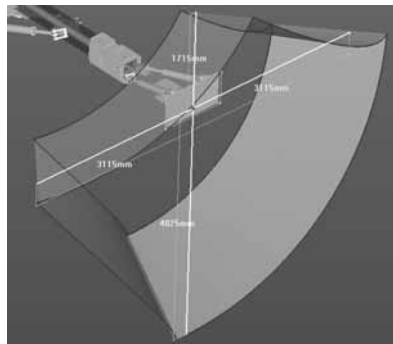


Abbildung 8: Bewegungsraum der Parallelhydraulik

4 Zusammenfassung

Die Simulation bei der Produktentwicklung ist zum unverzichtbaren Werkzeug geworden. Wie an den Beispielen gezeigt, können Entwicklungen mit Hilfe der Simulation schneller und effektiver durchgeführt werden. Zusätzlich sind fotorealistische Darstellungen und Kinematikmodelle für den Vertrieb ein wertvolles Werbemittel, da die Maschine vor dem Prototypenbau als Video dem Kunden präsentiert werden kann.

Prof. Dr.-Ing. Martin LÜBBERT
Fachhochschule Gelsenkirchen
Fachbereich Maschinenbau / Bocholt
Konstruktionstechnik und Hydraulik
D-46397 Bocholt
email: martin.luebbert@fh-gelsenkirchen.de

Diskussion

Prof. Brökel

Sie haben von Simulationsrechnungen gesprochen, haben aber nichts weiter dazu gesagt.

Prof. Lübbert

Ja, das ist richtig. Wir haben die Rechnungen aus der Robotik entlehnt. Das heißt, wir haben wirklich einzelne Gelenkpunkte und keine Kreuzgelenke angenommen. Bei unseren Gelenken liegen die Drehpunkte horizontal und vertikal auseinander. Das heißt, die Berechnungen waren nicht so ganz einfach. Wir hatten nicht nur einen Drehpunkt, sondern der Drehpunkt veränderte sich während der Bewegung. Diese Berechnung haben wir dann in einem mathematischen Programm durchgeführt.

Prof. Brökel

Was ist der Anteil der Fachhochschule daran gewesen und worin bestand der Anteil der Firma, die diese Gerätschaften gebaut hat, bei der Konstruktion?

Prof. Lübbert

Bei der Konstruktion der Teleskoplafette und der Parallelkinematik haben wir die Leistungen komplett erbracht. Bei der Simulation des gesamten Streckenvortriebes haben wir die Konstruktion von der Firma übernommen und das Ganze visuell aufbereitet.

DI Kluge

Sie sagten, dass die Antriebe über Hydraulik angetrieben werden, warum nicht mit E-Motoren?

Prof. Lübbert

Hydraulische Antriebe haben ein wesentlich geringeres Leistungsgewicht als Elektromotoren. Die Hydraulikversorgung wird von einem Elektromotor angetrieben, der in explosionsgeschützten Ausführung eingebaut ist. Das ist dann aber der letzte Elektroantrieb. Danach sind alle Antriebe hydraulisch, auch die gesamte Steuerung. Wenn wir die Ventile elektrisch ansteuern würden, müssten wir die elektrische Steuerung wegen der Explosionsgefahr kapseln. Das ist alles eine Kostenfrage, und außerdem müsste jede Kapselung vom Bergamt abgenommen werden. Und diese Abnahme ist aufwendig bis man die erforderlichen Genehmigungen bekommt.

Schadenswahrscheinlichkeit – Grundlage einer neuen Auslegungsphilosophie ?

Prof. Dietrich SCHLOTTMANN

Universität Rostock

Abstract

Die Auslegung von Konstruktionselementen erweist sich immer wieder als eine wesentliche Aufgabe für den in der Konstruktionspraxis tätigen Ingenieur.

Bisher galt die „Sicherheitszahl“ als ein ausreichendes Maß für die Gestaltung und Bemessung.

Im vorliegenden Vortrag wird gezeigt, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit zutreffender ist und mit geringem Aufwand aus der Sicherheitszahl mit den Zusatzinformationen „Wöhler-Exponent“ und Streubreite abgeschätzt werden kann.

Die Methode wird für die Lebensdauerberechnung von Wälzlagern, für den Schwingbruch sowie für analoge beanspruchungsabhängige Schädigungen wie Verschleiß und Erosion dargestellt.

Die Kenntnis der Schadenswahrscheinlichkeit ermöglicht weiterführende Berechnungen zur Systemzuverlässigkeit.

Keywords

Auslegung von Konstruktionselementen; Sicherheit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Ausfallwahrscheinlichkeit

Die klassische Sicherheitszahl

Schon in dem 1862 erschienenen, wohl ersten deutschsprachigen Lehrbuch der Konstruktionslehre von Moll/Reuleaux /1/ wird der Sicherheitsbegriff mit einer Zahl $S > 1$ in Verbindung gebracht, die das unzulässige Überschreiten von Belastungen bzw. Spannungen begrenzen soll.

Allgemein können wir schreiben

$$B_{\text{vorhanden}} < B_{\text{versagen}} \quad (1)$$

und mit der oben getroffenen Definition der Sicherheitszahl $S > 1$ gilt

$$B_{\text{vorh.}} \cdot S < B_{\text{vers.}} \quad (2)$$

$$S = \frac{B_{\text{vers.}}}{B_{\text{vorh.}}} \quad (3)$$

Mit der Entdeckung der so genannten “Dauerschwingfestigkeit” metallischer Werkstoffe wurde diese Definition der Sicherheit auch auf den Bereich der Ermüdung übertragen, wodurch eine Lebensdauerberechnung lange umgangen werden konnte.

Wie fragwürdig die Sicherheitszahl ist, wird allein dadurch erkennbar, dass trotz 3 oder 4-facher Sicherheit ein Schaden nicht ausgeschlossen werden kann.

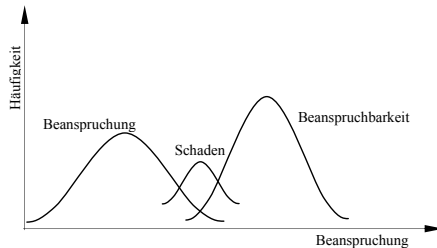


Abb. 1: Schaden durch „Interferenz“ zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit

Abbildung 1 verdeutlicht, dass ein Schaden immer dann auftreten kann, wenn ein Bauteil statistisch geringerer Beanspruchbarkeit statistisch gesehen große Beanspruchungen aufnehmen soll. Dieses sogenannte „Interferenzmodell“ geht auf [2] zurück.

Das Interferenzmodell erklärt in anschaulicher Weise, dass auch bei großen Sicherheiten der Schaden statistisch nicht ausgeschlossen werden kann – die Schadenswahrscheinlichkeit hängt neben der Sicherheit in entscheidendem Maße von den statistischen Verteilungen ab. Es wäre für den Konstrukteur sicher eine wesentliche zusätzliche Information, wenn außer der Sicherheit die relevante Schadenswahrscheinlichkeit angegeben werden könnte.

Mit der vorliegenden Arbeit werden Möglichkeiten und Wege aufgedeckt, sowohl die Sicherheit als auch die Lebensdauer durch die Berechnung der aktuellen Zuverlässigkeit bzw. Schadenswahrscheinlichkeit zu ergänzen bzw. zu qualifizieren.

Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit als grundlegende Entscheidungsbasis für die Auslegung technischer Gebilde

Ausgehend von der kritischen Betrachtung der „Sicherheit“ sollen am Beispiel des Wälzlagers Zielstellung und anzustrebendes Ergebnis der Berechnung einer Schadenswahrscheinlichkeit erläutert werden.

Bekanntlich wurden Wälzlager mit einer Zuverlässigkeit von $R = 0,9$ und damit einer Schadenswahrscheinlichkeit von $F = 0,1$ bzw. 10% bis zum Erreichen der nominellen Lebensdauer auslegt.

Bei einem Getriebe mit 4 Lagern, die als „nichtredundantes System“ zu betrachten sind, wären

$$R_{\text{ges.}} = \prod_{i=1}^n R_i = 0,9^4 \cong 0,65 \quad \text{und wegen} \quad F = 1 - R$$

$$F = 0,35 \cong 35\%$$

der Getriebe ausgefallen. Das entspricht nicht den Erfahrungen der Praxis! Ursache sind „konstruktive Reserven“, die der Konstrukteur durch den Stufensprung der Baureihe, Unifi-

zieren der Lager u.a. bewusst oder intuitiv einbaut. Diese konstruktive Reserve erhöht die Lebensdauer. Im Sinne der Kritik an der Arbeitsweise der Betriebsfestigkeitslehre wäre es für den Konstrukteur jedoch aufschlussreicher, die „aktuelle Zuverlässigkeit“ bzw. Schadenswahrscheinlichkeit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt berechnen zu können. Bei bekannter Verteilungsfunktion ist es nach dem Modell der Abbildung 2 nicht schwierig, dieses Problem analytisch zu lösen.

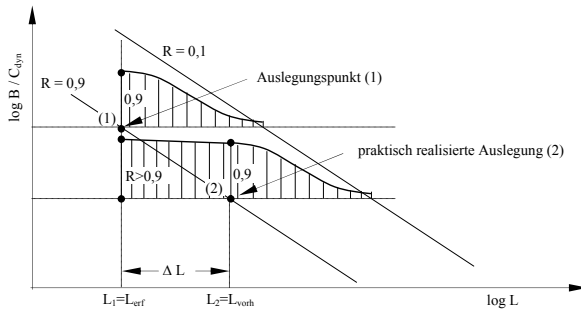


Abb. 2: Lebensdauerreserve ΔL und aktuelle Zuverlässigkeit R_{akt} bei Wälzlager

Das Ausfallverhalten der Wälzlager lässt sich bekanntlich mit der Weibullverteilung

$$R(x) = e^{-(\alpha x)^\beta} \quad (4)$$

beschreiben. Mit der dimensionslosen Koordinate $x = L / L_0$

sowie unter Verwendung des Zusammenhanges $L_m \cong 5 \cdot L_n$

ergeben sich die Freiwerte α und β zu $\alpha = 0,145$ und $\beta = 1,18$.

Mit der Modellvorstellung nach Bild 2 vergrößert sich die nominelle Lebensdauer von L_{n1} auf L_{n2} . Für gleiche Belastung $F_1 = F_2$ ergibt sich mit der bekannten Lebensdauerformel für Wälzlager

$$L_{n1} = L_{n2} \left(\frac{C_{erf.}}{C_{vorh.}} \right)^a \quad (5)$$

und die dimensionslose Zeit verringert sich von

$$x_1 = \frac{L_1}{L_{n1}} = 1 \quad \text{auf} \quad x_2 = \frac{L_1}{L_{n2}} .$$

Damit folgt

$$x_2 = \left(\frac{C_{\text{erf.}}}{C_{\text{vorh.}}} \right)^a, \tag{6}$$

d.h., die aktuelle Zuverlässigkeit erhöht sich auf

$$R_{\text{akt}} = e^{-\left[\alpha \left(\frac{C_{\text{erf.}}}{C_{\text{vorh.}}} \right)^a \right]^\beta}. \tag{7}$$

Die Tafel 1 zeigt die aktuelle Zuverlässigkeit bzw. die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der konstruktiven Reserve:

$C_{\text{vorh.}}/C_{\text{erf.}}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$R_a = 3,00$	0,900	0,947	0,969	0,981	0,987	0,991	0,994
$R_a = 3,33$	0,900	0,951	0,973	0,984	0,990	0,993	0,995
R	0,90	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99
F	10%	5%	3%	2%	1%	0,8%	0,6%

Tafel 1: Erhöhte Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit

Unter Berücksichtigung der konstruktiven Reserve $C_{\text{vorh.}}/C_{\text{erf.}}$ ergeben sich realistische Werte für die Systemzuverlässigkeit im Bereich $R > 0,9$.

Die demonstrierte Vorgehensweise kann auf das Versagen durch Ermüdung bzw. auf die Dauerschwingfestigkeit übertragen werden. [3] [4] [5] [6]

Nach dem für Wälzlager demonstrierten Berechnungsmodell kann auch der Zusammenhang zwischen Sicherheit gegen Schwingbruch und Zuverlässigkeit bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit dargestellt werden (vgl. Abb. 3).

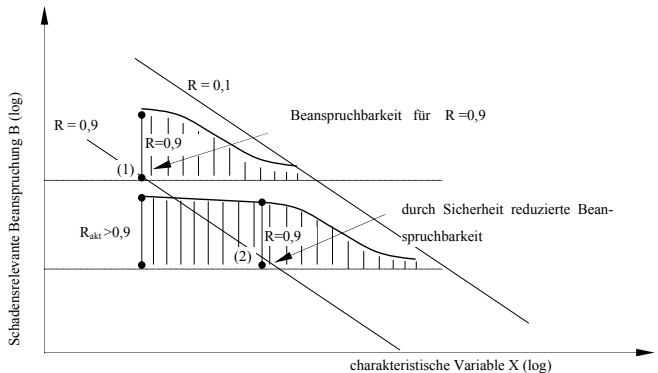


Abb. 3: Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Sicherheit

Gehen wir davon aus, dass für den Auslegungspunkt durch die berechnete Beanspruchung die Zuverlässigkeit R_n vorliegt, so wird durch die Sicherheit die zulässige Beanspruchung auf $B_{\text{vorh}} \geq B_{\text{zul}}$ abgesenkt, was ebenfalls einer Erhöhung der Zuverlässigkeit auf

$$R_n \leq R_{\text{akt}} \leq 1,0$$

gleichkommt.

Gehen wir für die Auslegungsrechnung von der erforderlichen Lebensdauer L_{erf} aus, die wegen $R = R_n$ zugleich die nominelle Lebensdauer L_n ist, und definieren die dimensionslose Koordinate der Verteilungsfunktion der Weibullverteilung nach Gleichung (4) zu

$$x = \frac{t}{t_n} \quad \text{bzw.} \quad \frac{L}{L_n}, \quad (8)$$

so ergibt sich mit dem Ansatz $L \cdot B^a = C$

$$L_1 = L_2 \cdot \left(\frac{B_{\text{vorh.}}}{B_{\text{vers.}}} \right)^a$$

und mit der Sicherheit

$$L_1 = L_2 \cdot \left(\frac{1}{S} \right)^a \quad \text{bzw.} \quad L_{n1} = L_{n2} \left(\frac{1}{S} \right)^a \quad (9)$$

Für die dimensionslose Zeitachse der Verteilungsfunktion gilt

$$x_2 = x_{\text{akt}} = \frac{L_1}{L_{n2}} \quad (10)$$

und damit

$$x_{\text{akt}} = \frac{L_1}{L_{n1}} \left(\frac{1}{S} \right)^a = \left(\frac{1}{S} \right)^a. \quad (11)$$

Die aktuelle Zuverlässigkeit ergibt sich zu

$$R_{\text{akt}} = e^{-\left[\alpha \left(\frac{1}{S} \right)^a \right]^\beta} \quad (12)$$

Neben der klassischen Sicherheitszahl S haben also der Wöhlerkurvenexponent a und die Freiwerte α und β , die von der Streubreite T_L abhängen, Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit. In der Tafel 2 sind einige für den Maschinenbau typische Wöhlerexponenten und Streufelder zusammengestellt. Unter Nutzung der Punkte $R(x_n = 1) = 0,9$ und $R(x_m) = 0,5$ ergeben sich in Abhängigkeit von der Streubreite T_L die in der Tafel 3 aufgelisteten Freiwerte der Weibullverteilung

	a	b	T _x	T _B
Ermüdung				
ungekerbte Stäbe	12 ... 15		5 ... 8	$T_B = \sqrt[3]{T_X}$
gekerbte Bauteile		∞		
. Spitzkerben	3 ... 4		1,2 ... 1,4	
. Normalkerben	5 ... 7	<i>bzw.</i>	3 ... 5	
. Flachkerben	6 ... 8	$2a - 1$	6 ... 8	
. Zahnfuß (Evolvente)	6 ... 12*		4 ... 8	
. Schweißverbindungen	4 ... 8		15 ... 25	
Kontakt				
. Kugellager	3,0	} $b = a$	10	
. Rollenlager	3,3		10	
. Zahnflanke	3... 8*		8 ... 10	
. Ventilsitz	3... 5		7 ... 15	
Verschleiß				
. Brems- und Kupplungsbeläge	1...2,5		3 ... 8	
* obere Werte aus Laufversuchen				

Tafel 2: Exponenten und Streufelder von wöhlerlinienanalogen Schädigungsdiagrammen

T _L	1	2	3	5	7	9	15	20	30
x _m	1	1,5	2	3	4	5	8	~10	~15
α	1,0	0,606	0,444	0,270	0,189	0,142	0,087	0,0617	0,0384
β	∞	4,60	2,75	1,75	1,39	1,16	0,92	0,83	0,71

Tafel 3: Freiwerte α und β der Weibullverteilung in Abhängigkeit von der Streubreite T_L

Natürlich lassen sich auch andere Verteilungsfunktionen wie z.B. die Gaußverteilung benutzen. Wegen der Unsicherheit der Grenzbereiche $R \geq 0,9$ ist es jedoch zweckmäßig, für Vergleiche immer denselben Typ anzuwenden, um die Rechnung nicht zusätzlich mit systematischen Fehlern zu belasten.

Ein Beispiel möge zur Demonstration der Vorgehensweise und zur Interpretation des Ergebnisses dienen:

Bei einer Evolventenverzahnung wurde sowohl die Zahnflanke als auch der Zahnfuß mit der Sicherheit gegen Ermüdung von $S_{FI} = S_{Fu} = 1,5$ ausgelegt.

Mit Gleichung (12) und den in Tafel 2 angegebenen Werten ergeben sich folgende Zuverlässigkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten.

	Sicherheit S	Wöhlerexponent a	Streubreite T _L	Freiwerte α β		Zuverlässigkeit R	Ausfallwahrscheinlichkeit F
	Zahnflanke	1,5	3,5	9	0,142	1,16	0,980
Zahnfuß	1,5	10	6	0,276	1,75	0,9999	0,0001 ≅ 0,01%
	1,5	8	6	0,276	1,75	0,9996	0,0004 ≅ 0,04%
	1,5	6	6	0,276	1,75	0,9985	0,0015 ≅ 0,15%

Das Beispiel zeigt, dass **trotz gleicher Sicherheit** die Ausfallwahrscheinlichkeit der Zahnflanke von der Ausfallwahrscheinlichkeit des Zahnfußes erheblich abweicht.

Allgemein haben neben der Sicherheit S natürlich die Streubreite T_L und der Wöhlerlinienexponent a erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit.

Voraussetzung für die Anwendung im Konstruktionsprozess ist die Möglichkeit einer wöhlerdiagrammähnlichen Auftragung einer „Schädigungsrelevanten Beanspruchung“ über einer „charakteristischen Variablen“ in Echtzeit, Lastwechseln, Verschleißwegen u.a. Dieses kann in der Konstruktionsphase nur als „synthetisches Wöhlerdiagramm“ mit geschätzten Werten (ein Punkt, Wöhlerexponent und Streubreite genügen) geschehen. Zweckmäßig ist die Abfolge (vgl. Tafel 4)

- Sicherheit S_B
- Lebensdauer für nominelle Zuverlässigkeit, Sicherheit S_L
- Berechnung der aktuellen Zuverlässigkeit $R_{akt.}$ und damit der Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{akt.}$
- Weiterführende Berechnungen z.B. für die Systemzuverlässigkeit, für die Instandhaltung u.a.

Nach dem Bau eines Erprobungsmusters können die Daten für Wöhlerlinienexponent und Streubreite konkretisiert werden. Gewöhnungsbedürftig sind die numerischen Werte für die Ausfallwahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit. In der Tafel 4 wird der Versuch unternommen, so genannte „Anforderungsklassen“ zu formulieren.

Klasse	Anwendungsfall	geforderte Zuverlässigkeit	zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit
0	Konstruktionen ohne zuverlässigkeitsrelevanten Anforderungen	$R_{n0} < 0,9$	$F_{n0} > 0,1$
1	maschinenbauliche Standardanwendung	$R_{n1} \geq 0,9$	$F_{n1} \leq 0,1$
2	erhöhte zuverlässigkeitsrelevante Anforderungen	$R_{n2} \geq 0,99$	$F_{n2} \leq 0,01$
3	sehr hohe Zuverlässigkeitsanforderungen (z.B. Personengefährdung)	$R_{n3} \geq 0,999$	$F_{n3} \leq 0,001$

Tafel 4: Anforderungsklassen für nominelle Zuverlässigkeit

Zusammenfassung

Mit der Ableitung eines einfachen Ansatzes für den Zusammenhang zwischen Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit und der altbewährten „Sicherheit“ als Auslegungs-kriterium konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Sicherheit selbst, sondern in entscheidendem Maße der Wöhlerkurvenexponent und die Streubreite Einfluss auf die Ausfallwahrscheinlichkeit haben.

Vertraute Begriffe wie die „Konstruktion gleicher Sicherheit“ oder die Vorschrift einer „gestuften Sicherheit“ sind wohl kaum aufrechtzuerhalten, wenn die Ausfallwahrscheinlichkeit ganz andere Tendenzen nachweist. Natürlich sollten numerische Angaben für die Ausfallwahrscheinlichkeit in diesem Bereich nicht überbewertet werden. Der nachgewiesene qualitative Einfluss von Sicherheit, Wöhlerexponent und Streubreite ist jedoch objektiv und tendenziell vorhanden. Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Der abgeleitete Berechnungsansatz ermöglicht dem Konstrukteur eine wesentlich differenziertere Einschätzung der Gefahr des Ausfalls. Es können außerdem wegen der gleichen methodischen Basis Ausfallursachen wie Verschleiß und andere flächenabtragende Prozesse in die Betrachtung einbezogen werden. Weiterhin wird mit der „Zuverlässigkeit“ der wissenschaftliche Anschluss zur Systemzuverlässigkeit bzw. Systemausfallwahrscheinlichkeit sowie an eine wissenschaftlich begründete Instandhaltung hergestellt.

Vielleicht ist damit der Anstoß für eine neue Auslegungsphilosophie gegeben worden!

Es wird auf [6] und die soeben erschienene Neuauflage verwiesen.

Literatur

- /1/ Moll/Reuleaux: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1862
- /2/ Erker, A.: Sicherheit und Bruchwahrscheinlichkeit. MAN-Forschungsheft Nr. 8 (1958) S.49
- /3/ Bertsche, B. ; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990
- /4/ Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989
- /5/ Schlottmann, D. u.a: Konstruktionslehre – Grundlagen. Springer-Verlag Wien, New York 1983
- /6/ Schlottmann, D.: Auslegung von Konstruktionselementen ; Sicherheit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1995

Diskussion

Prof. K. Brökel

Die praktische Anwendbarkeit ist ja immer abhängig von der Kenntnis der Exponenten, die letztlich in experimentellen Untersuchungen gewonnen werden müssen.

Prof. D. Schlottmann

Es gibt aber einen so breiten Bekanntheitsgrad von Werten, und man muss ja nicht übertreiben. Man kann da sehr gut schätzen.

Prof. K. Brökel

Aber vom Prinzip her müssen die Exponenten immer neu bestimmt werden.

Prof. D. Schlottmann

An sich muss man immer wieder die Exponenten und Streubreiten haben, sonst funktioniert das Prinzip nicht.

Prof. K. Brökel

Könnte man das nicht simulieren, keine Experimente sondern rechnergestützt? Das wäre eine Alternative, wo man große Datenmengen erhalten würde.

Prof. D. Schlottmann

Das sehe ich kaum. Es dauert natürlich, Lebensdauer und Verschleiß zu testen.

Prof. G. Höhne

Sie sagen, dass eine hinreichende Schätzgenauigkeit erreicht wird. Können Sie das etwas spezifizieren?

Prof. H. Schnegas

Es wurden Untersuchungen zu verschiedenen Bauteilen und Durchmessern durchgeführt und die Genauigkeit der Berechnung war schon da. Es wurde gesagt, innerhalb der nächsten 100 Stunden fällt das Lager aus, und es ist ausgefallen.

Prof. D. Schlottmann

Auch bei den Versuchen treten natürlich Fehler auf. Bei Zahnrädern z.B. ist es ein Unterschied, ob man einen Pulsator benutzt oder einen Laufversuch macht.

Prof. R. Stelzer

Die Genauigkeit der Berechnungen hängt von den Eingangsdaten ab. Wir haben Berechnungen zu Walzwerken gemacht, und bei Rücksprachen mit der Industrie wurden wir ausgelacht, da diese nach Russland lieferte und genau wusste, dass die Lager fünffach überbelastet werden.

Interaktiver Simulator für Arbeitsmaschinen - Entwicklungserfahrungen und -potentiale

Günter KUNZE, Ines GUBSCH, Timo PENNDORF

TU Dresden

Abstract

Bei der Entwicklung neuer Produkte gewinnt die Simulationstechnik als Informationsquelle immer mehr an Bedeutung. Die konsequente Anwendung dieser Technologie führt zur Abbildung des ganzheitlichen Systemverhaltens komplexer Maschinen. Auf Arbeitsmaschinen bezogen erfordert dieser Anspruch die Berücksichtigung der Abhängigkeit des Systems vom Bediener. Aus diesem Grund ist die Simulation interaktiv zu gestalten. Ein Höchstmaß an Interaktivität wird durch die Anwendung von Simulatoren erreicht. Diese versetzen den Bediener in eine hochwertige Abbildung der realen Welt.

Die Simulationssoftware und die eingesetzten Berechnungsmodelle dürfen dieser Qualität in nichts nachstehen. Sollen die Ergebnisse der Simulation zur Dimensionierung von Teilsystemen benutzt werden, so sind diese aus hochgradig detaillierten Modellen unter Verwendung verifizierter Algorithmen zu gewinnen. Die Herausforderung besteht in der Gewährleistung der für die Interaktivität notwendigen Echtzeitfähigkeit der Berechnung.

Keywords

Simulator; Modellbildung; Mobile Arbeitsmaschinen; Echtzeitsimulation

1 Einleitung

Bisher werden interaktive Simulatoren vor allem als Trainingssimulatoren für Piloten, Kraftfahrer und Lokomotivführer realisiert. Die dabei auftretenden Anforderungen unterscheiden sich fundamental von denen einer Entwicklungssimulation. Wesentlich für die Qualität der Ausbildung ist eine als bekannt empfundene Verhaltensweise des simulierten Systems. Im Allgemeinen genügen bereits sehr einfache Modelle diesen Anforderungen. So werden zum Beispiel Regel- und Steuersysteme nicht durch ihre Differentialgleichungen, sondern durch die gewünschte Logik abgebildet. Im virtuellen Fahrzeug existieren diese dann quasi als ideale Systeme. Systemtheoretisch entspricht diese Art von Vereinfachung dem Herauslösen einer oder mehrerer in sich geschlossener Teilmengen aus der Menge aller möglichen Systemzustände.

Die im Kontext unter dem Begriff Simulation verstandene zeitliche Diskretisierung der Zustandsgrößen des Modells wird durch die numerische Berechnung des zugehörigen Systems aus Differentialgleichungen und algebraischen Gleichungen realisiert (/1/).

Sollen die so gewonnenen Ergebnisse eine vertrauenswürdige Grundlage für eine Vorhersage des physikalischen Verhaltens des modellierten realen Systems bilden, so müssen höchste Anforderungen an die Methoden von Modellbildung und Berechnung gestellt werden. Die

beschriebenen Vereinfachungen, welche bei der Ausbildungssimulation möglich sind, werden in diesem Fall als nicht zulässig angesehen.

Die wesentliche Aufgabe bei der Realisierung eines Forschungs- und Entwicklungssimulators besteht in der Kombination von live wahrnehmbarem Umfeld und genauer, verifizierbarer Berechnung.

2 Interaktive Simulation von Arbeitsmaschinen

Im Mai 2003 wurde am Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik der TU Dresden ein interaktiver Forschungs- und Entwicklungssimulator für mobile Arbeitsmaschinen (Bild 1) in Betrieb genommen. Gebaut wurde dieser Simulator im Jahr 2002 bei der EADS/Dornier GmbH Friedrichshafen in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der TU Dresden.

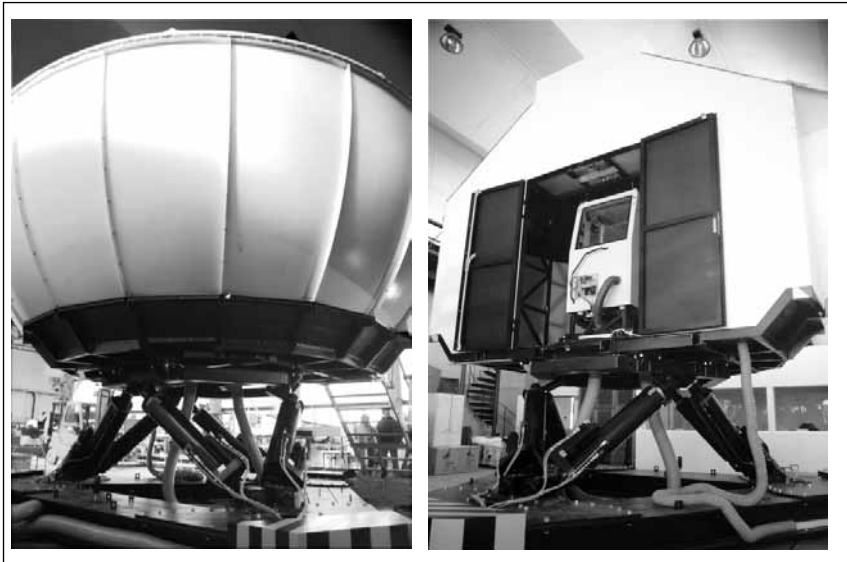


Bild 1 Interaktiver Forschungs- und Entwicklungssimulator für mobile Arbeitsmaschinen

Wie im Bild 1 dargestellt, besteht der interaktive Simulator aus einer Simulatorkabine, in welche Fahrerhäuser verschiedener Maschinentypen eingebaut werden können. In der Simulatorkabine dient eine gewölbte Projektionswand der Darstellung der Umgebung. Möglich ist auch der Einsatz eines Head Mounted Displays. Ein Soundsystem liefert die zugehörigen Geräusche. Die Simulatorkabine ist auf einem Bewegungssystem befestigt, welches die beim Fahren und Arbeiten auftretenden Bewegungen und Beschleunigungen nachbildet. In der ersten Entwicklungsphase ist die Simulation von zwei Mustersegmenten realisiert worden (Hydraulikbagger und Traktor).

Die interaktive Simulation soll das gesamtheitliche Maschinenverhalten abbilden und darf sich nicht auf die Abbildung von Teilmodellen beschränken. Zur effektiven Modellbildung sind Modellstrukturen zu entwickeln, welche sowohl abgeschlossene Teilmodelle beschreiben, als auch das gekoppelte Verhalten dieser berücksichtigen. Eine solche Struktur ist in (Bild 2) dargestellt.

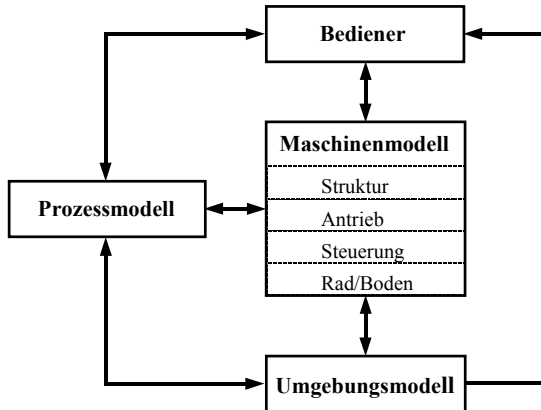


Bild 2 Allgemeine Modellstruktur

Das Maschinenmodell für eine mobile Arbeitsmaschine ist immer mit den Modellen für den Prozess (Grabkräfte, Schnittkräfte, usw.) und für die Arbeitsumgebung (Geländeprofil, Oberflächenbeschaffenheit, usw.) gekoppelt. Als Besonderheit ist zu beachten, dass die Beschreibung des Geländemodells nicht statisch ist, sondern unter Einfluss des Prozessmodells ständig aktualisiert werden muss. Die simulierte Maschine muss ebenso in der Lage sein, die Umgebung zu verändern, wie eine reale.

Unterteilt wird das Maschinenmodell in vier Teilmodelle. Diese Struktur ermöglicht die Einordnung der Problemstellung in bekannte Gebiete der Simulationstechnik (Mehrkörpersimulation, Antriebssimulation usw.).

3 Systeme zur Abbildung und Berechnung von Maschinenmodellen

Zur Zeit sind eine Reihe von Programmen und Programmsystemen auf dem Markt, welche zur Simulation technischer Systeme eingesetzt werden können. Eine Abgrenzung erreicht man zum Beispiel durch Unterscheidung nahezu monolithischer auf eine Aufgabe spezialisierter Systeme von solchen, welche die Systembeschreibung sehr abstrakt und dadurch flexibel ermöglichen.

Als monolithisch seien in dem Zusammenhang Systeme bezeichnet, welche von der Modellbildung bis zur Aufbereitung der Simulationsergebnisse wenig Offenheit und kaum Schnittstellen bieten. Meist beschränken sich die Systeme auf spezielle Teilgebiete der Ingenieurwissenschaft. Beispiele für solche Systeme sind ITI-Sim (Simulation von Antrieben) oder MSC Visual Nastran und Alaska (Mehrkörpersimulation).

Im Gegensatz zu diesen Programmen stehen abstrakte, mathematisch orientierte Systeme wie Matlab-Simulink oder Maple. Diese Programme eignen sich zur numerischen Berechnung von Differentialgleichungs- und Algebra-Differentialgleichungssystemen. Sie sind dadurch sehr flexibel, da jede Art System berechnet werden kann, wenn die entsprechenden Bilanzgleichungen für Energie-, Masse- und Impuls des Systems aufgestellt werden. Dies ist allerdings ein Prozess, welcher meist sehr aufwendig in "Handarbeit" erfolgen muss, da die angesprochene Software kaum ingenieurmäßige Werkzeuge zur Modellbildung bereitstellt.

Keine der angesprochenen Softwarelösungen ist zur Abbildung eines ganzheitlichen Maschinenmodells geeignet. Der Versuch, ein Mehrkörpersystem mit ITI-SIM zu koppeln scheitert an der Kapselung interner Berechnungsergebnisse durch die jeweiligen Programme, ohne die eine Kopplung mathematisch und aus Effizienzgründen nicht sinnvoll ist. Die einzelnen Programme erweisen sich aus mathematischer Sicht als Black-Box-Systeme ohne notwendige Schnittstellen. So ist es nicht möglich, die abgebildeten Teilsysteme mathematisch als ein komplexes System zu behandeln.

Die angesprochene mathematisch-technische Software scheidet aus Gründen der Leistungsfähigkeit aus. Die Programme dieser Kategorie arbeiten nahezu interpretierhaft und stellen keine Lösung für die Abbildung interaktiver Simulationsmodelle dar. Ein mögliches Einsatzgebiet ist die Anwendung dieser Programme als Quellcodegeneratoren. Sie sind in der Lage, aus den abgebildeten mathematischen Beziehungen optimierte Quellcodes in C oder Fortran, zu erzeugen. Auf diese Art ist eine Basis für die effiziente Berechnung von Maschinenmodellen gegeben.

4 Ganzheitliches Modell für die Steuerung eines interaktiven Simulators

Aufgrund der beschriebenen Mängel ist es notwendig, die Berechnungsalgorithmen selbst zu entwickeln. Grundlage dafür ist das modellbeschreibende System aus Differentialgleichungen. Im Fall der Kombination von Mehrkörper- und Antriebssimulation besteht dieses System ausschließlich aus gewöhnlichen Differentialgleichungen (ODE), gegebenenfalls in Kombination mit algebraischen Gleichungen (DAE).

Entsprechend der allgemeinen Modellstruktur nach Bild 2 lassen sich die Elemente des Differentialgleichungssystems den einzelnen Teilmodellen zuordnen.

Das **Strukturmodell** beschreibt in erster Näherung das Starrkörpermodell der Maschine. Seine allgemeine Formulierung lautet z.B. in der Zustandsform (2/)

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (1)$$

oder in der Deskriptorform (3/)

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}_a(t, \mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) - \mathbf{G}(\mathbf{p})^T \lambda \quad (2)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{p}) \quad (3)$$

Beiden Formen ist die Berücksichtigung äußerer und innerer Kräfte sowie Momente gemeinsam. Diese sind als Vektoren am Strukturmodell angetragen. Die entsprechenden Zahlenwerte sind durch die anderen Teilmodelle zu berechnen.

Der wesentliche Unterschied beider Methoden besteht in der Struktur des beschreibenden Gleichungssystems. Die Zustandsform führt auf ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen (ODE), wogegen die Gleichungen 2 und 3 ein System von Algebra-Differentialgleichungen beschreibt. Aufgrund der Echtzeitanforderungen ist unter Berücksichtigung der eingesetzten Löser (4/) ein Effizienzvergleich noch nicht erfolgt. Es lässt sich vorhersagen, dass in jedem Fall implizite Lösungsverfahren eingesetzt werden müssen, da das DGL-System durch die Reibungs- und Traktionsbehandlung steif wird. Bei der Anwendung der Zustandsform ist dafür die aufwendige Berechnung der zweiten Ableitung der Massenmatrix nach den freien Koordinaten notwendig.

Für das Starrkörpermodell des Hydraulikbaggers wurde ein Starrkörper-System mit dem Freiheitsgrad 11 (6 für den Unterwagen, 1 für den Oberwagen, 4 für die Hydraulikzylinder der Arbeitsausrüstung) aufgestellt und in echtzeitfähigen Berechnungscode umgesetzt.

Das **Antriebsmodell** berücksichtigt die Übertragung der mechanischen Leistung von der Quelle (Dieselmotor) zu den einzelnen Aktuatoren. Diese ist bei Arbeitsmaschinen meist als Kombination mechanischer und hydrostatischer Getriebe realisiert.

Allgemein lässt sich dieses System durch die Bewegungsgleichungen rotatorischer und translatorischer Transformatoren sowie die Druckbilanzgleichung für Flüssigkeiten beschreiben:

$$\dot{\omega} = \frac{\sum M_{An} - \sum M_{Ab}}{J_{red}} \quad (4)$$

$$\dot{v} = \frac{\sum F_{An} - \sum F_{Ab}}{m_{red}} \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dV} = E(p) \quad \dot{p} = E(p) \sum Q \quad (6)$$

Das **Steuerungs- und Regelungsmodell** stellt einen Zusammenhang zwischen den Eingaben des Bedieners und dem Antriebsmodell her. Es wird Schieberstellung für Ventile oder Steuerungsspannungen elektrischer Stellglieder berechnet. Aufgrund der hohen Spezialisierung des Modells wird keine allgemeingültige Gleichung dafür abgeleitet.

Das **Rad-Bodenmodell** beschreibt die Wechselwirkungen von Maschine und Umgebung mit Ausnahme des Arbeitsprozesses. Diese Wechselwirkungen betreffen sowohl das Starrkörpermodell (Einsinken, Bodenwellen) als auch das Antriebsmodell (Traktion). Umfangreiche Ableitungen dazu befinden sich in /5/. Charakteristisch für dieses Modell ist der enorme Streubereich nicht genau zu bestimmender Parameter (z.B. Federsteifigkeit und Dämpfung eines luftbereiften Rades). Die Simulationssoftware sollte daher zu Beginn der Berechnung diese Werte in einem technisch sinnvollen Rahmen durch Zufallszahlen besetzen.

Aufgrund seiner Wichtigkeit wird das **Prozessmodell** gesondert behandelt. Die Schwierigkeit bei der Formulierung dieses Modells besteht im Erfassen aller mit der entsprechenden Maschine möglichen Prozesse und deren Überlagerung sowie Kopplung zum Umgebungsmodell.

Eine zustandsartige Abgrenzung der Teilmodelle, etwa nach dem Prinzip Graben, Schütten, usw. ist nicht möglich, da diese immer überlagert stattfinden. Klassische, global formulierte Grabkraftmodelle (/6/) bilden dies in der Regeln nur unzureichend ab. Vielmehr müssen Belastungsmodelle aus der lokalen Wechselwirkung von Löffelbewegung und Erdstoff für die gesamte räumliche Kontur des Löffels formuliert werden.

Die Bodenbewegung muß in "Echtzeit", (besser zeitnah, denn bestimmend ist die Wahrnehmung) umgesetzt werden. Daraus erwachsen enorme Anforderungen und Probleme für die handzuhabende Gutmenge (als Teilchenmenge des Bodens) und die Abbildungstiefe. Es finden Teilchenbewegungen im gesamten Arbeitsraum des Baggers statt. Die Teilchenzustände müssen verwaltet werden.

Deshalb wurde das Bodenkontinuum diskretisiert. Die Rasterdefinition mit Volumenelementen (Voxel) erlaubt eine Berechnung mit ganzzahligen Indexwerten und eine einfache Flächen- und Volumenbestimmung durch Auszählung. Unter den gegebenen Bedingungen hat sich eine Bodenvoxelgröße von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ als sinnvoll und ausreichend erwiesen (Bild 3 a). Diese Größe ist für den Löffelraum unzureichend, weil hier detailliertere Aussagen z.B. über den Lösebereich notwendig sind. Wie im Bild 3 b dargestellt, wurde hier eine spezifische Diskretisierung vorgenommen (Voxelgröße $0,25\text{ cm} \times 0,25\text{ cm} \times 0,25\text{ cm}$).

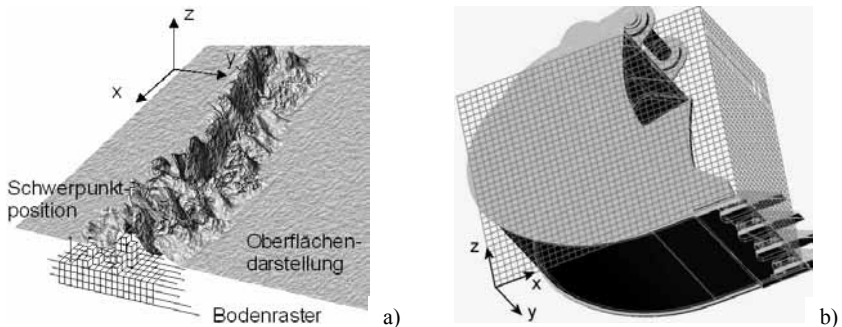


Bild 3 Diskretisierung von Boden und Grabwerkzeug

Dem Boden wird also eine Position im Raum durch Belegung eines Voxels zugewiesen. Die Änderung der Position wird über geometrische Schnittbedingungen (Löffelraum im Arbeitsraum, oder Löffelraster im Bodenraster) oder basierend auf analytischen Ansätzen, z.B. Wurfparabel, erreicht und als Zustandsänderungen im Voxelraster realisiert.

Dieser Modellansatz hat neben den genannten folgende Vorteile:

- Die Eigenschaftsbelegung eines Voxels ist frei zu gestalten.
- Eine weitere Unterteilung ist möglich. So können z.B. Teilchenüberführungen feiner gestaffelt werden, wenn ein zusätzlicher Verwaltungsspeicher eingeführt wird.
- Durch Zuordnung zu Verwaltungsbereichen erhöht sich die Effizienz der Datenbearbeitung, was sich vor allem in der Bearbeitungsdauer von Suchalgorithmen niederschlägt.
- Da die Oberfläche nicht rekonstruiert werden muß, entstehen aus dem Raster keine Nachteile für die Flächenabbildung (Zugehörigkeiten etc.).

Es ist festzustellen, dass eine Boden-Maschine-Interaktion in einer Simulation mit der Verwendung von Rastermodellen möglich ist. Der starre Rasteraum liefert zwar eine nach Rastergröße entsprechend grobe Beschreibung, gewährleistet aber eine sichere Handhabung von Bewegungsvorgängen. Nach der Aufgabe der Simulation lassen sich sowohl geometrische als auch physikalische Informationen verankern und austauschen. Wobei diese Rastervorstellung nur eine weitere Modellebene bildet, da bereits das Schüttgut, hier der Boden, modellhafte Annahmen mit Vereinbarungen in sich trägt (Festkörpermodell etc.). Es sind also mehrere Abstraktionsebenen zu unterscheiden und in der gegenseitigen Beeinflussung zu berücksichtigen.

5 Modellberechnung

Die effiziente Berechnung der Modelle stellt die wesentliche Herausforderung der Echtzeitsimulation dar.

Ein hohes Potential bei der Reduzierung des Rechenaufwandes ist durch die Anwendung von Codegeneratoren gegeben. Die so abgeleiteten modellspezifischen Berechnungsroutinen können viel wirkungsvoller optimiert werden, als allgemeingültige. Als Codegeneratoren bieten sich die angesprochenen mathematisch-technischen Programme an. Sehr vorteilhaft ist dabei die Möglichkeit der analytischen Differentiation. Das als Codegenerator eingesetzte Maple wirkt dabei als Blackbox mit einer Eingabe mathematischer Ausdrücke (Matrizenoperationen) und einer wahlweisen Ausgabe in C-, Fortran- oder Javaquellcode. Dieser Quellcode ist schleifenfrei und durch automatische Substitutionsmechanismen optimiert.

Der Wirkungsgrad dieser Mechanismen ist wesentlich von der Gestaltung der Eingabedatei abhängig. Im Test konnten so bis zu 10% der Rechenoperationen gespart werden.

Von hoher Bedeutung für die Echtzeitfähigkeit der Simulation ist die angewandte numerische Methode. Sie lässt sich anhand der Modelleigenschaften aus den zur Verfügung stehenden Verfahren auswählen.

- Aufgrund der Interaktion mit dem Bediener ist das Vorhandensein einer oft differenzierbaren rechten Seite des DGL-Systems nicht gewährleistet. Es ist demnach nicht sinnvoll, Mehrschrittverfahren zu implementieren.
- Die Modellbildung hydraulischer Antriebe führt ebenso wie die Berücksichtigung von Reibung und Traktionsverhalten zu steifen Differentialgleichungen. Aus Gründen der Stabilität sollten implizite Verfahren eingesetzt werden.

Zur Verfügung stehen demnach das implizite Euler-Verfahren, sowie implizite Runge-Kutta-Verfahren (3/4). Eine sehr übersichtliche Art der Implementierung des impliziten Euler-Verfahrens ist in 7/ gegeben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Allgemein lässt sich feststellen, dass die durch existierende Software gegebenen Möglichkeiten der Simulation einer komplexen Maschine sehr beschränkt sind. Spezielle Programme decken nur einen Teil der Aufgabenstellung ab und verfügen meist nur über unzureichende Schnittstellen zu den benötigten zusätzlichen Systemen. Die Formulierung der Modelle mit mathematisch-technischer Software löst zwar das Problem der Flexibilität, wirft aber neue Fragen hinsichtlich der Übersichtlichkeit und Effizienz der Berechnung auf.

Eine mögliche Herangehensweise ist die Anwendung von Codegeneratoren. Diese sind in der Lage, auf der Basis problem- und modellspezifischer Optimierungen effiziente Simulationsprogramme zu erstellen. Die Leistungsfähigkeit der erzeugten Quellcodes ist im Detail noch nachzuweisen.

Dabei sind die zur Übersetzung in Maschinsprache notwendigen Compiler in die Betrachtungen einzubeziehen. Weiterhin ist es erforderlich, die für die Eingabe in die Codegeneratoren notwendigen Modellinformationen zu verallgemeinern und mit dem technischen Entwurf zu verbinden. So lassen sich Werkzeuge schaffen, welche die Informationsmöglichkeiten während der Produktentwicklung wesentlich erweitern.

7 Literatur

- 1/1 Bossel, Hartmut: Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; ein Lehr- und Arbeitsbuch / Hartmut Bossel - 2., veränd. Auflage mit verbesserter Simulationssoftware. - Braunschweig; Wiesbaden : Vieweg, 1994
- 1/2 Hardtke, Hans-Jürgen: Lehr- und Übungsbuch Technische Mechanik, Band 2: Kinematik/Kinetik - Systemdynamik - Mechatronik / Hans-Jürgen Hardtke, Bodo Heimann, Heinz Sollmann - 1. Auflage - München; Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 1997
- 1/3 Eich-Soellner, Edda: Numerical methods in multibody dynamics / Edda Eich-Soellner, Claus Führer - Stuttgart: Teubner, 1998
- 1/4 Hairer, Ernst: Solving Ordinary Differential Equations II - Stiff and Differential-Algebraic Problems / Ernst Hairer, Gerhard Wanner - Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1991
- 1/5 Ruff, Klaus: Fahrzeugbewegung im Gelände mit dem Simulationssystem ORIS / Klaus Ruff - Dissertation - Universität der Bundeswehr Hamburg, Institut für Kraftfahrwesen und Kolbenmaschinen, 1997
- 1/6 Kunze, Günter: Baumaschinen: Erdbau- und Tagebaumaschinen / Günter Kunze, Helmut Göhring, Klaus Jacob, Martin Scheffler [Hrsg.] - Braunschweig; Wiesbaden - Vieweg, 2002
- 1/7 Baraff, David: Large Steps in Cloth Simulation / David Baraff, Andrew Witkin - SIGGRAPH 98, Orlando, July 1994

Prof. Dr.-Ing. habil. Günter KUNZE
Technische Universität Dresden
Professur für Baumaschinentechnik
Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik
01062 Dresden
email: kunze@ifbl.tu-dresden.de

Dr.-Ing. Ines GUBSCH
Technische Universität Dresden
Professur für Baumaschinentechnik
Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik
01062 Dresden
email: gubsch@ifbl.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Timo PENNDORF
Technische Universität Dresden
Professur für Baumaschinentechnik
Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik
01062 Dresden
email: penndorf@ifbl.tu-dresden.de

Diskussion

Prof. S. Klöcker

Sie haben da eine Umgebungsdarstellung realisiert, haben sie Erfahrungen aus der Spielewelt dafür genutzt?

Dr. I. Gubsch

Zumindest haben wir die bessere Visualisierung aus der Spielewelt im Bewusstsein. Dieser Part ist aber von Dornier zugeliefert. Darauf hatten wir keinen Einfluss. Die Multimediensinformatiker haben schon Benchmarks laufen lassen und geschaut, was geht, denn so ganz zufrieden sind wir noch nicht.

Prof. S. Klöcker

Die Interaktionsmechanismen der Spielewelt sind doch schon alle entwickelt und zwar in einer anderen Qualität.

Dr. I. Gubsch

Der Simulator ist interdisziplinär. Der erste Schritt ist eine Belegarbeit der Multimediensinformatiker, die nächsten großen Sprünge sind Studentenideen und -arbeiten.

Als Maschinenbauer sind mir andere Dinge momentan wichtiger. Beim Benutzen fällt das Visuelle hinter Bewegungen und Sound zurück

Prof. K. Brökel

Erster Hinweis, es gibt einen Schiffssimulator in Warnemünde, wo die Bewegung durch Software und nicht Hardware simuliert wird.

Dr. I. Gubsch

Man verlagert nur die Probleme.

Prof. K. Brökel

Ich nehme an, dass bei Ihnen die Bewegungsgleichungen das Problem sind und diese in Echtzeit zu berechnen. Aber so kompliziert sehen die doch gar nicht aus, wo ist das Problem?

Dr. I. Gubsch

Der Code im Maple wird 9h übersetzt, also das Problem war wirklich die Echtzeit, das Eingeben von Steifigkeiten und Unstetigkeiten in den Differentialgleichungssystemen. Wir haben verschiedene Wege versucht und der jetzige ist sicher nicht der letzte.

Prof. K. Brökel

Am besten ist doch sicher, selber zu programmieren?

Dr. I. Gubsch

Keine Frage - das geht nicht anders.

Prof. G. Höhne

Ich habe noch eine Frage zur Voxelung. Das wird ja nun noch für andere Zwecke genutzt. Was benutzen sie oder ist ihre Lösung selbstgemacht?

Dr. I. Gubsch

Wir haben uns das nicht alles ausgedacht. Wir haben die Grundlagen übernommen und mit Informatikern und Geoinformatikern die Algorithmen erstellt. Mit einer Firma in Baden- Baden arbeiten wir weiter an den Schwachstellen. Die Diskretisierung ist eine Schwachstelle, auch die Grabkräfte sind schwierig mit dem Force Feedback.

Dr. R. Wegmann

Eine etwas ähnliche Frage. Es ist nicht nur das Graben, sondern auch das Fahren, Einsacken in die Erde, das Fahren auf der Baustelle und das Abrutschen auf der Baustelle.

Dr. I. Gubsch

Ja, noch ist das System dazu nicht fähig, aber es schließt dies nicht aus. Aus der Historie kommt von Dornier der Modus „Fahren“, und als Mehrkörpersystem wollen wir den Modus „Arbeiten“. Danach können wir dann ein neues Modell erarbeiten. Zum „Wegrutschen“ arbeiten wir gemeinsam mit einer Hamburger Firma, denn der Rad-Boden Kontakt ist eine Wissenschaft für sich.

Dipl.-Ing. Cantow

Was kann dieser Simulator, wie offen ist das System? Kann man Schiffe, Bagger simulieren? Sie kennen ja die Firma aus Dresden, die das ganze am Bildschirm simulieren kann.

Dr. I. Gubsch

Wir arbeiten da zusammen, die wollen den Echtzeitsimulator und die neue Version ist wirklich gut, aber noch nicht fertig. Dornier baut Simulatoren für Züge, Flugzeuge und Lkw . Unserer kam von der Bundeswehr. Der Simulator ist so offen, dass wir eigene Systeme einbringen, programmieren und visualisieren können. Die erste Änderung geht auf Linux zu.

Ansatz zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit von FEM-Simulationen

Prof. Dr.-Ing. Christian WEBER, Dipl.-Ing. Rüdiger MAUS

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD (LKT), Universität des Saarlandes

Abstract

In einem immer stärker in der virtuellen Welt angesiedelten Produktentwicklungsprozess werden Bauteile und ganze Baugruppen zahlreichen (u.a. FEM-)Simulationen unterzogen. Die ständig leistungsfähiger werdenden Software-Lösungen bieten eine unüberschaubare Vielfalt an Möglichkeiten, ein und dasselbe Bauteil in verschiedenen Umgebungen zu simulieren. Darüber hinaus sind die Einstellmöglichkeiten bei der Simulation sehr groß, so dass es immer schwieriger wird, sie nachzuvollziehen und somit zu verifizieren. Im vorliegenden Artikel werden erste Ansätze vorgestellt, mit denen es mittel- oder langfristig möglich ist, Simulationsmodelle und -ergebnisse weitgehend automatisiert zu dokumentieren und zu vergleichen.

Keywords

FEM, Simulation, Nachvollziehbarkeit, Dokumentation

1 Einleitung

Produkte werden zu immer größeren Teilen in einer virtuellen Umgebung entwickelt. Ziel ist es, physikalische Prototypen erst in einer möglichst späten Phase des Entwicklungsprozesses einzusetzen. Dazu müssen die früher obligatorischen Versuche mit realen Bauteilen und Baugruppen durch Simulationen – mit Hilfe von rechnerunterstützten Systemen etwa zur Finite-Elemente-Analyse oder zur Kinematik-Simulation – ersetzt werden. Dadurch kann sowohl das Verhalten einzelner Bauteile als auch das Zusammenwirken komplexer Produkte bis hin zu kompletten Fahrzeugen oder Flugzeugen im Voraus abgeschätzt werden, um gegebenenfalls Einfluss auf die Entwicklung zu nehmen. Das dadurch bereits erschlossene Einsparpotential ist sehr groß, sowohl in Bezug auf die für die Produktentwicklung benötigte Zeit („Time-to-market“) als auch in Bezug auf die Entwicklungskosten.

Darüber hinaus sind für viele Produkte mittlerweile Gewährleistungen über Jahre oder gar Jahrzehnte hinweg gesetzlich vorgeschrieben oder zu einem wichtigen Wettbewerbsfaktor geworden. Daher ist es wichtig, auch nach längerer Zeit Simulationen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Produktentwicklung gehabt haben, nachzuvollziehen zu können. Häufig ist der ehemalige Bearbeiter eines Projektes nicht mehr verfügbar oder Simulationen und Berechnungen sind von einem externen Dienstleister durchgeführt worden. Auch für sehr gut ausgebildete Spezialisten ist es dann nahezu unmöglich, eine Simulation mit ihren schier endlosen Einstellmöglichkeiten nachzuvollziehen, um eventuelle Schwachstellen im Modell aufzudecken oder gar Fehler bei der Vorgehensweise ausfindig zu machen.

Durch iterative Verfeinerungen oder unterschiedliche Randbedingungen werden für ein Bauteil oder eine Baugruppe häufig mehrere Simulationen durchgeführt und abgelegt. Dabei stellt das neueste Modell nicht zwangsläufig den weiter verwendeten Stand dar. Gerade bei Verfeinerungen des Modells ist es dann sehr mühsam, die Abweichungen zwischen zwei Modellen zu bestimmen, um Unterschiede in den Berechnungsergebnissen nachvollziehen zu können. Schließlich können mit Hilfe einer gut dokumentierten Simulation wesentlich einfacher Optimierungen am Bauteil (z.B. bei einem Schadensfall oder im Rahmen der Produktpflege) vorgenommen werden und bei zukünftigen Bauteilen bewährte Vorgehensweisen wieder verwendet werden.

Eine weit verbreitete Klasse der Simulationstools sind die Systeme zur FEM-Analyse, weshalb sich dieser Beitrag beispielhaft mit dem FEM-System MSC.MARC/Mentat befasst.

2 Lösungsansatz

Während die Möglichkeiten zur Simulation von Bauteilen und -gruppen immer detaillierter und weit reichender werden, beschränkt sich die Dokumentation derzeit noch immer auf eine Veranschaulichung und Auswertung der Ergebnisse. Die Modellbildung, die zu diesen Ergebnissen führt, ist aber mindestens ebenso wichtig, da – wie im Folgenden gezeigt wird – schon kleine Änderungen am Simulationsmodell das Ergebnis maßgeblich beeinflussen können. In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, um sowohl das Simulationsmodell als auch die Simulationsergebnisse nachvollziehbar zu dokumentieren.

In früheren Arbeiten zu dieser Problematik (z.B. [Heynen2001]) wird eine starke aktive Beteiligung der Produktentwickler vorausgesetzt, was zwangsläufig Akzeptanzprobleme mit sich bringt. Deshalb soll durch die hier vorgestellte Vorgehensweise der Konstrukteur, der ja immer häufiger auch FEM-Simulationen selbst durchführt (Stichwort „Front loaded design“), nicht mit weiteren Aufgaben belastet werden. Stattdessen wird eine weitestgehend automatisierte Dokumentation der Modellentstehung und der Simulationsergebnisse angestrebt, um eine Nachvollziehbarkeit einzelner und ein Vergleichen mehrerer (z.B. iterativ verbesserter) Simulationen zu ermöglichen bzw. wesentlich zu vereinfachen. Abbildung 1 verdeutlicht den Datenfluss in der angestrebten Lösung.

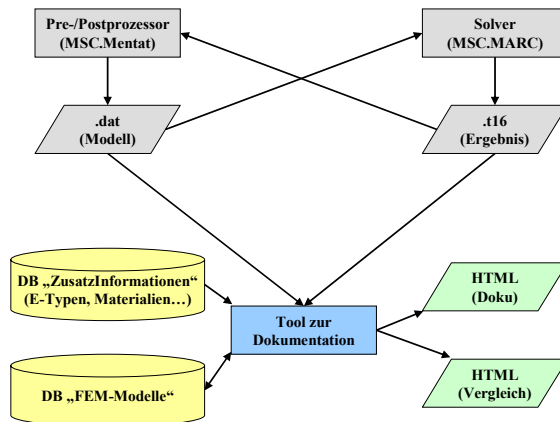


Abbildung 1: Datenfluss in der geplanten Dokumentationslösung

Die Ursachen für unterschiedliche Simulationsergebnisse werden zunächst in drei deutlich voneinander trennbare Bereiche eingeteilt:

- Unterschiede in der Geometrie
- Unterschiede in der Vernetzung (bei gleicher Geometrie)
- Unterschiede in der Modelldefinition (bei gleicher Geometrie und Vernetzung)

Der erste Fall ist durch den Vergleich des zugrunde liegenden CAD-Modells erfassbar, wozu bereits erste kommerzielle Lösungen vorliegen [WWW_EDS]. Hierauf wird im Folgenden nicht mehr näher eingegangen. Die zwei anderen Fälle gehören eindeutig in die FEM-Umgebung. Der Vergleich von Modellen mit unterschiedlicher Vernetzung setzt aber bereits Kenntnisse über den grundsätzlichen Aufbau von Simulationen und die Einflussfaktoren voraus. Eine Untersuchung zu den Unterschieden in der Modelldefinition bei gleicher Geometrie und Vernetzung ist aber problemlos unabhängig durchführbar, so dass zunächst mit grundlegenden Untersuchungen zu den Einflüssen der weiteren Parameter auf das Ergebnis einer FEM-Simulation begonnen werden kann.

Dazu werden die Auswirkungen einzelner Berechnungsparameter auf das Simulationsergebnis überprüft; später können somit auch quantitative Rückschlüsse von der Modellierung auf das Ergebnis gezogen werden. Parallel dazu wird eine Möglichkeit gesucht, eine Klartext-Dokumentation des mit der FEM modellierten Bauteils und der Berechnungsergebnisse (teil-)automatisch zu generieren, wobei auf das Simulationsmodell und die Ergebnis-Dateien zurückgegriffen wird. Diese Analysen werden zunächst für einfache Geometrien durchgeführt, wobei die zu erwartenden Ergebnisse nach Möglichkeit durch eine zusätzliche analytische Berechnung verifizierbar sein sollen.

Die Spielräume für die Definition einer Simulation derselben Geometrie und Vernetzung mit demselben Belastungsfall sind bereits sehr groß. Einige allgemein gültige Beispiele sind:

- Art der Kräfteinleitung (Druck oder Punktlast)
- Materialeigenschaften (isotrop oder anisotrop, linear oder nichtlinear)
- Elementtypen/Ansatzfunktionen (linear oder quadratisch, (in-)kompressibel)
- zeitliche Definition der Kräfte (Rampe oder Sprung, Zahl der Inkremente)
- weitere Berechnungsparameter (z.B. "Assumed strain"*, "Updated Lagrange Proc."*)

(* Beispiele aus dem FEM-System MSC.MARC/Mentat)

Schon die Änderung eines einzigen dieser Parameter (z.B. des Elementtyps) kann Unterschiede im Ergebnis von etwa 50% bewirken. Das zeigt, dass mittel- bis langfristig eine bessere Dokumentation von Simulationsmodellen und -ergebnissen unverzichtbar ist.

Berechnungsmodell und Simulationsergebnis sollen dazu automatisch ausgewertet und die vorgenommenen Einstellungen strukturiert in einer Datenbank abgelegt werden. Als Format für die aus dieser Datenbank generierte Dokumentation bietet sich das HTML-Format an, weil es gegenüber Standard-Office-Formaten folgende wichtige Vorteile bietet:

- Zukunftssicherheit, Zugriff über Intranet/Internet mit Webbrowser (frei verfügbar)
- unabhängig von der verwendeten Rechner-Plattform
- einfaches Einbinden von Screenshots, Bildern, Tabellen, Abbildungen
- Verknüpfung von Dokumenten untereinander, dadurch Zugriff auf „Knowledge“-Datenbank mit weiterführenden Informationen (Elementtypen und -klassen, Materialmodellen, Optionen usw.) möglich
- kleine Dateigröße
- leicht generierbar, da einfacher ASCII-Code

Aufgrund dieser Vorteile wird im weiteren Artikel das HTML-Format als Implementierungsmöglichkeit vorausgesetzt. Als Datenbank soll eine ebenfalls WEB-fähige SQL-Datenbank dienen, in der die Modelle dauerhaft gespeichert werden können. Dies ermöglicht eine Generierung der Berechnungsdokumentation zum Zeitpunkt des Aufrufs, wodurch sichergestellt werden kann, dass die angezeigte Dokumentation dem aktuellen Stand der Datenbank entspricht. Außerdem können vor der Anzeige des Berichts benutzerspezifische Voreinstellungen übernommen oder Optionen für die Anzeige gewählt werden. Damit ist eine Anpassung des angezeigten Berichts möglich, ohne jede Variante einzeln speichern zu müssen.

3 Anwendungsbeispiel

Im Folgenden werden anhand eines geometrisch einfachen Beispiels die Probleme bei der FEM-Modellierung erörtert und wird die geplante Funktionsweise zur Verbesserung der Dokumentation vorgestellt.

Als maßgebliche Berechnungsergebnisse werden hierbei die maximalen Verformungen und Spannungen des berechneten Bauteiles zugrunde gelegt.

Als Berechnungsmodell dient ein einfacher „Biegebalken“ mit folgenden Kenngrößen:

- Geometrie: $B \times H \times L = 20 \times 50 \times 1000 \text{ mm}$
- Material: Stahl S235JR (St 37-2)
Elastizitätsmodul 210.000 N/mm^2
Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$
- Randbedingungen: feste Einspannung am linken Ende
vertikale Kraft von 500 N am rechten, freien Ende

Die analytische Berechnung liefert eine maximale Durchbiegung von $3,81 \text{ mm}$ am belasteten Ende, die maximale Spannung an der Einspannstelle liegt bei $60,01 \text{ N/mm}^2$.

3.1 FEM-Modellierung

Zunächst wird in Preprozessor MSC.Mentat die Geometrie des Balkens modelliert und ein einzelnes Hexaederelement erzeugt. Nach Einstellung der Materialkennwerte (Stahl-Standards) und Randbedingungen (Einspannung und vertikale Kraft) wird eine erste Simulation mit dem Solver MSC.MARC durchgeführt. Dabei ergeben sich eine Durchbiegung von $2,80 \text{ mm}$ und eine maximale Spannung von $15,14 \text{ N/mm}^2$. Diese Werte liegen sehr weit von den analytisch ermittelten entfernt. Anschließend werden drei Einstellmöglichkeiten geändert, um die Unterschiede in den Berechnungsergebnissen zu dokumentieren:

- Elementanzahl (1, 10, 1000)
- Elementtyp (7, 117 jeweils Hexaederelemente mit 8 Knoten)
- Zusatzoptionen für die Berechnung (Assumed strain, Updated Lagrange Procedure)

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die geänderten Parameter und die dazugehörigen Simulationsergebnisse in der Übersicht. Man erkennt, dass der zweite Elementtyp „117“ zwar bei derselben Vernetzung (mit 10 Elementen) für die Durchbiegung Ergebnisse liefert, die wesentlich näher an der analytischen Lösung liegen. Die berechnete Spannung liegt aber sehr weit vom analytischen Ergebnis entfernt. Durch Verwendung der Zusatzoption „Assumed strain“ beim Elementtyp „7“ erreicht man schließlich die am Ehesten der analytischen Lösung entsprechenden Werte.

Tabelle 1: Vergleich der Ergebnisse bei verschiedenen Einstellungen

Elementtyp/Anzahl		Zusatzoptionen		Ergebnisse		Abweichungen*	
		AS	UL	max. DB [mm]	max. Spg. [N/mm ²]	max. DB [%]	max. Spg. [%]
analytisch				3,81	60,01		
7	1	X		2,80	15,14	27	75
7	10			1,43	19,67	62	67
7	10	X		3,78	32,5	1	46
7	1000			3,72	56,66	2	6
7	1000	X		3,81	62,53	0	4
117	1		X	2,77	1,06	27	98
117	10		X	3,77	0,87	1	99
117	1000		X	3,81	47,49	0	21

AS: Assumed strain, verbesserte Abbildung von Scherbeanspruchungen

UL: Updated Lagrange Procedure

max. DB: maximale Durchbiegung, am belasteten Ende des Balkens

max. Spg.: maximale Vergleichsspannung nach von Mises

* Abweichungen vom analytisch ermittelten Ergebnis

3.2 Automatisierte Dokumentation

Diese Änderungen durch Überprüfung des Modells im Preprozessor zu finden ist schon in diesem einfachen Beispiel schwierig. Das hier vorgestellte Dokumentationswerkzeug greift den Datenaustausch zwischen Modellier- und Auswertungswerkzeug (Pre- und Postprozessor) und Gleichungslöser (Solver) ein. Beim hier behandelten FEM-System MSC.MARC/Mentat dient dazu das so genannte „MARC-Input-Deck“, in dem alle zur Simulation benötigten Werte und Einstellungen abgespeichert sind, und eine Ergebnisdatei mit den Verschiebungen.

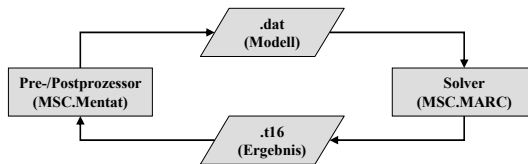


Abbildung 2: Datenfluss in MSC.MARC/Mentat

Da die Datei darüber hinaus ASCII-Format hat, bietet sie sich an, um die Einstellungen auszuwerten. Sie wird automatisch analysiert und die Informationen strukturiert in eine Datenbank eingetragen. Von dieser Datenbank ausgehend kann dann ein HTML-Datenblatt erzeugt werden, das eine vollständige Dokumentation des gewünschten Simulationsmodells und der zugehörigen Ergebnisse enthält. Dieselbe Datenbank dient auch als Ausgangspunkt für den Vergleich mehrerer Simulationen zu einem Bauteil.

Die vollständige HTML-Dokumentation enthält dabei folgende Informationen:

- Dateiname, Speicherort, Speicherdatum, Dateigröße
- Materialdaten
- Netzeigenschaften (Anzahl der Knoten, Elementtypen...)
- Randbedingungen, Belastungsfälle, Berechnungsparameter
- Berechnungsergebnisse

Die Dokumentation für die erste in der Tabelle hervorgehobene Variante des Balkens ist in Abbildung 3 dargestellt.

FEM-Dokumentation zu: Balken_V1.mud

Inhaltsübersicht:

- 1 Dates Informationen
- 2 Modell
 - 2.1 Geometrie
 - 2.2 Materialeinstellungen
 - 2.3 Netzeigenschaften
 - 3 Simulation
 - 3.1 Randbedingungen
 - 3.2 Belastungsfälle
 - 3.3 Berechnungsparameter
 - 3.4 Berechnungsergebnisse

1 Datei-Informationen:

Modell (Link)	Balken_V1.mud
Ergebnis (Link)	Balken_V1_ergebnis.tld
PFid	testoffenbau/balken/
Speicherdatum	27.08.2003
Dateigröße	10kB

2 Modell

- 2.1 Geometrie
- 2.2 Materialeinstellungen
- 2.3 Netzeigenschaften

2.1 Geometrie

2.2 Materialeinstellungen

Material 1:	Stahl_S235JR
- Materialart	iso200p
- Elastizitäts-Modul	210 000 N/mm ²
- Querkontraktionszahl	0,3
- Dichte	7,8 kg/dm ³
- Anzahl Elemente	1000

2.3 Netzeigenschaften

Anzahl Elemente	1000
Anzahl Knoten	1818
Elementart 1:	Hexaeder mit 8 Knoten
- Geometrie (E-3Klasse)	2
- Ansatzfunktion (E-1Typ)	1000
- Anzahl Elemente	2
- Material der Elemente (Anzahl)	Material 1, Stahl_S235JR (10)

3 Simulation

- 3.1 Randbedingungen
- 3.2 Belastungsfälle
- 3.3 Berechnungsparameter
- 3.4 Berechnungsergebnisse

3.1 Randbedingungen

festst_Einspannung	
F_y_500N	



- Randbedingung 1:**
- Art der Randbedingung
 - Größe in x-Richtung
 - Größe in y-Richtung
 - Größe in z-Richtung
 - zeitlicher Verlauf
 - Anzahl der Knoten
- Randbedingung 2:**
- Art der Randbedingung
 - Größe in y-Richtung
 - zeitlicher Verlauf
 - Anzahl der Knoten

3.2 Belastungsfälle (Loadcases)

- Belastungsfall 1:**
- Art der Belastung
 - Randbedingungen
- Inkrement
Simulierte Zeit

Einspannung_links	
Feste Einspannung	
0	
0	
0	
kein	
18	
Kraft variabel	
Punktlast (point load)	
je Knoten 250N	
insgesamt 500N	
kein	
2	

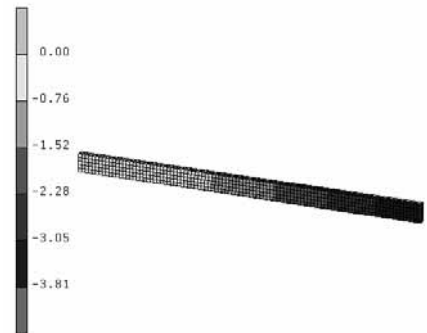
3.3 Berechnungsparameter

- Job 1:
- Berechnungsart
 - Berechnungsdimension
 - Belastungsfälle
 - Anzahl der Inkremente
 - Zusatzoptionen

Mechanisch (mechanical)	
3D	
Vorbelastung	
5	
Assumed strain	

3.4 Berechnungsergebnisse

Inc: 1
Time: 1.000e+000



- Job 1:
- Dauer der Berechnung
 - Beendigung der Simulation
 - Maximal auftretende Spannung
 - zugehöriger() Knoten
 - Maximal auftretende Verformung
 - zugehöriger() Knoten

2 Sekunden	
Erfolgreich (Exit code 3004)	
62,5 N/mm ²	
3,5,20	
3,8 mm	
2,8,193	

Abbildung 3: Dokumentation zum Balkenmodell

Im vorgesehenen HTML-Format können Verweise auf andere Standard-Dokumente realisiert werden, die weiterführende Informationen z.B. zu den verwendeten Elementtypen, Materialien oder Zusatzoptionen enthalten. Am Beispiel des verwendeten Elementtyps 7 demonstriert dies Abbildung 4.

Informationen zum Elementtyp 7

Allgemeine Informationen

Beschreibung	Standard-Elementtyp
Ordnung	8 Knoten
Elementklasse	Hexaederelemente mit 8 Knoten
Anmerkung	
Materialien (+)	fast alle
Materialien (-)	für Scherbeanspruchung (mit alternativen Interpolationsfunktionen möglich)
Eignung für Kontaktanalyse	gegenüber Elementen höherer Ordnung zu bevorzugen

Alternative Elementtypen für diese Elementklasse

E-Typ	Informationen
084	mit 9 Knoten für Druckbeanspruchung
117	8 Knoten, mit reduzierter Integrationsprozedur, Option Assumed strain integriert
120	9 Knoten, Option Assumed strain integriert

Abbildung 4: Zusatzinformationen am Beispiel des Elementtyps 7

3.3 Vergleich von Simulationsmodellen

Beim Vergleich (z.B. der Ergebnisse aus den in Tabelle 1 hervorgehobenen Varianten) kann dann gewählt werden, ob beide Dokumentationen vollständig (mit hervorgehobenen Unterschieden) oder nur die sich unterscheidenden Punkte angezeigt werden sollen. Abbildung 5 zeigt auszugswise das Ergebnis des Vergleichs für den ersten Fall, Unterschiede sind fett markiert.

FEM-Vergleich: Balken_V1.mud und Balken_V2.mud

1 Datei-Informationen:

Modell (Link)	Balken_V1.mud	Balken_V2.mud
Ergebnis (Link)	Balken_V1_beregnung.t16	Balken_V2_beregnung.t16
Pfad	test/femdocs/balken/	test/femdocs/balken/
Speicherdatum	27.08.2003	01.09.2003
Dateigröße	10KB	80KB

2.3 Netzzeigenschaften

Elementart 1:	Hexaeder mit 8 Knoten	Hexaeder mit 8 Knoten
- Orientierte (E-Klasse)	987 (wobei die Biegung)	117
- Anzahl Elemente (E-Typ)	1000 (alle)	1000 (alle)
- Anzahl Elemente	Material 1, Shell_3225SR (1000)	Material 1, Shell_3225SR (1000)

3.3 Berechnungsparameter

Job 1:		
- Berechnungsart	Mechanisch (mechanical)	Mechanisch (mechanical)
- Berechnungsdimension	3D	3D
- Belastungsfall	Verbrüstung	Verbrüstung
- Anzahl der Inkremente	1	1
- Zusatzoptionen		Assumed strain

3.4 Berechnungsergebnisse

Job 1:		
- Dauer der Berechnung	2 Sekunden	6 Sekunden
- Beendigung der Simulation	Erfolgreich (Exit code 3004)	Erfolgreich (Exit code 3004)
- Maximal auftretende Spannung	62,5 N/mm²	47,49 N/mm²
- zugehörige(n) Knoten	3,3,39	3,3,39
- Maximal auftretende Verformung	3,81 mm	3,81 mm
- zugehörige(n) Knoten	2,8,195	2,8,195

Abbildung 5: Unterschiede zwischen zwei Simulationen

Somit kann schnell ermittelt werden, worin sich die Modelle unterscheiden. Davon ausgehend können dann die Ursachen für Unterschiede in den Berechnungsergebnissen gesucht und das besser geeignete Modell für weitere Betrachtungen verwendet werden.

3.4 Wiederverwendung von Simulationsmodellen

Mit einer exakten Dokumentation ist es auch wesentlich einfacher, bei wiederkehrenden Bauteilen Erfahrungen aus vorangegangenen Entwicklungen wieder- oder weiter zu verwenden. Dazu wäre eine Erweiterung der Dokumentation um Kommentare des Bearbeiters erforderlich, so dass auch getroffene Entscheidungen begründet und nachvollzogen werden können.

4 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Ansatz kann ein Schritt in Richtung einer umfassenden Nachvollziehbarkeit von FEM-Simulationen gemacht werden. Es wurde gezeigt, dass bereits minimale Unterschiede bei der Modellierung und den Einstellungen der Simulationssoftware das Berechnungsergebnis in erheblichem Maße beeinflussen können. Da Unterschiede in der Modellierung im Nachhinein schwer aufzudecken sind, können die vorgestellten Möglichkeiten zur Klartext-Dokumentation und zum Vergleichen verschiedener Modelle dabei helfen, FEM-Simulationen auf Sinnhaftigkeit zu überprüfen und Fehler zu vermeiden. Idealerweise sollte das Dokumentationswerkzeug direkt im FEM-System eingebunden sein, was einen noch einfacheren Zugriff auf die Einstellungen ermöglichen würde.

Im weiteren Verlauf werden die Untersuchungen zunächst auf den Vergleich geometrisch gleicher, aber unterschiedlich vernetzter Modelle ausgeweitet. Dazu müssen z.B. bei den Randbedingungen anstatt der Knoten der Krafteinleitung die Koordinaten dokumentiert werden, also ein Rückschluss von der Vernetzung auf die Geometrie erfolgen.

Eine Übertragung auf andere Simulationswerkzeuge würde voraussetzen, dass ein vergleichbar einfacher Zugriff auf die Modelldaten möglich ist. Das von der ISO entwickelte STEP-Format könnte es sogar ermöglichen, das Werkzeug zur Dokumentation von Simulationen in einer vollkommen heterogenen Systemlandschaft einzusetzen.

Literatur

- [WWW_EDS] <http://www.sdrc.de/produkte/tc/visualization/view.shtml>
- [Heynen_2001] Dipl.-Ing. Christoph Heynen
Wissensmanagement im Berechnungsprozess der Produktentwicklung
Fortschritt-Bericht VDI
Konstruktionstechnik/Maschinenelemente, Nr. 341
VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001

Prof. Dr.-Ing. Christian Weber
Dipl.-Ing. Rüdiger Maus
Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD (LKT)
66123 Saarbrücken
email: Weber@CAD.Uni-Saarland.de, Maus@CAD.Uni-Saarland.de

Diskussion

Prof. S. Klöcker

Sie bauen ja eine eigene Umgebung (*Anm. des Vortragenden: Datenbasis*) auf und haben zum Schluss STEP erwähnt. Das ist ja nun genau zum Abspeichern von solchen Berechnungsdaten gedacht.

Dipl. R. Maus

Ja, ich bin mir aber nicht sicher, inwieweit Feinheiten der einzelnen Systeme berücksichtigt werden können. Die Geometrie und Vernetzung auszutauschen, ist heute schon Stand der Technik. Das geht im Prinzip auch über andere Schnittstellenformate. Aber ob einzeln einstellbare Optionen und Elementtypen und -ansatzfunktionen, die dahinter liegen, von einer zur anderen Software übernommen werden können, das stelle ich mir recht schwierig vor.

Prof. K. Brökel

Im Prinzip ist es völlig egal, ob ich aus einem STEP-File oder einem anderen ASCII-File die Daten auslese. Wie machen sie das konkret? Wie holen sie aus einem ASCII-File die Informationen für die HTML-Aufbereitung?

Dipl. R. Maus

Da es ein normales ASCII-Format ist, wird der Text durchsucht, z.B. die Elemente gezählt, festgestellt, wie viele Elemente zu welchem Elementtyp gehören, wie viele Elemente das Modell insgesamt hat, auf welche Knoten die Kräfte wirken. Daraus kann man schließen, wo diese geometrisch wirken, und auch die Randbedingungen und Materialeinstellungen sind im Klartext abgelegt. So ist es jedenfalls bei MARC/Mentat.

Prof. K. Brökel

Sie haben also eine eigene Routine geschrieben, die das ASCII-File durchsucht?

Dipl. R. Maus

Ja, im Moment ist sie aber noch sehr eingeschränkt auf einige Elementtypen und ein paar Optionen.

Prof. K. Brökel

Da stellt sich die Frage, ob es auch fehlerfrei funktioniert, oder ob es Mehrdeutigkeiten gibt, die zu Fehlinterpretationen führen können?

Prof. G. Höhne

Bei ANSYS wird ein File geschrieben, welches von der Reihenfolge der Modellierung abhängt, also wann wird die Geometrie modelliert und wann das Material zugewiesen. Man kann das nicht eindeutige File dann aber bereinigen, und es würde ein vergleichbares File entstehen, wie Sie es auch verwenden.

Dipl. R. Maus

Ja, in MARC/Mentat ist der Aufbau immer gleich, egal wann man bestimmte Eigenschaften definiert hat. Ich habe noch kein File gesehen, das nicht eindeutig ist.

Prof. Rugenstein

Sie wollen gesammelte Erfahrungen für ungeübte Nutzer abspeichern. Ungeübte Nutzer sind ja Studenten. Haben sie mal probiert, ob das funktioniert? An einer anderen technischen Universität wurde das auch behauptet und dann waren an einer Spitzkerbe bedeutend geringere

Spannungen als an einer abgerundeten Kerbe - was ja unmöglich ist. Haben Sie bessere Erfahrungen?

Dipl. R. Maus

Das Ziel soll nicht sein, Geometrieinweise zu geben. Das Programm soll nicht sagen: Wenn du da eine Rundung platzierst, gehen die Spannungen runter. Es geht einzig um die Modelldefinition. Wenn man z.B. keinen Elementtyp einstellt bei MARC/Mentat, wird der Standard-elementtyp 7 verwendet. Es wird drauflos gerechnet, und die Ergebnisse sind einfach bescheiden. Der Nutzer muss noch viel interpretieren. Hier wollen wir Hilfestellung geben und sagen: Hier wurde früher ein anderer Elementtyp verwendet.

Da das Projekt erst drei Monate alt ist, haben wir aber noch keine Studenten dabei.

Prof. Rugenstein

Ich halte es für schwierig, Erfahrungen für ungeübte Nutzer hilfestellend abzuspeichern.

Dipl. R. Maus:

Wissen ist ja schwer greifbar. Die Idee zielt eher auf folgendes ab: wenn z.B. ein Achsträger einmal modelliert wurde, dann weiß man bei der nächsten Entwicklung, welche Einstellungen ideal waren und muss nicht wieder alles neu durchprobieren. Bei CAD ist es ja ähnlich. Da wird die alte Baugruppe kopiert. Für die neue Entwicklung werden dann die Komponenten im Prinzip oft nur geometrisch geändert. Um da auf Erfahrungen aus Versuchen oder ähnlichem zurückgreifen zu können, soll es möglich sein zu sagen: Wenn du dies oder das modellierst, nutze diese schon mal bei einem ähnlichen Teil verwendeten Einstellungen.

Prof. G. Höhne

Gibt es schon andere Anwendungen, bzw. haben sie Industriepartner zum Projekt?

Dipl. R. Maus

Ja, indirekt. Schon während Projekt- und Diplomarbeiten haben wir uns z.B. mit einer Blattfeder beschäftigt. Dann kamen nach 2 Jahren Anfragen, ob wir denn sicher sind bei einer Rechnung an einem bestimmten Modell. Wenn man den Ordner im Explorer öffnet und er 200 verschiedene Rechnungen und Modelle enthält, dann weiß man nicht sicher, welches Modell an den Kunden geliefert wurde. Eine Möglichkeit wäre dann, in dieser Datenbank zu suchen. Mit der Eingabe der maximalen Spannung kann man sich dann nur die entsprechenden Modelle herausfiltern. Oft probiert man ja im Laufe einer Berechnung nur etwas aus und schaut, ob bestimmte Parameter überhaupt etwas am Berechnungsergebnis ändern.

Prof. G. Höhne

Wie genau muss die Ausgangsgeometrie in der FEM sein oder wie grob darf eine Geometrie sein, um die Eigenschaften über ein FEM - Modell bezüglich der Festigkeit oder bezüglich des thermischen Verhaltens noch richtig zu erfassen? Muss ich dort alle Details wie Gewinde oder Fasen einbringen, und ab wann wird es gefährlich, wenn ich etwas vernachlässige?

Dipl. R. Maus

Es gibt noch keine exakten Modelle der Realität. Toleranzen sind hier ein großes Thema. Bei Mikrogeometrien ist es nicht egal, ob ich 10µm mehr oder weniger habe. Heute wird kaum ein Modell genau simuliert. Der Belastung entsprechend werden Fasen bei Wellen eigentlich generell weggelassen, denn diese erfordern ein ansonsten unnötig feines Netz mit vielen Elementen.

Prof. S. Klöcker

Da wäre ich doch vorsichtig. Es hängt vom Berechnungsproblem ab und davon, welche Ergebnisse Sie haben wollen. Wenn Sie ein Steifigkeitsproblem haben, dann können Sie so grob rechnen, dass ein 1-Element Balkenmodell das gleiche Ergebnis liefern müsste wie die analytische Lösung. Wenn sie aber Spannungen in einer Schraube berechnen wollen, dann haben Sie Kerbwirkungen und dann ist die Mikrogeometrie schon von großer Bedeutung. Fehler entstehen dadurch, dass die Methodik nicht von allen angewandt wird. Gerade, wenn man das von Pro/E aus macht, kommen falsche Ergebnisse heraus. Auch wenn sie Anwender haben, die zu wenig Background in der technischen Mechanik haben, kommen seltsamste Ergebnisse heraus. Erfahrungswissen ist daher eine wichtige Komponente, und es ist ja Ihr Ziel, dies zu erfassen.

Prof. S. Klöcker

Gibt es Eingabefelder wo gefragt wird: warum ich welchen Ansatz gewählt habe?

Dipl. R. Maus

Ja, es soll möglich sein, in der endgültigen Datenbank Zusatzinformationen abzulegen. Das erfordert dann aber ein aktives Handeln des Anwenders.

Lernprojekte zur Virtuellen Produktentwicklung an verteilten Universitätsstandorten

Prof. Dr.-Ing. Stephan KLÖCKER

Fachhochschule Gelsenkirchen, Abt. Bocholt

Keywords

Virtuelle Produktentwicklung, universitätsübergreifendes Gruppenprojekt, OneSpace-Tool, Lernplattform, CAx-Technologien

1. Einführung

Die Entwicklung neuer Produkte insbesondere in den Phasen der Produktfindung und Produktgestaltung setzt die Erschließung multipler Wissensbereiche voraus. In der universitären Primärqualifizierung wird hierzu das notwendige Grundlagenwissen sowie ein weitverzweigtes Methodengerüst für den Bereich Maschinenbau und verwandter Studiengänge vermittelt. Das Fach „Produktentwicklung“ enthält Grundlagenveranstaltung wie die Vermittlung des Technisches Zeichnens einschließlich CAD, Grundlagen der Gestaltung, Bauteilfestigkeit, Maschinenelemente und in weiterführenden Veranstaltungen werden die Bereiche Konstruktionsmethodik/Produktentwicklung, Life Cycle Design (Design for „X“) und vertiefte Kenntnisse in den Werkzeugen moderner Produktentwicklungsprozesse wie CAD (3D / parametrische Systeme), CAE, EDM/PDM und weitere CAx-Techniken vermittelt.

Gerade die zunehmende Virtualisierung in den Entwicklungsprozessen, aber auch die Verschärfung der Randbedingungen durch Globalisierung, Qualitätsorientierung, Kostendruck und Umweltfragen führt dazu, dass Lehrinhalte sich ständig verändern und neue Werkzeuge der Informations- und Kommunikationstechnik in diesem Bereich beherrscht werden müssen. Es ist also notwendig, dass bereits in der Primärqualifikation, eine entsprechende Methodekompetenz zur Produktentwicklung (Konstruktionsmethodik) Beherrschung der Werkzeuge (CAx-Technologien), die Fähigkeiten zur Teamarbeit und die Kommunikationsfähigkeit über Netzwerke, d.h. auch die Medienkompetenz geschult wird.

Der Beitrag beschäftigt sich mit universitätsübergreifenden Gruppenprojekten, die im Rahmen des Projektes im SS 2003 durchgeführt wurden und bei denen die o.g. Kompetenzen vermittelt werden sollten.

2. Zum Forschungsprojekt PRO-TEACH-NET

Das seit Anfang März 2001 laufende Verbundprojekt Pro-Teach-Net: *Netzbasierendes Management von Konstruktionswissen und multimediale Vermittlung innerhalb einer internetgestützten Lernumgebung*, hat zum Ziel universitätsübergreifend eine Lernumgebung zu schaffen, bei der die Studierenden auf vielfältige Lernformen und Medien zurückgreifen können und bei der die Lehrenden in der Medienaufbereitung und -bereitstellung unterstützt werden.

Dabei sollen insbesondere die umfangreichen Kommunikationsmöglichkeiten des Internets genutzt werden.

Es besteht nicht die Absicht, das Präsenzstudium durch ein Fernstudium zu substituieren, sondern, ganz im Gegenteil, die Präsenz durch Nutzung der neuen Medien, d.h. Kommunikation zwischen Lehrenden und Studierenden bzw. der Studierenden untereinander zu verbessern. (In diesem Zusammenhang wäre der Begriff „Präsenz“ allerdings neu zu interpretieren.) Die Kommunikation zwischen studentischen Lerngruppen stellt gleichzeitig ein neues Lernziel im Erlangen sozialer Kompetenzen dar, denn die Kommunikation von Arbeitsgruppen über Netzwerke spielt in modernen Unternehmen, die in verteilter Umgebung Produkte entwickeln und produzieren, eine besondere Rolle. Auf diese Gegebenheiten des zukünftigen Berufsfeldes von Maschinenbauern und Wirtschaftsingenieuren muss in der Primärqualifikation eingegangen werde. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Umgebung ist das kooperative Lernen in Arbeitsgruppen in Form von Produktentwicklungsprojekten.

2.1 Multimediale Lehrangebote für das Grundstudium

Grundlage der Festlegung für Unterrichtsmodule im Grundstudium waren jeweils die Curricula der beteiligten Hochschulen für den Studiengang Maschinenbau. In Bild 1 sind diese aufgeschlüsselt bzw. nochmals untergliedert. Die Module A bis D werden im wesentlichen als WBT begleitend zu den entsprechenden Vorlesungen bereitgestellt. In besonderen Fällen werden diese durch Übungen mit Mechanismen zur Selbstkontrolle ergänzt. Gleichzeitig sollen die für das Selbststudium konzipierten WBT bzw. die darin enthaltenen Darstellungen auch im konventionellen Vorlesungsbetrieb in Form von Präsentationen verwendet werden, u.a. auch um die Wiedererkennung zu unterstützen.

In Modul E wird, analog zum heutigen Übungsbetrieb, der einen großen Semester-Wochenstunden-Anteil in der Lehre des Grundstudiums umfasst, die praktische Umsetzung in Form von Gestaltungs- und Berechnungsübungen unterstützt.

Modul A bis C: Grundlagen		Modul D: Maschinenelemente		Modul E: Gestaltungsübungen, Aufgabensammlungen
A	Technische Darstellungslehre / CAD	D1	Schweißen, Löten, Kleben	Die Übungen und Aufgaben werden im wesentlichen an den CAD-Systemen in den Instituten durchgeführt. Individual- und Gruppenarbeit wird bei den Aufgabenstellungen ermöglicht. Sowohl angeleitete Übungen mit automatischer Erfolgskontrolle als auch komplexere Aufgaben mit individueller Lernkontrolle sind in diesen Lehrbausteinen enthalten.
B	Grundlagen der Gestaltung	D2	Federn	
C	Bauteilfestigkeit	D3	Schraubenverbindungen	
		D4	Weitere Verbindungselemente	
		D5	Wellen (Dauerfestigkeit)	
		D6	Welle-Nabe-Verbindungen	
		D7	Wälzlager	
		D8	Gleitlager	
		D9	Kupplungen	
		D10	Bremsen	
		D11	Getriebe und Zahnräder	
		D12	Weitere Antriebsselemente	

Abbildung 1: Elemente der Lernumgebung im Grundstudium Maschinenbau

Entscheidende Voraussetzung zur Abwicklung des Übungsbetriebs ist die Möglichkeit des Austausches von technischen Zeichnungen und anderen Dokumenten über das Internet (Intranet). Auf Seiten der Studierenden muss demzufolge CAD als grundlegendes Werkzeug zur Erstellung von Zeichnungen so früh als möglich, d.h. im ersten Semester beherrscht werden, damit ein sinnvoller und schneller Austausch von Zeichnungen durchgeführt werden kann. Entsprechend dem „Darmstädter Modell“ soll gleich zu Beginn auch das Arbeiten mit 3D-CAD-Systemen geschult werden. Die Systemschulung selbst ist aber nicht Gegenstand der Lernumgebung, da eine zu große Abhängigkeit von den vor ort verfügbaren Soft- und Hard-

ware-Ressourcen gegeben ist. Vielmehr werden im Rahmen der technischen Darstellungslehre die Grundzüge moderner CAD-Systeme in Form eines WBT vermittelt.

2.2 Multimediale Lehrangebote für das Hauptstudium

Die Multimedialen Lehrangeboten für den Bereich des Hauptstudiums sind in Bild 2 dargestellt. Auch hier sollen wiederum alternative Darbietungsformen des Lehrstoffes entwickelt werden, die, bezogen auf die klassischen Inhalte der Konstruktionslehre, als WBT angeboten werden. Die Module F1 bis F4 umfassen dabei den methodischen Teil, während unter G1 bis G7 die IT-Werkzeuge behandelt werden. In Modul J „Industrielle Produktentwicklungsprozesse“ werden aktuelle Fallbeispiele aus der industriellen Praxis und aus den praktischen Erfahrungen der Lehrenden dargestellt und auf die Lehrmodulen bezogen.

Unter Modul H werden Projekte zur virtuellen Produktentwicklung durchgeführt. Dies geschieht in der Form, dass universitätsübergreifende Gruppenprojekte stattfinden, bei denen die in den WBT-Modulen vermittelten Inhalte und erlernten Fertigkeiten aus Grund- und Hauptstudium zur Anwendung kommen. Ein besonderer Schwerpunkt dieser Projekte zur Produkt-

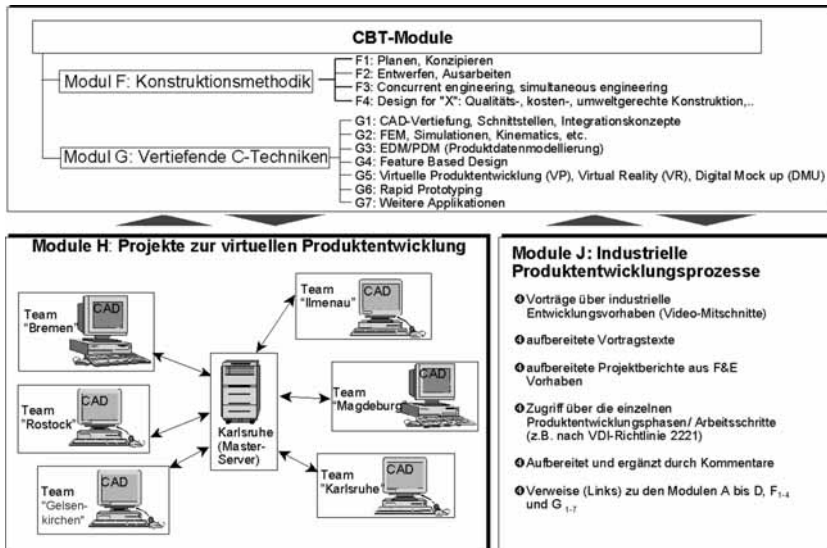


Abbildung 2: Module für das Hauptstudium

entwicklung liegt in der „verteilten Konstruktion“. An den jeweiligen Standorten werden auf studentischer Seite Projekt-Teams gebildet, die jeweils Komponenten einer komplexen Konstruktion generieren und über ein Intranet unter Nutzung unterschiedlicher Mechanismen kommunizieren. Es soll also mittels Prinzipien und Methoden zur virtuellen Produktentwicklung ein kompletter Entwicklungszyklus von der Anforderungsermittlung bis zur virtuellen Montage unter Nutzung der CAx-Werkzeuge durchlaufen werden. Ein entsprechendes Szenario, bestehend aus mehreren (virtuellen) Unternehmen und deren Strukturen bildet dabei die Grundlage.

Im folgenden soll insbesondere auf die Durchführung von universitätsübergreifenden Projekte (Modul H) und die damit verbundenen Erfahrungen eingegangen werden.

3. Die Projektaufgabe

Arbeitstitel: Automatische Einrichtung zum Konfektionieren von Kabeltüllen aus Schrumpfschlauch

Beschreibung: Schrumpfschläuche werden hergestellt, indem aus Kunststoffen (Polyolefin, PVC, PTFE) bestehende Schläuche erwärmt und im gedehnten Zustand abgekühlt werden. Aufgrund der Eigenschaft, dass sie sich nach einer nochmaligen Erwärmung wieder auf das ursprüngliche Maß zusammenziehen (schrumpfen) werden sie u.a. als Tüllen zur Beschriftung von Kabeln und Rohren sowie zur Abdichtung von Kabelanschlüssen verwendet.

Ein Hersteller elektrischer Anlagen, ein mittelständisches Unternehmen, plant den Aufbau einer automatisierten Produktionslinie für die Kabelkonfektionierung. Dafür werden unterschiedliche Kabeltüllen, Stücke von 10 ... 100 mm aus Schrumpfschlauch, zur Beschriftung der Kabelenden sowie zur Isolation von Kabelschuhen benötigt. Die Tüllen sollen der Konfektionierungsanlage in geordneter Form zugeführt werden. Die auf Rollen gewickelten Schläuche sind auf Länge zu schneiden und die Teilstücke so zu verbinden, dass diese, wiederum auf Rollen gewickelt, für eine Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen. Es bestehen gute Erfahrungen mit der Verarbeitung von elektronischen Bauelementen, die nach DIN EN 60286-1 ... 3 gegurtet sind. Für diesen Zweck ist eine Maschine, die bislang nicht am Markt verfügbar ist, mit folgenden Parametern zu entwickeln:

- Die Anlieferung des Materials erfolgt auf Rollen mit einem Aufnahmedurchmesser von 32 mm und einem Außendurchmesser von 500 mm
- Der Schlauchdurchmesser beträgt $\frac{1}{4}$ " bis 1"
- Die Längen der Teilstücke mit einer Toleranz von $\pm 0,3$ mm liegen zwischen 10 mm und 100 mm
- die Wandstärke beträgt ca. 0,2 mm
- es sollen etwa 5.000 Kabeltüllen pro Stunde geschnitten und aufgegurtet werden können
- der Einbau einer Beschriftungseinheit soll möglich sein
- die Tüllen sollen, angelehnt an DIN EN 60286-1 ... 3, aufgegurtet werden
- der Anlagenhersteller ist ein mittelständischer Betrieb mit ca. 200 Mitarbeitern und hat die technischen Kapazitäten für mechanische Fertigung, Gussteilherstellung und Montage
- Antriebe und Steuerungen sollen zugekauft werden
- es soll mindestens eine, maximal drei Anlagen gebaut werden.
- die Herstellungskosten sollen 100.000 € nicht übersteigen

4. Projektablauf

4.1 Inhaltliche Projektstruktur

Die inhaltliche Ausrichtung des studentischen Entwicklungsprojekts war durch Vorgaben im methodischen Vorgehen, durch die CAx-Werkzeuge sowie durch die Kommunikations- und Datenaustausch-Foren geprägt. Von den Lehrenden wurden die folgenden Arbeitspakete vorgegeben:

1. Aufgabenpräzisierung und Erstellen einer Anforderungsliste
2. Ermitteln des Standes der Technik über Internet sowie Literatur- und Patentdatenbanken
3. Erarbeiten von drei Varianten (Funktionsstruktur und technisches Prinzip) je Projektteam
4. Aufstellen von Bewertungskriterien sowie Bewertung der Varianten und Auswahl der optimalen Variante
5. Zerlegung der optimalen Variante in Teilsysteme entsprechend der unterschiedlichen Kompetenzen der Teilnehmer sowie Definition der Schnittstellen zwischen den Teilsystemen
6. technischer Entwurf eines der Teilsysteme als 3D - Modell unter Beachtung der Schnittstellen zu den anderen Teilsystemen
7. Kommunikation über die bereitgestellten Kommunikationsmittel Internet-Forum, Chat, E-mail, Videokonferenz
8. Abstimmung der Teilsysteme und Zusammensetzen zu einem Gesamtsystem
9. Dokumentation und Präsentation der Ergebnisse

4.2 Zeitlicher und organisatorischer Verlauf

Wie bei vielen Industrieprojekt üblich, ist der persönliche Erstkontakt für den späteren Projektverlauf von entscheidender Bedeutung. Alle beteiligten Studierenden der 6 Standorte wurden deshalb zu einem Kick-Off-Meeting eingeladen. Als Vorbereitung sollte an den einzelnen Standorten bereits die ersten drei Arbeitspakete bearbeitet sein, damit beim Treffen eine vorläufige Aufgabenverteilung und weitere Absprachen zum Projektverlauf getroffen

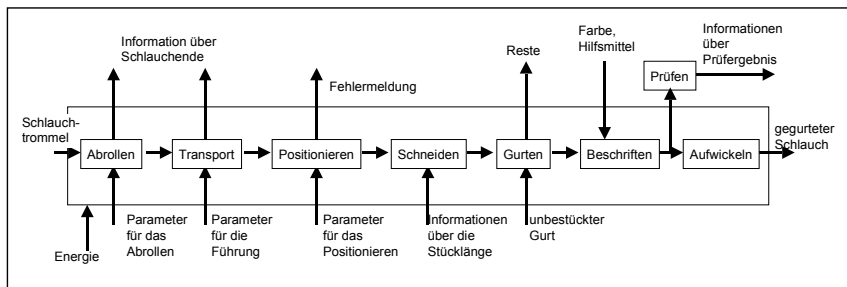


Abbildung 3: Funktionsstruktur als Grundlage zur Aufgabenverteilung

werden konnten. Es wurde u.a. vereinbart, dass von allen Teams ein Gesamtkonzept für die Konfektioniereinrichtung entwickelt wird, um so eine entsprechende bewertungsfähige Lösungsvielfalt zu erhalten. Erst danach sollten die endgültigen Arbeitspakete zur weiteren Ausgestaltung der Maschine den Projekt-Teams zugeordnet werden. Die Aufgabenverteilung wurde dann im wesentlichen anhand der Funktionsstruktur und entsprechend der Kompetenzen und Interessen festgelegt. Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei den Absprachen und in der Kommunikation konnte ein Lösungskonzept (technisches Prinzip) für die Gesamtmaschine entwickelt werden. Die folgende Ausgestaltung der einzelnen Funktionsträger oblag da-

nach den jeweiligen Teams, wobei eine Reihe von Absprachen z.B. zum Bauraum zu den Schnittstellen etc. notwendig waren. Hierbei fand eine rege Nutzung der Kommunikationsforen, insbesondere ein wöchentlich (moderierter) Chat und E-Mail-Kontakt jeweils mit Unterstützung der „Whiteboard“-Funktion statt. Die Akzeptanz zur Nutzung der implementierten Videokonferenz-Software war eher gering. Auch aus Sicht der Lehrenden erscheint der Aufwand im Vergleich zum Nutzen relativ zu hoch. Zum Datenaustausch der CAD-Files wurden die Möglichkeiten der Lernplattform genutzt. Trotz der vereinbarten Konventionen in der Dateibezeichnung wurde dieser Kommunikationsbereich sehr schnell unübersichtlich. Eine vorgegebene Struktur mit festgelegten Datenbankstrukturen ähnlich den PDM/EDM-Systemen ist hier notwendig. Mit dem OneSpace-Collaboration-Tool wurde gegen Ende der Projektlaufzeit im wesentlichen die geometrischen Kompatibilität der einzelnen Baugruppen (Bauraum) überprüft und ein Zusammenbau erzeugt. Wegen der begrenzten Zeit konnte diese Form der Kommunikation nicht tiefer genutzt werden. Die Kommunikation der Studierenden mit den jeweiligen Tutoren und Betreuern fand sowohl über die Plattform als auch im direkten persönlichen Kontakt statt. Insbesondere bei Problemen fachlicher wie organisatorischer Art bildete war dieser Kontakt eine ganz wesentliche Komponenten in der Projektarbeit.

5. Ausgewählte Projektergebnisse

Aus der Vielzahl der erzielten Projektergebnisse (Skizzen, 3D-CAD-Daten, Dokumentationen, Präsentationen und Prüfungsleistungen seien hier nur einige typische Resultate gezeigt. Die in Abb. 4a-d dargestellten technischen Prinzipien aus der Konzeptionsphase zeigen ein wenig die unterschiedliche Vorgehensweisen und Darstellungsformen. Hier machen sich die unterschiedlichen Lehrinhalte, deren Darbietungsformen und auch die Umfänge an Semesterwochenstunden an den beteiligten Hochschulstandorten bemerkbar. Während z.B. vom Team Ilmenau und Gelsenkirchen Lösungen für das technische Prinzip entwickelt werden, entwickeln das Team Rostock und Magdeburg bereits 3D-CAD Lösungen, die als Grundlage für den späteren Gestaltentwurf genutzt werden können.

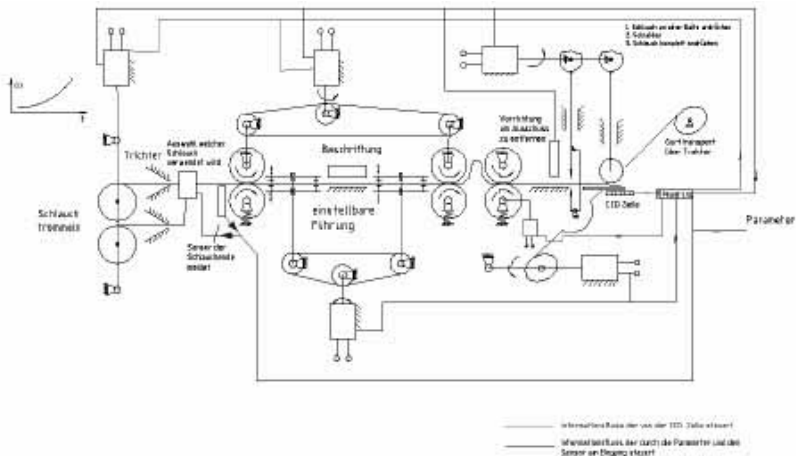


Abbildung 4a: Prinzip-Lösung des Teams Ilmenau

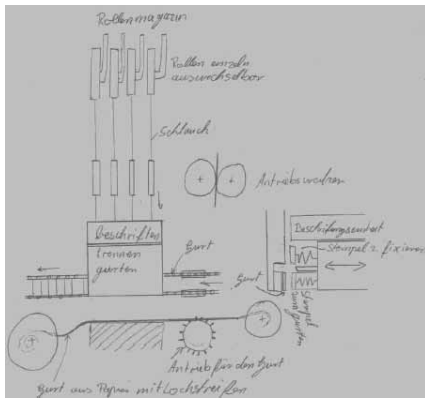


Abbildung 4b: Prinzip-Lösung des Teams Gelsenkirchen

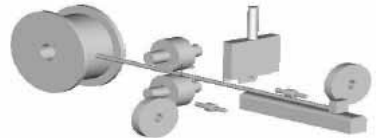


Abbildung 4c: Prinzip-Lösung des Teams Rostock 1

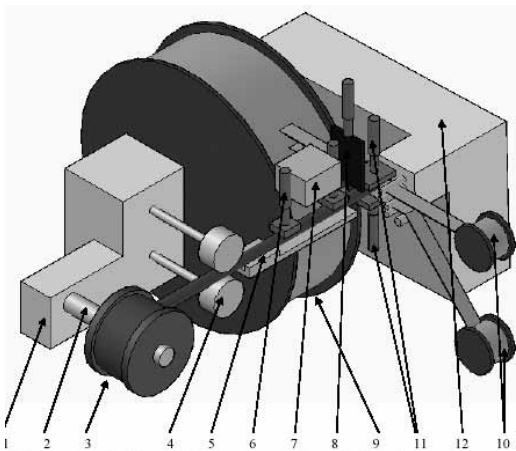


Abbildung 4d: Prinzip-Lösung des Teams Magdeburg

Aus der Gestaltungsphase sei ein Teil des Gesamtentwurfes aus dem OneSpace-System dargestellt (Abb. 5). Wie bereits erwähnt, diente das System dem Informationsaustausch, die Möglichkeit der Online-Zusammenarbeit konnte aus Zeitgründen und Prüfungssituationen leider nicht mehr im laufenden Semester durchgeführt werden. Von einigen Teams wurden sehr detaillierte Konstruktionen (Abb. 6) mit einem vollständigen Satz Fertigungszeichnungen geliefert. Das Projektziel wurde mithin vollständig erreicht, und zeigt, dass die parallele und verteilte Arbeitsweise an unterschiedlichen Standorten mit Studierenden durchführbar ist.

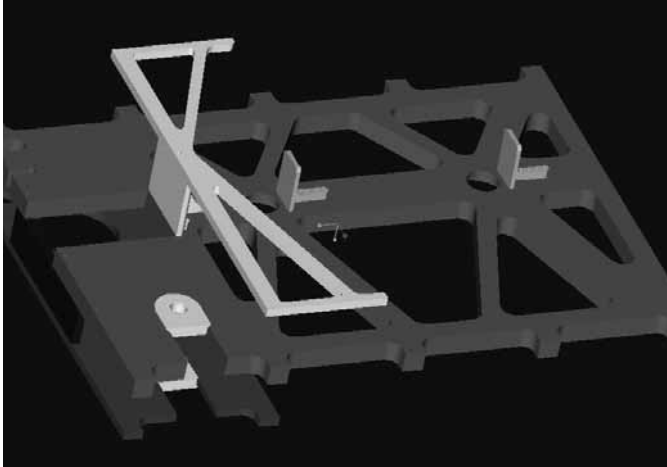


Abbildung 5: Trägersystem

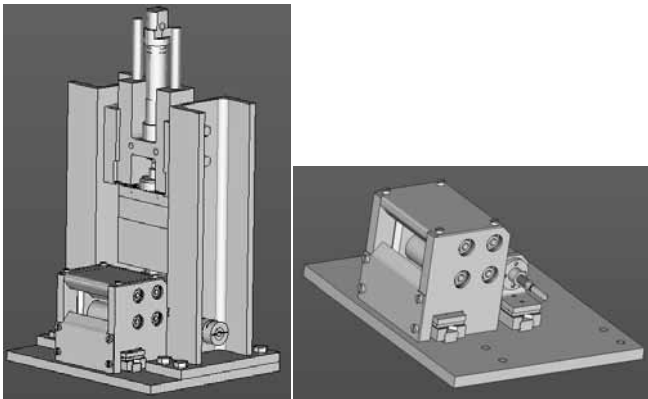


Abbildung 6: Detaillösungen (Team Gelsenkirchen)

6. Zusammenfassung

Wie gezeigt, wurden vom Arbeitsergebnis her die Lernziele erreicht. Wenn auch zu Beginn etwas zäh, so wurde ein guter Standard in der Kommunikation und im Datenaustausch erreicht. Nach Bekunden der Studierenden wurde die von Pro-Teach-Net zur Verfügung gestellte Plattform als Basis für vorliegende Form der Zusammenarbeit sehr positiv eingeschätzt. Die Motivation war hoch, was ggf. auf das neue Medium, auf die neuen Erfahrungen und vermutlich auch auf die Konkurrenzsituation zwischen den Teams zurückzuführen ist. Im Laufe des Projekt wurde die Selbstständigkeit und die Selbstorganisation der Studierenden deutlich größer, die Nutzung der Plattform selbstverständlich. Die Ergänzung und Unterstüt-

zung durch die Betreuer/Tutoren sowie die Präsenzveranstaltung zu Projektbeginn stellen ein wesentliche Komponente für das Projekt dar. Auch hier hat sich der Ansatz des „Blended Learning“ als sinnvoll herausgestellt. Abgesehen von den Reisen war der zeitliche Aufwand für die Lehrenden nicht höher als bei lokal durchgeführten Entwicklungsprojekten.

Kritisch zu betrachten ist die Termingestaltung bedingt durch den unterschiedlicher Semesterbeginn bzw. –abschluss der einzelnen Standorte. Es spricht einiges dafür, wegen der Zeitknappheit eine solche Veranstaltung über 2 Semester laufen zu lassen, und statt dessen die Anzahl der Teams auf drei bis vier zu reduzieren. Die unterschiedlichen Studienvoraussetzungen (SWS-Umfang, Inhalte, Lehrform, Universität/Fachhochschule) hatten auf das Projektergebnis keinen signifikanten Einfluss. Eine Verstetigung derartiger studentischer Projekte zur Produktentwicklung sollte angestrebt und der Anwenderkreis erweitert werden, wenn möglich mit internationaler Partneruniversitäten.

Literatur

- /And-98/ Anderl, R. Schiemenz, K. Neue Wege in der Grundausbildung zum rechnergestützten Konstruieren. Konstruktion 50(1998), Nr.1/2 S. 37 –45, Springer Verlag, Berlin, 1998.
- /Schr-98/ Schreiber, A.: CBT-Anwendungen professionell entwickeln. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- /Höh-99/ Höhne, G.; Chilian, G.; Henkel, V.; Use of Multimedia in Design Education, ICED' 99, Proceedings Vol. 2, S 887- 892, München 1999
- /BMBF-00/ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Bekanntmachung von Richtlinien über die Förderung von Vorhaben zur Förderung des Einsatzes „Neuer Medien in der Bildung“. Bundesanzeiger Nr. 67 Seite 6102, 05. April 2000
- /Klö-00/ Klöcker, S.: CBT-Bausteine zum Erlernen von Qualitätsmethoden am Arbeitsplatz. Vortrag anlässlich des 4. Workshops “Multimedia für Bildung und Wissenschaft”, Tagungsband ISSN 1436-4492, Ilmenau, 28./29. Sept. 2000
- /Klöc-03/ Klöcker, S.: Netzbasiertes Management von Konstruktionswissen. Tagungsband zum Workshop: NMB-Projekte in den Ingenieurwissenschaften. Dessau 25. / 26. Juni 2003

Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan KLÖCKER
Fachhochschule Gelsenkirchen /Abteilung Bocholt
Fachbereich Maschinenbau
46 397 Bocholt
email: stephan.kloecker@fh-gelsenkirchen.de

Diskussion

Prof. Rugenstein

Die Zusammenfassung zeigt eine Schwachstelle des Systems auf. Verständigungsschwierigkeiten gibt es, weil die konstruktive Ausbildung in der Bundesrepublik sehr uneinheitlich ist. Sollte man nicht verstärkt auf eine stärkere Vereinheitlichung der Ausbildung orientieren?

Prof. Klöcker

Ich möchte diese Einschätzung relativieren. Als wir zu Beginn der Arbeit am Forschungsthema die Studienpläne der beteiligten Universitäten analysiert haben, konnten wir eine große Übereinstimmung im Grundstudium feststellen. Unterschiedliche Wege und Inhalte prägen vor allem das Fachstudium. Dies ist aber auch in der Methodik der Konstruktion begründet, die verschiedene Wege der Lösungsfindung zulässt. Die daraus entstehende Vielfalt ist durchaus als positiver Effekt zu werten.

Prof. Rugenstein

Hauptaufgabe des Hochschullehrers ist es, bei den Studenten Begeisterung für die Konstruktion zu wecken. Dafür ist die Präsenz des Hochschullehrers auch bei einer rechnergestützten Ausbildung unverzichtbar. Die direkte Diskussion mit dem Hochschullehrer, seine Vorbildwirkung, ist unabdingbare Voraussetzung in der konstruktiven Ausbildung. Dies muss deshalb in jedem Ausbildungssystem verankert sein.

Prof. Lübbert

Positive Wirkungen im Sinne einer Begeisterung für die Konstruktion gehen auch von der hochschulübergreifenden Projektbearbeitung aus, weil es auf diese Weise auch zu einem Ideenaustausch zwischen Studenten unterschiedlicher „Schulen“ kommt. Wir konnten feststellen, dass die Projektgruppe mit Studenten unterschiedlicher Universitäten eine höhere Qualität der Lösung der Aufgabe erbrachte als Vergleichsgruppen nur mit Studenten der eigenen Einrichtung.

Dr. Wegmann

Man sollte keine absolute Vereinheitlichung der Ausbildung anstreben. Auch in der beruflichen Praxis muss eine Zusammenarbeit z. B. zwischen deutschen Ingenieuren und Ingenieuren aus den USA gewährleistet sein, obwohl deutlich unterschiedliche Ausbildungsformen absolviert wurden.

Aus meiner Erfahrung bei der Betreuung einer hochschulübergreifenden Projektgruppe möchte ich folgendes anregen. Die Projektgruppe wurde durch Konstrukteure und Informatiker betreut. Ein Defizit liegt meiner Meinung nach in der fehlenden sozial-psychologischen und methodischen Betreuung. Erstrebenswert wäre die wissenschaftliche Auswertung der Protokolle über die Zusammenarbeit durch Fachleute aus dieser Sicht. Dies könnte wesentlich zu einer Verbesserung der angewandten Methoden beitragen.

Prof. Stelzer

In welcher Form soll das Projekt weitergeführt werden?

Prof. Klöcker

Die beteiligten Universitäten haben eine Weiterführung beschlossen. Allerdings sollen soft- und hardwaretechnische Probleme durch Privatunternehmen bearbeitet werden, die dies effektiver als eine Universität leisten können. Die Ergebnisse der Arbeit werden in der gesamten Bundesrepublik und darüber hinaus verfügbar sein.

Nutzung von Rapid Prototyping in der studentischen Ausbildung

Frank ENGELMANN; Christiane BEYER; Sven-Jörg BROCKOP

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Abstract

Die schnelle Verfügbarkeit von Prototypen stellt ein modernes Hilfsmittel in der Produktentwicklung dar. Lern- und Entscheidungsprozesse lassen sich auf diese Weise erheblich beschleunigen. Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik des Institutes für Maschinenkonstruktion (IMK/KT) werden verschiedene Rapid-Prototyping-Verfahren genutzt und in die studentische Ausbildung eingebunden. Die Studenten haben die Möglichkeit, *aktiv* an der Umsetzung ihrer konstruktiven Ausarbeitung teilzunehmen und daran mögliche Fehler oder Verbesserungsmöglichkeiten zu erkennen. Gleichfalls gewinnen die Studenten Erkenntnisse über wesentliche Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren und deren Anwendungsgebiete. Diese Erfahrungen sind für die spätere Tätigkeit als Konstrukteur oder Entscheidungsträger in verschiedenen Unternehmenspositionen von großer Bedeutung.

Keywords

Methodisches Konstruieren, Konstruktionstechnik, Rapid Prototyping

1 Hintergrund

Eine Aufgabe des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik ist die Ausbildung von Studenten des Maschinenbaus und weiterer Studienrichtungen im Grund- und Hauptstudium. Im Grundstudium werden die Fächer Konstruktionselemente und Konstruktionslehre, im Hauptstudium die Fächer Konstruktionstechnik und Angewandte Konstruktionstechnik angeboten.

Die Lehrgebiete Konstruktionslehre und Konstruktionselemente stellen Grundlagenfächer in der Ausbildung dar und bilden die Basis für mehrere Fächer der folgenden Semester. Es werden grundlegendes Fachwissen sowie Fertigkeiten und Fähigkeiten zur Wissensanwendung vermittelt. Da das in den Übungen vermittelte Wissen bzgl. Darstellungsregeln und Bemessung von Bauteilen vertieft werden soll, wird auf das manuelle Erstellen der Zeichnungen orientiert.

In den Fächern des Hauptstudiums wird das methodische Konstruieren [1] gelehrt und das Wissen zum zweckmäßigen Einsatz der modernen Technologien [2, 3, 4, 5, 6] vermittelt. Zu diesen modernen Technologien gehört das Rapid Prototyping.

Mittels Rapid-Prototyping-Verfahren werden physische Modelle aus 3D-CAD-Daten gefertigt. Die Anwendung dieser Modelle bietet die Möglichkeit eines besseren Kommunizierens zwischen Technikern und Nicht-Technikern (2D-Zeichnen – 3D-Denken) sowie über Abteilungs- und Firmengrenzen hinaus. Für den Konstrukteur selbst ist die Anwendung von Proto-

typen ebenfalls von Vorteil, da sich daran z. B. Gestalt-, Funktions- und Fertigungstests zum Produktentwurf vornehmen lassen. Fehler können so leichter erkannt werden.

2 Modelle in der Produktentwicklung

Zur Klassifikation der Modelle bzw. Prototypen sind in der Literatur eine Vielzahl von Begriffen und Einteilungsansätzen zu finden. Eine allgemeine praxisnahe Modelldefinition hat die NC-Gesellschaft [7] vorgenommen, auf die sich die führenden Hersteller von Rapid Prototyping Anlagen, dass heißt ihre Vertreter in Deutschland, verständigt haben.

- **Konzeptmodelle:** Erlauben die Visualisierung von Proportionen und des grundsätzlichen Erscheinungsbildes. Sie werden auch als „Show and Tell“-Modelle oder Datenkontrollmodelle bezeichnet.
- **Geometrieprototypen:** Dienen der Überprüfung der Handhabung, Bedienung und Benutzung sowie der Visualisierung der exakten Form inklusive der gewünschten Oberflächenqualitäten.
- **Funktionsprototypen:** Ermöglichen die Überprüfung einer oder mehrerer Funktionalitäten.
- **Technische Prototypen:** Entsprechen dem Serienmodell weitgehend und werden nach den Fertigungsunterlagen erstellt. Abweichende Materialien und geometrische Vereinfachungen sind möglich. Sie unterscheiden sich nur durch das Fertigungsverfahren vom Serienmodell.

In Bild 1 sind die erläuterten Modelldefinitionen den einzelnen Produktentwicklungsschritten zugeordnet.

Idee	Planung / Definition	Konzeption	Entwicklung / Ausarbeitung				Produkt-Entwicklungsschritte nach VDI 2221
			Entwurf / Design	Konstruktion	Berechnung	Erprobung	
Grundkonzeption, wesentliche Eigenschaften	Definition der Aufgabenstellung, Festlegung der Funktion, Vorbereitung der Lösungsansätze	Bewertung, Zieldefinition	Grob- und Feingestaltung, Berechnung, Bewertung			Überprüfung Erstellung d. Unterlagen	Modelltypen nach NDC
Konzeptmodell		Geometrieprototyp		Funktionsprototyp		Technischer Prototyp	

Bild 1: Zuordnung von Produktentwicklungsschritten zu Modelldefinitionen (nach: [7])

3 Einsatz physischer Modelle

Die fortschreitende Entwicklung in der EDV ermöglicht das Erstellen von virtuellen Welten. Aus den Konstruktionsbüros ist die CAx-Anwendung nicht mehr wegzudenken. Es ist möglich, ganze Industrieanlagen am Bildschirm zu besichtigen und Fertigungsabläufe gefahrlos zu testen noch bevor in der realen Welt ein Modell oder der Gegenstand selber existieren. Der Anwender bleibt dabei lediglich Beobachter, da der Nutzer nur einen visuellen ggf. akustischen Eindruck erhält. Weitere Reize, z. B. durch Tasten, werden nicht aufgenommen.

Um die Umwelt vollständig wahrzunehmen, setzt der Mensch alle Reize ein bzw. nutzt gesammelte Erfahrungen. Aus psychologischer Sicht nimmt das Tasten eine zentrale Stellung für die Wahrnehmung der Umwelt ein („Sehen als Schüler der tastenden Hand“). Durch Tasten und Berühren wird das räumliche Bewusstsein ausgebildet. Empfindungen über Kräfte, Temperatur oder Oberflächeneigenschaften usw. werden gesammelt.

Physische Modelle ermöglichen den Einsatz des Tastens zur Wahrnehmung von Bauteileigenschaften, wie Oberflächeneigenschaften oder Geometrie. Auch bei skalierten Modellen sind die Maße des Bauteils erkennbar. Da ein Bauteil am Bildschirm in verschiedenen Größen angeschaut werden kann, besteht die Gefahr, Einzelheiten verschieden zu interpretieren. Ein physisches Modell bietet letztlich eine Kontrolle. [8]

Diese Kontrollmöglichkeit kann auch in der Lehre genutzt werden. Der Student erhält so eine Rückmeldung über die erarbeitete Lösung und bekommt eine verbesserte Beziehung zum Bauteil, dessen Geometrie und Eigenschaften.

Je nach Anforderung an den Prototypen, seine Gestaltkomplexität und dem gewünschten Detaillierungsgrad stehen unterschiedliche Rapid-Prototyping-Verfahren zur Fertigung zu Verfügung.

4 Anwendung des Rapid Prototyping in der Lehre

Als einen Forschungsschwerpunkt befasst sich der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik seit 1994 mit der Anwendung von Rapid-Prototyping-Verfahren während des Konstruktionsprozesses. Es konnten in dieser Zeit umfangreiche Erfahrungen im Einsatz und der Anwendung vor allem mit der LOM-Technologie (LOM 2030E, Helisys Inc.) gesammelt werden, aber auch in der Anwendung des ModellMaker II (Sanders Prototype Inc.). Seit der Eröffnung der Experimentellen Fabrik in Magdeburg im Jahre 2001, in der verschiedene Institute der Universität und regionale Klein- und Mittelständische Unternehmen sehr eng zusammenarbeiten, stehen mit einem 3D-Drucker (Z406, Z-Corporation Inc.) und einem Solid-Object-Drucker (ThermoJet, 3D-Systems Inc.) weitere Rapid-Prototyping-Technologien zur Verfügung, deren Einsatzfelder untersucht wurden und werden. Die Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker des Lehrstuhls Konstruktionstechnik haben umfangreiche Erfahrungen in der Anwendung und Auswahl der verschiedenen Verfahren für verschiedene Anwendungsfälle gesammelt.

Diese bisher gesammelten Erfahrungen aus der Forschung fließen in die Lehre ein. Innerhalb der studentischen Ausbildung stellt die Fertigung von Prototypen eines entwickelten Produktes einen Schwerpunkt dar. Die Studenten haben die Möglichkeit, aktiv an der Umsetzung ihrer konstruktiven Ausarbeitung teilzunehmen. Die Auswertung des Ergebnisses kann somit am physischen Prototypen vorgenommen werden. Wesentliche konstruktive Gestalttrichtlinien, wie z. B. fehlerfreies Konstruieren, fertigungsgerechtes Gestalten usw., lassen sich an den physischen Prototypen besser erläutern.

Durch die aktive Teilnahme am Prozess wird ihnen weiterhin eine bessere Vorstellung über die Herstellung von Prototypen und den damit im Zusammenhang stehenden Maßnahmen zur Arbeitsvorbereitung sowie den notwendigen Nacharbeiten vermittelt. Der Student gewinnt gleichfalls Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren sowie deren Anwendungsgebiete.

Diese Erkenntnisse stellen für die Studenten wichtige Voraussetzungen für die spätere Berufspraxis dar. Die Anwendung moderner Technologien im Produktentwicklungs- und Produktentstehungsprozess ist notwendig, um mit innovativen Produkten auf dem Markt bestehen zu können. Durch eine fundierte und umfangreiche Ausbildung der Studenten ist es möglich, die gesammelten Forschungserkenntnisse über die Absolventen schneller in die Unternehmen einzubringen, die dann als Konstrukteure oder Entscheidungsträger in verschiedenen Unternehmensbereichen tätig sein werden.

Die vielen Praktika und Belegaufgaben während der Ingenieurausbildung weisen darauf hin, dass der positive Effekt der Anwendung des theoretisch erworbenen Wissens unbestritten ist. Die Gelegenheit, an der Fertigung der Prototypen mittels Rapid-Prototyping-Verfahren nicht nur als Beobachter, sondern aktiv teilzunehmen, trifft bei den Studenten auf großen Zuspruch. Im folgenden werden verschiedene Projekte vorgestellt.

4.1 Entwicklung von Prototypen mit dem LOM-Verfahren

Beispielhaft für die Rapid-Prototyping-Anwendung innerhalb der studentischen Ausbildung wird hier ein Projekt vorgestellt, das sich mit der Ausarbeitung einer konstruktiven Lösung für einen 3-Zylinder-Motor (W-Motor) befasste.

Entsprechend den im Studienfach Konstruktionstechnik vermittelten Kenntnissen über methodisches Konstruieren, begannen die Studenten mit dem Erarbeiten der Anforderungsliste. Die Festforderungen, Ziele und Wünsche wurden aus der Aufgabenstellung abgeleitet. Anschließend erfolgte das Aufstellen einer Funktionsstruktur. Aus den erarbeiteten erfolgversprechenden Lösungsvarianten zur Anordnung von 3 Pleueln auf einem Kurbelwellenzapfen und möglichen Varianten der Lagerung wurden mittels Bewertungsmatrix die besten drei Lösungen ausgewählt und weiterverfolgt. Im Anschluss daran wurde durch die Studenten der Arbeitsschritt Entwurf und Ausarbeitung durchgeführt. Bild 2 zeigt die Technische Zeichnung eines Gabelpleuels.

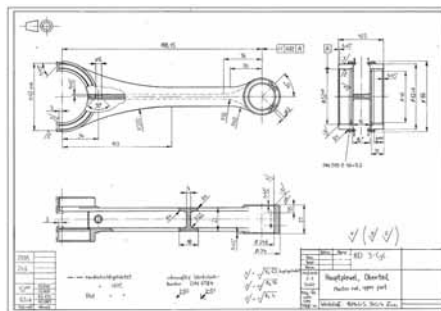


Bild 2: Technische Zeichnung eines Gabelpleuels

Um aus den weiterverfolgten drei Lösungen die beste Variante auswählen zu können, war es notwendig, Funktionstests durchzuführen. Die Herstellung der Prototypen sollte mittels Rapid-Prototyping-Technologien erfolgen. Voraussetzung zur Fertigung von Einzelteilen ist das Vorhandensein eines dreidimensionalen Datenmodells von jedem zu fertigenden Einzelteil. Im Bild 3 ist die Baugruppe mit 3 Einfachpleueln und separaten Gleitlagern als 3D-CAD-Modell dargestellt.



Bild 3: 3D-CAD-Modell der Baugruppe mit Pleuellagerung, 3 Einfachpleueln und Pleuellagerung (Variante 1)

Nach Analyse der Anforderungen an die zu fertigenden Modelle und den am IMK/KT vorhandenen Rapid-Prototyping-Verfahren entschieden sich Mitarbeiter und Studenten für das Laminated-Object-Manufacturing (LOM) als Verfahren zur Herstellung des Prototypen. Die Studenten wurden in den Fertigungsprozess einbezogen.

Beim LOM-Verfahren (Laminated Object Manufacturing) wird mit Heißkleber beschichtetes Papierfolienmaterial auf eine Bauplattform bzw. auf das teilfertige Modell auflaminiert. Mit Hilfe eines Laserstrahls wird die Körperkontur einer jeden Schicht rechnergesteuert nachgezeichnet und geschnitten. Nach dem Schneiden wird die Plattform um eine Schichtdicke abgesenkt und die nächste Folienschicht aufzutragen. Der Prozess beginnt erneut. Das Restmaterial dient als Stützkonstruktion für überhängende Bauteilkonturen. Es wird durch Kreuzschnitte zerteilt, um das Entformen der Bauteile zu ermöglichen. Das Ergebnis des Bauprozesses ist ein Block, in dem ein oder mehrere Bauteile eingebettet sind. Nach Beendigung des Fertigungsprozesses wird dieser Baublock entnommen und die Bauteile entformt. Falls erforderlich, kann durch im Modellbau herkömmliche Bearbeitungsmaßnahmen die Oberflächenqualität der Bauteile verbessert werden. Durch die ausgeführten Tätigkeiten (Entformen, Schleifen, Lackieren) wurde den Studenten ein Eindruck vermittelt, welcher manuelle Aufwand zur Herstellung eines Prototypen mit diesem Verfahren notwendig ist. Im letzten Schritt wurde zur Überprüfung des Arbeitsergebnisses und zur Präsentation ein Prototyp der Baugruppe angefertigt.

In Bild 4 ist eine von Bild 3 abweichende Variante als LOM-Prototyp der Baugruppe dargestellt.



Bild 4: LOM-Prototyp der Baugruppe (Variante 2)

Das beschriebene Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Studenten äußerten sich besonders positiv über das vermittelte praxisorientierte Fachwissen. Weitere zahlreiche Studentenprojekte konnten bisher am Institut durch die Anwendung der LOM-Technologie unterstützt werden.

4.2 Entwicklung von Prototypen mit dem 3D-Drucker Z406

Der 3D-Drucker Z406 arbeitet wie ein Tintenstrahldrucker und beruht auf dem Verkleben von Pulvermaterial. Vier Köpfe drucken an den Stellen der Bauteilkontur einen Binder auf ein Pulverbett. Nur an diesen Stellen findet eine lokale Verfestigung des Pulvermaterials statt. Anschließend wird eine neue Pulverschicht aufgetragen und der Prozess beginnt von vorn. Der Prototyp wächst Schicht für Schicht. Das im Bauraum verbleibende lose Pulvermaterial bildet die Stützkonstruktion für das entstehende Bauteil. Nach dem Bauprozess wird das Bauteil aus dem Bauraum entnommen, durch Druckluft in einer Entpulverungsanlage gesäubert und anschließend mit Wachs, Epoxidharz oder anderen Materialien infiltriert, um eine Erhöhung der Festigkeit zu erreichen.

Die Eigenschaften der mit der Z406 hergestellten Modelle sind verfahrensbedingt unterschiedlich zum LOM-Verfahren. Von der einfachen Handhabung der Anlage konnten sich auch hier die Studenten überzeugen. Ein Vorteil dieses Verfahrens gegenüber anderen Verfahren besteht in den geringeren Materialkosten für die Fertigung. Einen Nachteil allerdings bildet die relativ beschränkte maximale Bauteilgröße.

Ein weiterer Vorteil der Z406 besteht darin, farbige Modelle herstellen zu können. Durch diese Möglichkeit können z. B. Baugruppen, wie das Ventil in Bild 5, gefertigt werden. Derartige Modelle fördern das räumliche Vorstellungsvermögen bei den Studenten. Funktionen einzelner Bauteile in einer Baugruppe können ohne großen Aufwand leicht erläutert werden.

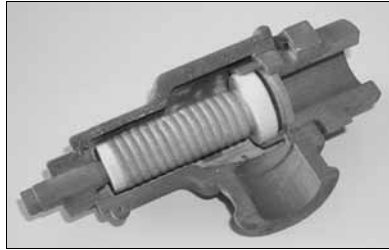


Bild 5: Mit der Z406 gefertigter Prototyp eines Ventils

Weiteres Potential bietet die Anwendung dieser Technologie, um beispielsweise Spannungsverläufe an Bauteilen farblich dreidimensional abzubilden oder Abkühlungsprozesse beim Gießen durch farbliche Kennzeichnung am Bauteil zu dokumentieren. Auch damit kann die studentische Ausbildung anschaulich durch entsprechende Bauteile ergänzt werden.

5 Zusammenfassung

Während der studentischen Ausbildung im Grundstudium lässt sich feststellen, dass oft ein Mangel an Vorstellungskraft und dreidimensionalem Denken vorherrschen. Deshalb muss versucht werden, durch unterschiedlichste Möglichkeiten den Studenten das Erlernen dieser Fähigkeiten zu erleichtern. Ein Hilfsmittel bietet z. B. die Herstellung von physischen Modellen mittels Rapid-Prototyping-Technologien, um anschauliche Bauteile oder Baugruppen herzustellen.

Auch während der konstruktionstechnischen Ausbildung im Hauptstudium ist es von großem Vorteil, wenn z. B. wesentliche konstruktive Gestaltungsrichtlinien, wie fehlerfreies Konstruieren, fertigungsgerechtes Gestalten usw., an physischen Prototypen erläutert werden können.

Durch die am IMK/KT vorhandenen Rapid-Prototyping-Technologien sind ideale Voraussetzungen geschaffen, die Ausbildung diesbezüglich zu unterstützen. Die Studenten haben die Möglichkeit, ihr theoretisch erworbenes Wissen in konstruktiven Belegaufgaben anzuwenden und anschließend mittels der Technologien in physische Prototypen umzusetzen. Anhand dieser Prototypen ist eine bessere Auswertung der Ergebnisse möglich. Konstruktive Fehler werden auf diese Art schneller erkannt. Gleichzeitig erlernen die Studenten den Umgang mit diesen Technologien. Einsatzfelder und Einsatzgrenzen sowie Vor- und Nachteile verschiedener Technologien werden schneller deutlich. Besonders vorteilhaft ist, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiter am Lehrstuhl ihre Erfahrungen, gesammelt in zahlreichen Forschungsprojekten, im Umgang mit diesen Technologien weitergeben können. Es hat sich gezeigt, dass die Einbindung der Studenten in die Prototypenherstellung sowohl an der LOM-Anlage als auch an der Z406-Anlage sehr gut möglich ist.

Literatur

- [1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendungen. 5. neu bearb. und erw. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2003
- [2] Grote, K.-H.; Birke, C.: CAD, Rapid Prototyping und 3D-Digitalisierung als Konstruktionshilfen. In : Konstruktion 48 (5) 1996, S. 137-142. Berlin [u.a.]: Springer
- [3] Beyer, C.; Grote, K.-H.; Tenbusch, A.: Die Kopplung von Rapid Prototyping und Reverse Engineering im Konstruktionsprozeß. In: Industrie Management 14 (1998), Nr. 5, S. 24 – 28. Berlin: GITO
- [4] Grote, K.-H.; Birke, C.; Beyer, C.; Tenbusch, A.: Die Kopplung von Rapid Prototyping und Reverse Engineering im Konstruktionsprozeß. In: 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, September 1999, S. 87-92
- [5] Birke, C.; Beyer, C.; Grote, K.-H.: Die Rolle der Konstruktionsmethodik für den Produktlebenszyklus. In: Industrie Management 16 (2000), Nr. 1, S. 19-22. Berlin: GITO
- [6] Birke, C.: Der Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren im Konstruktionsprozeß. Schriftenreihe: Fortschritte in der Maschinenkonstruktion, Bd. 2002,1. Aachen: Shaker, 2002 (Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2001)
- [7] Gebhardt, A.: Rapid Prototyping: Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung. 2. völlig überarb. Auflage, München; Wien: Hanser, 2000
- [8] Hacker, W.; Sachse, P.; von der Weth, R.: Denkleistungen beim Konstruieren. In: VDI-Berichte 1270, Zukunftschance Produktentwicklung, S. 137-153, Düsseldorf: VDI Verlag

Autoren

Dr.-Ing. Frank ENGELMANN
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
email: frank.engelmann@mb.uni-magdeburg.de

Dr.-Ing. Christiane BEYER
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
email: christiane.beyer@mb.uni-magdeburg.de

Dipl.-Ing. Sven-Jörg BROCKOP
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
email: sven-joerg.brockop@mb.uni-magdeburg.de

Diskussion

Prof. Brökel

(Anmerkung: Es wurde das farbige Modell im Bild 5 präsentiert.)

Wurde das gezeigte Modell der Baugruppe im Stück gefertigt oder nachträglich montiert?

Dipl.-Ing. Brockop

Das Modell wurde im System als Baugruppe gespeichert und die Daten an den 3D - Drucker übergeben. Der Drucker ist ein Farbdrucker.

Prof. Brökel

(Anmerkung: Es wurde auf die abschließende Frage des Vortrages geantwortet: Wie sieht das Lernkonzept der Zukunft aus?)

Das Lehrkonzept der Zukunft, das kennen wir ja noch nicht. Aber der Kollege Stelzer hat vorhin bereits festgestellt, die Wahrheit liegt in der Mitte. Wir werden sicher beide Methoden benötigen, die virtuelle und die materielle Darstellung werden ihre Berechtigung haben.

Prof. Klöcker

Sie hatten zu Anfang erwähnt, Sie lassen von Hand zeichnen. Zu welchem Zeitpunkt lassen Sie das machen?

Dipl.-Ing. Brockop

Im 1. Semester

Prof. Klöcker

Machen Sie dann schon CAD?

Dipl.-Ing. Brockop

Nein, später.

Prof. Klöcker

Wir machen das eigentlich auch so. Wir haben im Grundstudium, im 3. Semester, einen CAD – Schnellkurs durchgeführt und zeitgleich das Technische Zeichnen von Hand, um auch diese Komponente einzubringen. Denn das 3D – Denken, das Sie ansprachen, können Sie nach meiner Meinung mit 3D – CAD – Systemen nicht schulen, sondern eher mit 2D – Zeichnen und damit verbunden dem Zwang, sich das räumliche Gebilde vorstellen zu müssen.

Prof. Stelzer

Ich möchte Herrn Brökel antworten. Also wir kennen das Lehrkonzept der Zukunft (Heiterkeit). Es sieht genau so aus, wie Sie gesagt haben. Denn es ist wichtig, einen gesunden Mix zu haben. Das virtuelle Prototyping und Rapid Prototyping sind immer wieder neue Komponenten und Ergänzungen zu dem, was existiert. Die Proportionen zwischen den einzelnen Methoden werden sich verändern. Ich habe aber auch den Eindruck, dass bei uns bereits eine Sättigung dieser virtuellen Präsentationen eintritt. Die Studenten kommen schon sehr früh mit dem Wunsch, die Dinge auch einmal anzufassen und sie nicht nur erklärt zu bekommen. Man kann das sehr schön durch Animationen, durch Filme usw. deutlich machen, aber die Vorstellung eines noch nicht existierenden Produktes bevor es zu diesem Modell kommt, das ist das entscheidende. Das kann man eigentlich nur trainieren, wie das hier auch schon gesagt wurde, einmal dadurch, dass man dem Studenten Körper in die Hand gibt, in welcher Form auch immer. So kaufen wir z. B. im Baumarkt kleine Baugruppen, von denen die Studenten im 1.

Studienjahr Handskizzen anfertigen und später eine bemaßte 2D – Zeichnung erstellen. Das sind unverzichtbare Trainingsphasen, die jeder Student benötigt. Eine andere Methode wird von einem Kollegen angewandt. Er hat von einer Firma 100 Getriebe gekauft und lässt diese durch die Studenten im 1. Studienjahr demontieren und wieder montieren. Virtuelle Modelle und Rapid Prototyping können da sicher Unterstützung geben, dass die Studenten diese Wechselwirkung begreifen. Eine zweite Sache ist auch, und da komme ich auf eine Bemerkung von Herrn Klöcker zurück, das Denken in Prinzipien, in Prinzipskizzen. Was die Studenten da abgeliefert haben, ist durchaus akzeptabel. Dabei kommt es nicht auf eine starre Abarbeitung aller möglichen Teilschritte an. Wie in der Praxis muss man hier flexibel sein, und das muss man in Projekten lernen. Ich sehe das auch so, dass das Rapid Prototyping eine Methode ist, um komplexe Objekte überschaubar darzustellen und das Verständnis zu fördern.

Prof. Brökel

Derzeit ist sicher der hohe Preis der 3D - Drucker noch ein Hemmnis für eine breite Anwendung in der Lehre. Wenn man sich die Preisentwicklung für Hardware am Beispiel der Laserdrucker ansieht, ist jedoch anzunehmen, dass es in naher Zukunft auch kostengünstige Geräte für das Rapid Prototyping geben wird.

Automatisierte Optimierung parametrischer Bauteile

Sándor VAJNA, André JORDAN, Steffen CLEMENT

Universität Magdeburg

Abstract

Die vorliegende Arbeit hat die automatisierte Optimierung parametrischer Bauteilmodelle im Sinn einer Anpassungskonstruktion zum Inhalt. Anhand ausgewählter Beispiele wird gezeigt, welchen Nutzen eine automatisierte Vorgehensweise bei der Optimierung von Produkten hat und welche Schwierigkeiten und Probleme bei der Realisierung zu bewältigen sind.

Es wird dargestellt, wie die zur Verfügung stehenden Simulationswerkzeuge zu einem Regelkreis kombiniert werden können und welche Anforderungen hierzu an die Werkzeuge und das Bauteilmodell zu stellen sind.

Keywords

Anpassungskonstruktion, Simulation, Optimierung, Evolutionäre Algorithmen

1 Produktentwicklung in Analogie zur natürlichen Evolution

Die Produktentwicklung ist eine Phase im Produktlebenszyklus, in der das Produkt einer ständigen Veränderung unterworfen ist. Die Autogenetische Konstruktionstheorie (Vajna 2002) beschreibt diese Phase als einen Optimierungsprozeß, dessen Wirkmechanismen (z.B. Selektion der geeignetsten aus einer Gruppe von Lösungen) und Operatoren (Verändern und Kombination von Vorhandenem) analog zu denen der natürlichen Evolution sind.

Vereinfacht läßt sich feststellen, daß die natürliche Evolution mit jeder Generation neue Individuen hervorbringt, die untereinander in Konkurrenz stehen. Diejenigen Individuen, die mit den Umweltbedingungen besser zurechtkommen als andere, haben größere Chancen zu überleben und sich fortzupflanzen (Darwin 2001).

Die Randbedingungen für diesen Selektionsprozeß werden durch die Umwelt generiert. Sie lassen sich als ein komplexes, dynamisches Beziehungsnetzwerk von in der Regel entgegengerichteter Bewertungskriterien beschreiben. Die Variation der Randbedingungen wirkt sich auf die Entwicklung der Individuen aus. In umgekehrter Richtung beeinflussen die Individuen aber auch die Umweltbedingungen und sind damit selbst eine Ursache für die Dynamik in dem Entwicklungsprozeß.

In analoger Weise stellt sich die Produktentwicklung dar. Der Lösungsraum wird begrenzt durch ein komplexes Beziehungsnetzwerk von Kriterien, die sich im zeitlichen Verlauf der Entwicklung ändern können. Für diese Kriterien entwickelt der Konstrukteur nacheinander (oder teilweise parallel) eine Anzahl von Lösungsalternativen, von denen er diejenigen weiterentwickelt und detailliert, die die Anforderungen in besonders guter Weise erfüllen (Vajna 2002).

Die Erstellung neuer Lösungen in der Produktentwicklung erfolgt ebenfalls analog zur natürlichen Evolution. Die Individuen, die von der natürlichen Evolution hervorgebracht werden, sind durch ihren Genetischen Code in der DNA definiert. Dieser Code wird von den Eltern infolge von Rekombination und Mutation in veränderter Form an die Nachkommen weitergegeben. Der Produktentwickler erstellt gleichfalls neue Lösungen auf der Basis von Vorgängertlösungen.

sungen. Er versucht, durch das Übernehmen von Merkmalen der „Elternlösungen“, bei den „Kindern“ die gewünschten Eigenschaften zu erzeugen.

Die Produktentwicklung findet in einem dynamischen System statt. So wie in der natürlichen Evolution die Umweltbedingungen zeitlich variieren, ändern sich während der Produktentwicklung auch die Anforderungen, die an ein Produkt gestellt werden („*running targets*“). Diese Änderungen können von „außen“ dem Produktentwickler aufgezwungen werden (z.B. bei Ausfall eines Zulieferers), sie können jedoch auch von der Produktentwicklung selbst verursacht werden (z.B. bei Erkenntnisgewinn infolge der Detaillierung des Produktes).

2 Simulationswerkzeuge in der Produktentwicklung

Die Verkürzung der Produktentwicklungszeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Produktqualität ist ein Hauptanliegen vieler Unternehmen. Zur Erreichung dieses Ziels setzen sie Werkzeuge ein, mit denen die Eigenschaften eines Produktes bereits während seiner Konzeption und Entwicklung ermittelt, bewertet und optimiert werden können. Unter diesem Gesichtspunkt gewinnen Simulationsprogramme zunehmend an Bedeutung, da sie es ermöglichen, relativ schnell und kostengünstig die Eigenschaften des werdenden Produktes zu evaluieren.

Die hohe Komplexität der Produkte und der Wunsch der Produktentwickler, die Eigenschaften eines Produktes bereits vor seiner physischen Existenz umfassend beschreiben zu können, machen den Einsatz vieler unterschiedlicher Softwarewerkzeuge notwendig. Dem CAD-System kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, denn in der Regel werden die Partialmodelle, die von anderen Simulationsprogrammen benötigt werden, aus dem CAD-Modell abgeleitet. Andererseits haben die Ergebnisse der Simulationen Änderungen des CAD-Modells zur Folge.

Der kontinuierlich wachsende Funktionsumfang von CAD-Systemen ist ein weiteres Indiz für die zentrale Rolle des CAD-Modells in der Produktentwicklung. Inzwischen haben die meisten namhaften Hersteller ihre Systeme um zusätzliche Module zur Spannungs- und Verformungsanalyse, Bewegungsanalyse, Fertigungssimulation u.a. erweitert. Da das CAD-System und die zu integrierenden Module meist auf einem einheitlichen Datenmodell basieren, können Probleme infolge inkompatibler Schnittstellen und Verluste beim Datentransfer vermieden werden.

Dennoch greifen Produktentwickler für Anwendungen, die hochwertige Berechnungsergebnisse erfordern, auf Softwareprodukte spezialisierter Hersteller zurück und müssen auf die enge Integration der einzelnen Simulationswerkzeuge verzichten. Will sich der Produktentwickler ein umfassendes Bild von den Eigenschaften des virtuellen Produktes verschaffen, ist er gezwungen, die benötigten Werkzeuge „manuell“ miteinander zu kombinieren. Diese Vorgehensweise führt zu einem ineffektiven Arbeiten, da die gleichen Arbeitsschritte (z.B. Ableitung der Partialmodelle aus dem CAD-Modell, Auswertung der Simulationsergebnisse, Veränderung des CAD-Modells) vom Produktentwickler immer wieder von Hand ausgeführt werden müssen. Im Folgenden soll gezeigt werden, wie diese Vorgehensweise durch den Aufbau eines automatisierten Regelkreises verbessert werden kann.

3 Automatisierte Produktentwicklung

3.1 Evolutionäre Algorithmen

Im letzten Kapitel wurde die Arbeitsweise des Produktentwicklers als ein evolutionärer Prozeß dargestellt, in dem der Konstrukteur verschiedene Lösungsalternativen bewertet und die besten von ihnen weiterentwickelt. Will man diese Vorgehensweise innerhalb eines automa-

tisierten Regelkreises ablaufen lassen, stellt sich die Frage nach einem Algorithmus, der in der Lage ist, eine solche Vorgehensweise abzubilden. Als Lösung bieten sich Evolutionäre Algorithmen (Pohlheim 1999) an. Im Gegensatz zu den anderen Optimierungsverfahren arbeiten sie mit einer Gruppe von Lösungsalternativen (Population), die analog zu den Individuen der natürlichen Evolution selektiert, mutiert und miteinander rekombiniert werden. In einem Evolutionären Algorithmus werden die Lösungsalternativen durch eine Zielfunktion bewertet, in der die einzelnen Bewertungskriterien formuliert sind.

Die alleinige Verwendung einer Zielfunktion reicht in der Produktentwicklung zur Bewertung der Lösungsalternativen nicht aus, denn die Bestimmung des Erfüllungsgrads der einzelnen Bewertungskriterien macht den Einsatz von Simulationsprogrammen oft unumgänglich. Für den Aufbau eines automatisierten Regelkreises bedeutet dies, daß auch die Simulationsprogramme in diesen integriert werden müssen.

Die hier vorgestellte Softwarelösung besteht aus einem Evolutionären Algorithmus, der analog der Arbeitsweise des Produktentwicklers die Lösungsalternativen erzeugt und einem Bewertungsskript, das die Programme zur Simulation der Produkteigenschaften aufruft. Der Evolutionäre Algorithmus stellt die Beschreibung der von ihm generierten Lösung dem Bewertungsskript in einer Datei zur Verfügung und erwartet nach dem Ablauf des Skriptes eine Datei, die ihm Auskunft über die Güte dieser Lösung gibt. Durch diese Vorgehensweise wird ein hohes Maß an Modularität und Flexibilität gewährleistet, da die Simulationsprogramme durch eine Änderung des Bewertungsskriptes einfach ausgetauscht werden können, ohne daß ein Neukompilieren der Software notwendig wird.

3.2 Anforderungen an die Simulationswerkzeuge und das Bewertungsskript

Der Aufbau eines automatisch ablaufenden Algorithmus zur Entwicklung und Optimierung von Produkten ist nur dann realisierbar, wenn alle in den Algorithmus integrierten Programme zur Simulation und Bewertung der Lösungen ohne Interaktion mit dem Anwender durchlaufen werden können. Viele Simulationsprogramme bieten diese Möglichkeit. Sie verfügen über einen Batch-Modus und lassen sich z.B. durch ein Skript steuern, das die Eingaben des Anwenders simuliert.

In ihren bisherigen Arbeiten verwendeten die Autoren das CAD-System Pro/ENGINEER zur Beschreibung der Bauteilgeometrie. Zur Automatisierung von Pro/ENGINEER wurde die sogenannte trail-Datei genutzt. Dabei handelt es sich um eine Datei, die vom CAD-System während jeder Sitzung angelegt wird und in der alle Aktivitäten des Anwenders protokolliert werden. Ruft man Pro/ENGINEER mit dem Namen einer trail-Datei als Argument auf, startet das CAD-System im Batch-Modus und führt alle Kommandos aus, die in der trail-Datei stehen. Da es sich bei der trail-Datei um eine Textdatei im ASCII-Format handelt, ist es möglich, sie manuell oder über ein Skript zu manipulieren und so den eigenen Bedürfnissen anzupassen. In analoger Weise können auch andere Simulationsprogramme gesteuert werden.

Die Verwendung eines Skriptes zur Programmsteuerung ist meist mit einer Verringerung der Flexibilität bei der Eingabe von Daten verbunden. In der Regel kann im Batch-Modus nur ein reduzierter Befehlssatz verwendet werden. Problematisch ist ebenfalls, daß das Skript auf Ausgaben des Programms (z.B. Fehlermeldungen) nicht oder nur wenig flexibel reagiert werden kann.

An dieser Stelle soll davon ausgegangen werden, daß die Programme, die zur Bewertung der Lösungen benötigt werden, vom Algorithmus durch ein Bewertungsskript aufgerufen werden. Andere Möglichkeiten, die Simulationsprogramme aus dem Algorithmus heraus anzusprechen, sind zwar ebenfalls denkbar (z.B. über die API des Bewertungsprogramms), jedoch sind sie nicht in dem Maß flexibel einsetzbar, wie dies bei der Skript-Programmierung der Fall ist.

Die Leistungsfähigkeit des Bewertungsskriptes hängt in hohem Maß vom Betriebssystem und der verwendeten Shell ab (Termöllen 1993). So unterstützt die Batch-Programmierung von MS-DOS beispielsweise nicht die Verwaltung von Prozessen. Dies ist entscheidend, wenn das Bewertungsprogramm nicht als eine binäre Datei, sondern als ein Skript gestartet wird. Werden in diesem Skript Kindprozesse gestartet, erfährt das Bewertungsskript nichts davon. Dadurch kann es passieren, daß das (MS-DOS-)Bewertungsskript ein Programm (als Skript) startet, abwartet, bis dieses Skript beendet wurde und dann zur Bearbeitung des nächsten Kommandos übergeht. Es ist nicht garantiert, daß auch das Bewertungsprogramm, das ein Kindprozeß des aufrufenden Skriptes ist, gleichfalls bereits beendet wurde. Zur Lösung dieses Problems bietet es sich an, ein Hilfsprogramm zu erstellen, das den Aufruf des Bewertungsprogramms kapselt und alle Prozesse überwacht, die infolge dieses Aufrufs gestartet wurden.

Werden zur Bewertung einer Lösung verschiedene Simulationsprogramme benötigt, stellt sich zwangsläufig die Frage, wie mit den Schnittstellen zwischen ihnen umzugehen ist. Im Idealfall können die einzelnen Programme nacheinander durch das Bewertungsskript aufgerufen werden. Die Daten, die von den Programmen benötigt werden, sind bekannt und liegen vor oder werden von einem der zuvor ausgeführten Bewertungsprogramme erzeugt.

In der Realität sind jedoch zwischen den einzelnen Programmaufrufen Konvertierungsschritte notwendig. Hierzu müssen, so sie nicht bereits vorhanden sind, Programme zur Datenkonvertierung erstellt werden. Es ist zu berücksichtigen, daß die Konvertierung in der Regel mit einem Datenverlust verbunden ist. Es ist auch denkbar, daß eines der Bewertungsprogramme eine Fehler verursacht. Der Umgang mit diesen Fehlern sollte, soweit dies möglich ist, durch das Bewertungsskript behandelt werden.

Geht man bei einer Multikriterienoptimierung davon aus, daß die Bewertungsprogramme nur in der Lage sind, den Erfüllungsgrad von einzelnen Bewertungskriterien zu bestimmen, ist es notwendig, die einzelnen Kriterien in einer Zielfunktion zusammenzuführen. Die Zielfunktion wird am Ende des Bewertungsskriptes aufgerufen und berechnet die Güte der Lösung. Die Shell-Programmierung bietet nur eingeschränkte Möglichkeiten, die Zielfunktion mathematisch zu beschreiben (Termöllen 1993). Für die hier vorgestellte Softwarelösung wurde daher ein Tool geschrieben, das die Berechnung der Zielfunktion übernimmt.

3.3 Anforderungen an das Bauteilmodell

In den bisherigen Betrachtungen blieb das Optimierungsobjekt, das Bauteilmodell, noch völlig unberücksichtigt. Es ist jedoch festzustellen, daß die Qualität des Bauteilmodells in hohem Maß den Verlauf der Optimierung und damit ihr Ergebnis beeinflusst.

Es wurde bereits erwähnt, daß der Evolutionäre Algorithmus dem Bewertungsskript (und damit auch den Simulationsprogrammen) in einer Datei eine Beschreibung der zu bewertenden Lösung zur Verfügung stellt. Bei dieser Beschreibung handelt es sich um die variablen Größen (Parameter) des Modells. In den bisherigen Arbeiten der Autoren beschrieben die Parameter immer eine Modellgeometrie. Das CAD-System verwendet diese Parameter, um aus einem CAD-Master-Modell die Geometrie der aktuell zu bewertenden Lösung zu erzeugen. Es ist jedoch ohne weiteres möglich, die beschriebene Vorgehensweise auf andere Simulationsprogramme zu übertragen, wenn sie eine parametrische Repräsentation der Modelle unterstützen.

Die Qualität des Master-Modells hat wesentlichen Einfluß auf die Automatisierbarkeit der Bewertung. Ein schlecht parametrisiertes Modell kann es notwendig machen, das Modell während der Bewertung manuell nachzubearbeiten mit der Folge, daß der durch die Automatisierung angestrebte Zeitvorteil nicht erzielt werden kann. Des Weiteren kann es aufgrund einer ungenügenden Parametrisierung vorkommen, daß sich aus dem Master-Modell kein

Modell zur Bewertung ableiten läßt. Diese Ausfälle beeinflussen das Ergebnis der Optimierung.

Ein „gutes“ parametrisches Modell besitzt nur wenige variable Größen (Führungsparameter) und ist dennoch in der Lage, durch die Definition weiterer Parameter in Abhängigkeit von den Führungsparametern, den Lösungsraum vollständig zu beschreiben (Vajna 1999). Die Erstellung eines solchen Modells verlangt im Vorfeld der Optimierung einen erhöhten Aufwand, denn der Produktentwickler muß sich frühzeitig Gedanken über die Struktur seines Modells machen, die sich so weit wie es möglich ist, am logischen Aufbau des zukünftigen Produktes orientieren sollte. Dieser Mehraufwand ist aber angesichts des oben erwähnten Zeitverlustes infolge von Nacharbeit vollends gerechtfertigt.

4 Beispiele für die Automatisierung von Anpassungskonstruktionen

In diesem Kapitel wird anhand von zwei Beispielen gezeigt, wie durch die Integration von Simulations- und Berechnungsprogrammen zu einem Optimierungssystem die Anpassungskonstruktion eines Produktes automatisiert werden kann.

4.1 Optimierung eines Recurve-Bogenmittelteils

Die Leistungssteigerungen der Spitzensportler sind auch das Ergebnis einer verbesserten Interaktion zwischen Athlet und Sportgerät. Empirische Untersuchung beim Bogenschießen lassen vermuten, daß eine Gewichtsreduktion des Sportbogens zur Steigerung der Treffergenauigkeit der Schützen beitragen kann. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Sportwissenschaften der Universität Magdeburg wurde deshalb ein vorhandener Sportbogen der Firma Hoyt hinsichtlich der Kriterien Gewicht und Spannungsverteilung optimiert (Heller 2002).

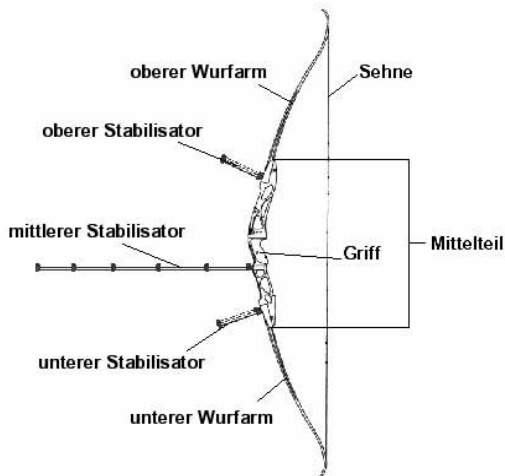


Abb. 1: Aufbau eines Sportbogens (Heller 2002)

Ein Sportbogen besteht aus einem Mittelteil, der Sehne und zwei Wurfarmen (vgl. Abb. 1). In der Regel verwenden die Schützen zusätzlich Stabilisatoren, die an dem Mittelteil angeschraubt werden. Mit ihrer Hilfe werden die Schwingungen beim Abschuß gedämpft und die Treffergenauigkeit erhöht.

Das Bogenmittelteil besteht aus einem Griff, einem oberen und einem unteren Teilstück, an das sich jeweils ein System zur Aufnahme eines Wurfarms anschließt. Das Bauteil ist aus Sicht des Schützen nicht symmetrisch. Das obere Teilstück weicht in seiner Form von der Mittellinie des Bogens ab und bildet so das Schußfenster.

In der Regel wird ein Bogenmittelteil aus Leichtmetalllegierungen, wie Aluminium und Magnesium, gefertigt. Mit einem Gewicht zwischen 1000 und 1500 Gramm hat es den größten Anteil am Gesamtgewicht des Bogens. Zur Gewichtsreduktion sind im oberen und unteren Teilstück des Mittelteils Durchbrüche im Material vorhanden. Die Variation der Durchbrüche bietet ein großes Potential zur Gewichtsreduktion, daher konzentrierte sich die Optimierung des Bogens auf das Mittelteil.

Da kein Modell eines Sportbogens zur Verfügung stand, wurde zunächst das Mittelteil eines Recurve-Bogens der Firma Hoyt vermessen. Auf diesen Abmessungen basierend wurde anschließend im CAD-System Pro/ENGINEER das parametrische CAD-Modell des Recurve-Bogenmittelteils erstellt.

Zur Variation der Modellgeometrie wurden 31 Parameter definiert, mit denen Querschnitte, Wandstärken, Abstände sowie Anzahl und Form der Durchbrüche gesteuert werden konnten. Wie im Original-Modell der Firma Hoyt weisen auch im CAD-Modell die Durchbrüche eine viereckige Form auf. Durch diese Form können die Elemente sehr gut an eine veränderte Rohform des Mittelteils, die ebenfalls während der Optimierung verändert wurde, angepaßt werden. Auf diese Weise ist es möglich, eine große Vielfalt an Lösungsvarianten zu erzeugen.

Zunächst war es das Ziel der Optimierung, durch eine Veränderung der Geometrie das Gewicht des Mittelteils und gleichzeitig die Spannung im Bauteil zu reduzieren. Zusätzlich sollte ein gleichmäßige Verteilung der Spannungswerte erreicht werden, so daß die Zielfunktion als Summe der gewichteten Kriterien

- Bauteilgewicht,
- Spannungsmittelwert im Bauteil und
- Standardabweichung der Spannungswerte

formuliert wurde.

Zur Berechnung des Bauteilgewichtes und der Spannungswerte wurde Pro/MECHANICA eingesetzt, das durch einen Aufruf in der trail-Datei aus Pro/ENGINEER heraus gestartet wurde. Als Maß für die Gleichverteilung wurde die Standardabweichung über alle Spannungswerte berechnet.

Die Berechnung der Spannung erfolgte in Pro/MECHANICA nach der GEA-Methode (Geometric Element Analysis). Diese Berechnungsmethode besitzt weitgehende Ähnlichkeiten zu der Finite-Elemente-Methode (FEM). Sie verwendet jedoch andere geometrische Elemente zur Erzeugung des Berechnungsnetzes, was bei komplizierten Bauteilformen zu weniger Elementen führt. Die Strukturanalyse liefert die Vergleichsspannung nach von Mises und die maximale Verformung als Maß für die Steifigkeit des Modells. Die Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer Strukturanalyse.

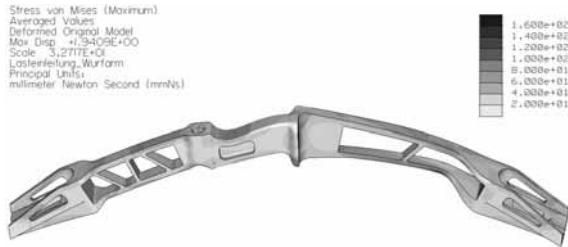


Abb. 2: Ergebnis einer Strukturanalyse (Heller 2002)

Mit den besten Lösungen, die der Algorithmus in den ersten Optimierungsdurchläufen erzeugte, konnten die oben genannten Ziele gut erreicht werden. Es zeigte sich jedoch, daß bei diesen Lösungen die Verschiebung der Aufnahmesysteme der Wurfarme unzulässig hoch war. Es war daher notwendig, die Zielfunktion zu überarbeiten, so daß auch die maximal zulässige Verschiebung vom Algorithmus bei der Optimierung berücksichtigt wurde.

Die Optimierung der Modellgeometrie lieferte eine Gewichtsreduktion gegenüber einem Standardmodell von 10 - 25%. Erwartungsgemäß stiegen im optimierten Modell die Spannungswerte gegenüber dem Originalmodell an. Gleichzeitig war festzustellen, daß die durch das Material festgesetzte Streckgrenze und Zugfestigkeit besser als im Originalmodell ausgenutzt wurden.

4.2 Optimierung einer Konverteranlage

Eine Konverteranlage ist ein System zur Reduktion des Schadstoffanteils von Abgasen. Sie wird u.a. in der Automobilindustrie eingesetzt und besteht hier aus den Anschlußrohren, dem Eingangskonus, dem Konverter (Katalysator) und dem Ausgangskonus. Die Konen bilden den Übergang von den Anschlußrohren zum Konverter, wobei dem Eingangskonus die besondere Aufgabe der Verteilung der Strömung auf die Katalysatoroberfläche zu kommt. Der Konverter nimmt den eigentlichen Katalysator auf.

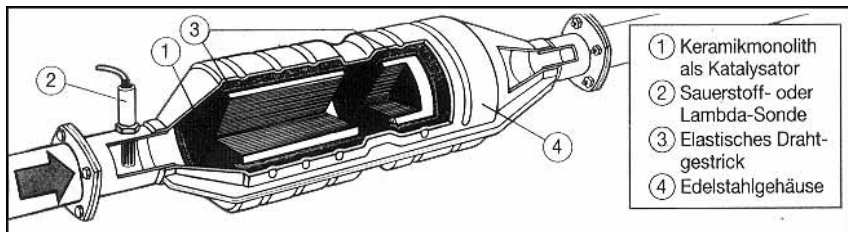


Abb. 3: Aufbau eines Katalysators (Quelle: Fonds der chem. Industrie)

Das Ziel der Optimierung, die gemeinsam mit der Volkswagen AG durchgeführt wurde, war es, die Konverteranlage durch eine Veränderung von Anströmung und der Variation der Trichterform so anzupassen, daß die Gleichverteilung der Strömung auf der Katalysatoroberfläche erhöht und der Wirkungsgrad der Konverteranlage verbessert wird. Als Maß für die Gleichverteilung wird bei der Berechnung von Konverteranlagen der *uniformity index* genutzt.

Zunächst wurde die Bauteilgeometrie der Konverteranlage und insbesondere des Konverters und des Eingangskonus mit Hilfe des CAD-Systems Pro/ENGINEER modelliert. Bei der Modellbildung der Konverteranlage waren neun Parameter im Bereich des Einlasstrichters zu

beachten. Der Wertebereich der variablen Größen (Parameter) wurde durch Bauraumrestriktionen des Fahrzeugunterbodens eingeschränkt. Als Repräsentationsschema des Modells wurden dem Evolutionären Algorithmus die Geometrieparameter in der Form eines Vektors übergeben.

Für die Strömungsberechnung wurde das CFD-System VECTIS eingesetzt. Vor dem Start der Optimierung war es notwendig, die Randbedingungen zu definieren. So wurden der Ein- und Auslaß, der Massenstrom, die Temperatur- und Druckverhältnisse u.a. festgelegt. Diese Informationen wurden in einer Datei gespeichert, auf die VECTIS während der Optimierung zu-griff.

Es wurde bereits herausgestellt, daß die Variation der Modellgeometrie im CAD-System Pro/ENGINEER erfolgte, die Strömungsberechnung hingegen im CFD-System VECTIS. Letzteres Programm benötigt zur Strömungsberechnung ein tri-File, das eine durch Dreiecke definierte Oberfläche beschreibt. Oberflächeninformationen in triangulierter Form können von Pro/ENGINEER als ren-Datei exportiert werden. Es war daher notwendig, die ren-Datei in das tri-Format zu konvertieren. Dazu wurde ein Software genutzt, die in der Volkswagen AG entwickelt worden war.

Die Strömungsberechnung wurde nicht auf der Workstation, auf der die Optimierung lief, durchgeführt, sondern aufgrund der besseren Leistungsfähigkeit auf einem Berechnungscluster der Volkswagen AG. Dazu wurde durch das Bewertungsskript ein VECTIS-Job-File erzeugt, das gemeinsam mit den zur Berechnung notwendigen Daten zum Cluster gesendet wurde. Das Bewertungsskript wartete, bis die Ergebnisse der Strömungsberechnung zur Verfügung standen und setzte dann die Auswertung der Daten fort.

Die Auswertung selbst gestaltete sich relativ einfach, da VECTIS angewiesen werden kann, den *uniformity index*, die einzige Zielgröße der Optimierung, in einer separaten Datei zu speichern. Der Inhalt dieser Datei wurde dem Evolutionären Algorithmus als Gütewert der Berechnung zurückgegeben.



Abb. 4: Anpassung der Anströmung der Konverteranlage (ursprünglich - hell, optimiert - dunkel)

Das Ergebnis der evolutionären Entwicklung der Konverteranlage war eine Änderung der Geometrie, die aufgrund einer neuartigen Anströmung der Katalysatoroberfläche zu einem besseren Wirkungsgrad des Katalysators führte (vgl. Abb. 4). Die Aufgabe wurde gemeinsam mit den bearbeitenden Konstrukteuren diskutiert. Dabei zeigte sich, daß Lösungsvarianten, die ähnlich der vom Evolutionären Algorithmus erzeugten Varianten waren, früher wegen des erwarteten hohen Druckverlustes nicht betrachtet und daher verworfen wurden. Der Einsatz des Algorithmus eröffnete ihnen eine neue Betrachtungsweise der Problematik.

5 Kritische Diskussion

In den letzten Kapiteln wurden einige Schwierigkeiten, die bei der Realisierung der vorgestellten Vorgehensweise bewältigt werden müssen, bereits aufgezeigt (z.B. Erstellung eines parametrischen Master-Modells, Auswahl und Kombination Simulationswerkzeuge). Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß eine Optimierung nur dann erfolgreich durchgeführt werden kann, wenn es gelingt, von dem zu optimierenden System ein Modell zu erstellen, das einerseits die wesentlichen Charakteristika des realen Problems widerspiegelt und das andererseits genügend einfach ist, um mit den vorhandenen Simulationswerkzeugen bewertet werden zu können. Bei der Modellbildung muß beiden Zielen gleichermaßen Rechnung getragen werden.

Bezogen auf den in dieser Arbeit vorgestellten Lösungsansatz für eine automatisierte Anpassungskonstruktion, bedeutet dies, daß sich der Produktentwickler über die Kriterien, die zur Bewertung des Produktes herangezogen werden sollen, im Klaren sein muß. Weiterhin muß er in der Lage sein, über die Bewertungskriterien eine Zielfunktion zu definieren, die letztlich Auskunft über die Güte einer Lösung gibt.

Für den Produktentwickler sind die oben genannten Bearbeitungsschritte nicht neu, entsprechen sie doch einem Schema, das auch in der „traditionellen“ Produktentwicklung Anwendung findet. Dennoch ist festzustellen, daß den Produktentwicklern die Auswahl der Bewertungskriterien und Definition der Zielfunktion in der Regel schwer fällt. In den in dieser Arbeit vorgestellten Beispielen war es der Fall, daß trotz intensiver Diskussion um die Bewertungskriterien und die Zielfunktion, die Optimierung vorzeitig gestoppt werden mußte, weil die vom Evolutionären Algorithmus erzeugten „besten“ Lösungen nicht den Vorstellungen der Produktentwickler entsprachen und eine Änderung der Zielfunktion notwendig wurde.

Die Autoren sehen die Gründe für diese Unsicherheit bei der Festlegung der Zielfunktion darin, daß die „traditionelle“ Produktentwicklung ein hohes Maß an Intuition beinhaltet und Entscheidungen oft „aus dem Bauch heraus“ getroffen werden. Der Einsatz von Evolutionären Algorithmen in der Produktentwicklung zur Automatisierung von Problemlösungsprozessen verlangt jedoch eine gewisse „Exaktheit“ bei der Beschreibung des Problems. Die derzeit in der Informationstechnik zur Verfügung stehenden Algorithmen sind zwar in der Lage, Entscheidungen aufgrund unscharfer Informationen zu treffen, doch sie vermögen es nicht, die Intuition des Menschen zu ersetzen.

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag thematisierte die automatisierte Optimierung parametrischer Bauteile mit dem Ziel, die Produktentwicklungszeit für Anpassungskonstruktionen zu verkürzen. Anhand zweier Beispiele wurde gezeigt, wie ein Regelkreis zur Bauteiloptimierung aus den Elementen „Erzeugen“ und „Bewerten“ aufgebaut und automatisch durchlaufen werden kann.

Ausgehend von der Charakterisierung der Produktentwicklung als Optimierungsprozeß mit evolutionärem Charakter, wurde vorgeschlagen, die Lösungen von einem Evolutionären Algorithmus erstellen zu lassen. Zur Bewertung der Lösungen wurden Simulationsprogramme genutzt, mit denen bereits in der Konzeptionsphase die Eigenschaften des zukünftigen Produktes bestimmt werden können.

Die Arbeit stellte auch die Schwierigkeiten, die bei der Umsetzung des Konzeptes auftraten, heraus. Neben den Problemen bei der technischen Umsetzung der automatisierten Bewertung durch das Bewertungsskript, zählen hierzu die Auswahl der Bewertungskriterien, die Definition der Zielfunktion und die Erstellung eines geeigneten parametrischen Master-Modells.

Die vorgestellten Beispiele machten deutlich, daß eine automatisierte Anpassungskonstruktion zu einer Verkürzung der Produktentwicklungszeit beitragen und zu überraschenden Ergebnissen führen kann.

Literatur

- Darwin Ch. (2001): The Origin of Species. Frankfurt: Penguin Books.
- Heller, M. et. al. (2002): "Analyse, Modellierung und Optimierung eines Recurve-Bogenmittelteils unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen". In: Roemer, K. et. al. (Hrsg.): Sporttechnologie zwischen Theorie und Praxis. Aachen: Shaker-Verlag. S. 33-42.
- Pohlheim, H. (1999): Evolutionäre Algorithmen. Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis (VDI-Buch). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Termöllen, P. (1993): Shell-Programmierung ... im Alleingang. Die Korn-Shell in der Praxis.. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Vajna, S.; R. Schmidt; M. Schabacker (1999): "Methodical and Systematical Parametrisation in Product Modelling". In: Proceedings ICED 99. München.
- Vajna, S.; S. Clement; A. Jordan (2002): "Autogenetic Design Theory. An Approach to Optimise both Design Process and the Product". In: ASME Design Engineering Technical Conference. Montreal, Canada.

Prof. Dr.-Ing. Sándor Vajna
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Institut für Maschinenkonstruktion
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
E-Mail: sandor.vajna@masch-bau.uni-magdeburg.de

Dipl.-Ing. André Jordan
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Institut für Maschinenkonstruktion
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
E-Mail: andre.jordan@masch-bau.uni-magdeburg.de

Dipl.-Ing. Steffen Clement
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Institut für Maschinenkonstruktion
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
E-Mail: steffen.clement@masch-bau.uni-magdeburg.de

Diskussion

Prof. Stelzer

Stellen Sie bitte an Hand der Beispiele noch einmal heraus, wie das von Ihnen entwickelte Verfahren zu neuen Lösungen geführt hat, die in der herkömmlichen Weise nicht gefunden worden wären.

Dipl.-Ing. Jordan

Der Produktentwickler erzeugt Varianten, bewertet sie und wählt die besten Varianten aus. Diese werden dann in verschiedenen Alternativen ausgearbeitet und detailliert. Aus diesen Lösungsalternativen werden erneut die besten ausgewählt und detailliert. Diese Vorgehensweise kann durch einen evolutionären Algorithmus beschrieben werden. Evolutionäre Algorithmen sind daher am ehesten in der Lage, den Konstrukteur bei der Variantenfindung zu unterstützen. Selbstverständlich können und sollen sie ihn nicht ersetzen.

Prof. Stelzer

Sie sprachen davon, dass für die Lösung einer Aufgabe die Kenntnis des Problems nicht erforderlich ist. Ohne Kenntnis des Problems dürfte es auch keine Problemlösung geben.

Dipl.-Ing. Jordan

Wenn der Konstrukteur arbeitet, hat er natürlich ein Ziel. Das ist ein momentanes Abbild des momentanen Problems. Beide, Problem und Abbild, verändern sich ständig. Die Anforderungsliste kann noch so viele Informationen enthalten, sie wird nie ein vollständiges Abbild des Problems darstellen.

Für den Einsatz unserer Software muss natürlich das Problem insofern bekannt sein, dass die Zielfunktion durch das Zusammenwirken der einzelnen Zielkriterien eindeutig beschrieben ist. Der evolutionäre Algorithmus benötigt für die Erzeugung einer Variante jedoch keine Informationen über die Umgebung und die Bewertung der Variante. Er erzeugt das Produkt entsprechend der in ihm festgelegten Bedingungen. Die Bewertung erfolgt dann durch die Umgebung. Vom Algorithmus wird die Bewertung des Produktes als Vorgabe für die Erzeugung einer neuen Produktvariante genommen. Das eigentliche Wissen über den Problemraum ist für die Abarbeitung des Algorithmus jedoch nicht erforderlich.

Dr. Wegmann

Die Bezeichnung Algorithmus kennzeichnet in der Mathematik ein Verfahren, das mit Sicherheit zum Ziel führt. Ist das bei evolutionären Algorithmen auch so?

Dipl.-Ing. Jordan

Der Begriff des „Evolutionären Algorithmus“ wurde in der Informationstechnik geprägt.

Er hat wie auch andere Optimierungsverfahren das Problem, dass er in lokalen Minima hängen bleiben kann. Er hat jedoch auf Grund seiner Struktur, dass er wahrscheinlichkeitsbasiert arbeitet, bessere Möglichkeiten aus einem lokalen Optimum wieder herauszukommen. Bei mehrfachem Durchlauf des Algorithmus für das gleiche Problem werden im allgemeinen auch verschiedene Lösungen gefunden. Sie sind ähnlich, aber nicht identisch.

Prof. Brökel

Das Vorgehen basiert auf einer parametrischen Modellierung. Die Parameter beschreiben das Produkt vollständig, und mit dem Programm kann man dann nur durch Variation der Parameter geometrisch ähnliche Lösungen erhalten. Grundsätzliche topologische Änderungen

sind nicht möglich. Am Beispiel des Bogens sieht man das Ergebnis. Dort vorhandene trapezförmige Versteifungen bedingen Biegebeanspruchungen in der Struktur und die bedeuten, dass eine Optimierung der Steifigkeit nicht möglich ist. Das wäre nur bei reiner Zug-/Druck-Beanspruchung der Fall. Ideal wären dreieckige Strukturen.

Prof. Höhne

Die Leistung des Programms beschränkt sich also auf eine numerische Optimierung. Geringste Änderungen der Struktur, z.B. zusätzliche Durchbrüche, sind nicht möglich.

Meine Frage: Wie erfolgt eine Bewertung mit dem CAD-System Pro/ENGINEER?

Dipl.-Ing. Jordan

Es ist richtig, dass das Ergebnis einer Optimierung nur so gut sein kann wie das ihm zugrunde liegende Modell. Heutige CAD-Systeme bieten dem Anwender vielfältige Möglichkeiten. Durch den Feature-Einsatz ist es möglich, CAD-Modelle sehr flexibel zu gestalten. Die Gestaltung des parametrischen Modells ist die Aufgabe des Ingenieurs; ein Algorithmus ist dazu nicht in der Lage.

Der Algorithmus erzeugt Parameter. Das CAD-System Pro/Engineer verwenden wir zur Generierung des geometrischen Modells auf der Grundlage dieser Parameter. Die eigentliche Bewertung erfolgt mit dem Programm Pro/Mechanica. Der Begriff „Bewertung“ meint hier das Feststellen der Eigenschaften der Lösung. Eine vergleichende Bewertung der Lösungsalternativen untereinander ist mit den genannten Programmen nicht möglich.

Mit unserem Modell des Sportbogens waren dreieckige Strukturen nicht ausgeschlossen. Die Anzahl der Durchbrüche war gleichfalls variabel. Verschiedene Optimierungsläufe generierten unterschiedliche Optima, die geometrisch zwar verschieden, aber die Zielkriterien in ähnlich guter Weise erfüllten.

VIBRATION TESTS AT DESIGN AND CONSTRUCTION OF PIPING FOR STEAM AND HOT WATER

Hristo DRAGANCHEV, Stefan STEFANOV, Petko MARKOV, Emil STOEV

Technical University of Varna

ABSTRACT

The projects of steam and hot water pipelines of power plants, nuclear power stations and industrial enterprises is a complex engineering process. The present investigation covers problems closely related with decreasing vibration level of pipelines examined during exploitation tests. Based on finite elements techniques, methods for analysis of vibrocondition of pipelines and acoustic processes are developed. The methods are probated when solving particular problems of power and nuclear plants.

KEYWORDS

Piping, vibration, pressure fluctuation.

I. Introduction

The design of steam and hot water piping in Thermal and Nuclear Power Stations and in industrial enterprises is a complex engineering process, covering the following engineering activities:

- strength and seismic calculations;
- design engineering;
- development of design and technological documentation
- building and construction supervision;
- operational testing;
- development of methods and tools to decrease the piping vibrations when needed.

Steam and hot water piping are accepted in principle as vibration inactive dynamic systems, in view of the processes running in the heat exchangers, hence piping vibration calculations are not made usually in the design stage.

However, the experience of the Research and Production Laboratory for Vibrocontrol and Diagnostics of Machines and Constructions (RPL "VDMC") at the Technical University Varna (TUV) shows that during commissioning and operation of steam and hot water piping, increased vibrations are present frequently. In the last years, many countries introduced vibration standards for energy and industrial facilities [1, 2, 3, etc.]. This shows that the "vibration tests", have a significant importance during commissioning of piping.

This paper treats the main stages of study of steam and hot water piping vibrations.

II. Analysis of the Vibration Sources

The vibration sources of steam and hot water piping are of aerodynamic, hydrodynamic or mechanical nature. The tests of the main steam piping of Nuclear Power Plant (NPP) "Kozloduy", Thermal Power Plant (TPP) "Maritsa Istok -2" and TPP "Maritsa Istok -3", as well as of many Heating Plants (HP) and enterprises of the chemical industry allows to range the vibration sources as follows:

- pressure fluctuations;
- kinematic excitation.

Pressure fluctuations are initiated as a result of:

- flow turbulization at higher rates of steam flow;
- the processes of heating and steam separation in heat exchangers and steam generators;
- excitation of acoustic (hydrodynamic) resonances in the branches and in the piping as a whole.

The kinematic vibration excitation comes from the vibrations of the connected pumps as well as from the vibrations of the bearing structure.

The analysis of the vibration sources for a given piping is of great significance for developing of adequate measures for vibration damping.

Fig. 1 shows the measured values of dynamic pressure at the steam generator output and at the input of the turbine of the 440 MW unit of the NPP. The change of the character of the dynamic process is obviously due to combination of the vibration sources of aerodynamic origin, listed above.

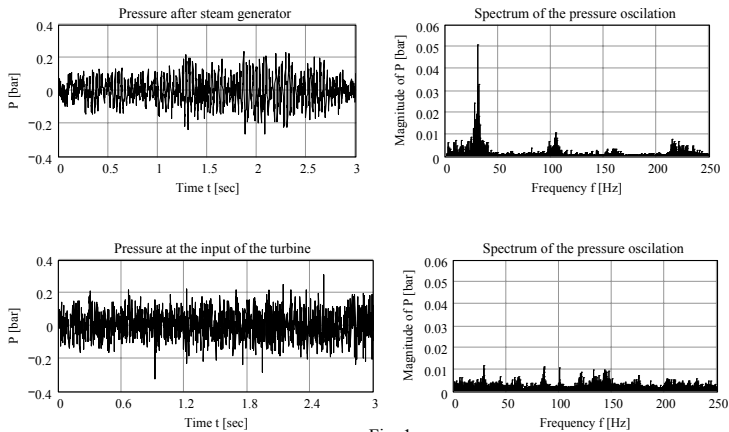


Fig. 1

Fig. 2 shows an axonometric circuit of low pressure feeding water piping of 220 MW units of TPP “Maritsa Istok –2” and TPP “Maritsa Istok –3”. Increased vibrations having effective value of the vibration speed above 25 mms^{-1} were measured for both units in the indicated points 1, 2 and 3, while the predominating frequencies were in the range 65-85 Hz and 35-45 Hz for the first unit and 50 Hz for the second unit.

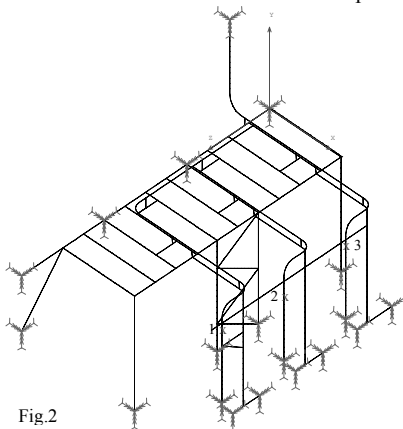


Fig.2

The measured dynamic components of the water pressure indicate that in the deaerating plant of the first unit they are generated pressure fluctuations with frequencies in the range 35-45 Hz и 65-85 Hz, which are amplified along the height of the piping up to 0,3-0,5 bar, while such dynamic

components are absent in the second unit and the increased vibrations are a result of the kinematic excitation on behalf of the feeding pumps and the occurrence of mechanical resonance in the piping.

An example for occurrence of acoustical resonances in non-flowing parts of piping is shown in Fig. 3 for the main steam piping of the 1000 MW unit of NPP. The pressure fluctuations, measured on the main route have amplitudes of 0.05 bar (item 1 in Fig. 3), while in the branches of the safety valves the pressure fluctuations reach 0.6-0.8 bar in various working regimes at frequencies 39.6 Hz for item 2 and 44.4 Hz for item 4. Consequently, acoustic resonances occur in these branches, which amplify 10 – 15 times the pressure fluctuations in the main steam piping, due to the low damping properties of the steam.

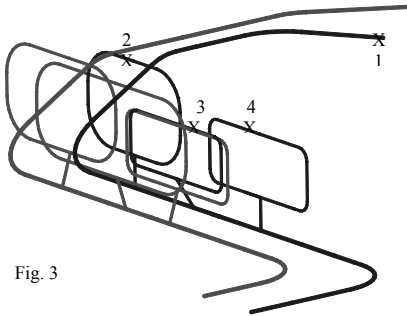


Fig. 3

The above examples display the need for measurement of the dynamic pressure in the

steam and hot water piping, in order to clarify the vibration sources and to develop methods for analysis of the dynamic stressed status of the piping and for analysis of the acoustic aero(hydro)dynamic processes running in the piping.

III. Method for Examination of the Vibration Status of the Piping

The finite-element method is applied for examination of the vibration status of steam and hot water piping, due to their complex configuration. The finite-element models of the piping and their support-suspension systems are built by one-dimensional elements such as PIPE, EL-BOW, BEAM and SPRING or by SHELL finite elements (Fig. 4).

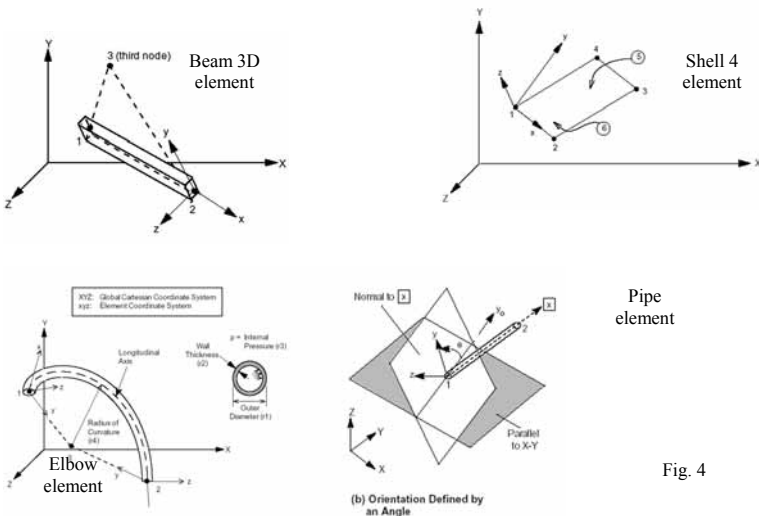


Fig. 4

The use of shell finite-elements allows direct prescription of the pressure variations as a dynamic loading, distributed on their internal surface. Due to the complex configuration of the piping, the use of shell finite-elements leads to considerable enlargement of the model degrees of freedom, which increases the errors of the numerical procedures and hampers the processing of the results of the calculations.

The use of elements of types PIPE and ELBOW for finite-element modeling does not allow to render an account of the dynamic internal pressure. It allows to account only the internal pressure as a static loading. To overcome the deficiencies of the both approaches for finite-element modeling, we developed a method for equivalent reduction of the internal dynamic pressure to dynamic forces and moments concentrated in the nodes.

The method includes:

Development of finite-element model of the piping with elements PIPE and ELBOW and determination of the displacements in the nodes at a single static internal pressure.

$$(1) \quad \{q(p)\} = [K]^{-1} \cdot \{F(p)\},$$

where $[K]$ is a stiffness matrix of the finite-element model; $\{F(p)\}$ is a vector of the external loading distributed on the internal surface; $\{q(p)\}$ is a vector of the nodes displacements.

- a finite-element model of the piping is developed, by elements of the type BEAM. The finite elements of each elbow are loaded consecutively with a single load (a force and a moment) and the matrix $[\delta q]$ is formed, which columns represent the vectors of displacement of each node;

$$(2) \quad [\delta q] = \begin{bmatrix} \delta q_{11} & \delta q_{12} & \dots & \delta q_{1n} \\ \delta q_{21} & \delta q_{22} & \dots & \delta q_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \delta q_{n1} & \delta q_{n2} & \dots & \delta q_{nn} \end{bmatrix}$$

- the vector of the equivalent concentrated forces $[F^E]$ is defined by the system of algebraic equations:

$$(3) \quad [\sigma q] \cdot \{F^E\} = \{\sigma q(p)\},$$

- the system of algebraic equations is predetermined. The solution of (3) is derived by the least squares method;

- the determined vector of equivalent forces is used as a vector of dynamic loading during the examination of the forced oscillations of the piping for a given frequency range – i.e. the law of motion of the piping is described by the system of differential equations:

$$(4) \quad [M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F^E(t)\}$$

$\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ where $[M]$, $[B]$ and $[K]$ are square matrices – respectively: mass, damping and stiffness; are vectors of displacements, velocities and accelerations of the nodes.

- during the solving of the system of differential equations (4), the damping for steam and hot water piping is usually set to 2% from the critical for the prescribed form of oscillation. [4].

This method for vibration analysis of piping is used to determine the dynamic displacements, speeds and accelerations of the nodes of the finite-element model and the tensions in its elements.

IV. Method for Numerical Examination of the Acoustic (Hydrodynamic) Resonances in the Piping

In view of the low frequency nature of the steam pressure fluctuations and the high sound speeds at the working parameters of the steam it is assumed that during propagation of acoustic waves along the length of the piping, the cross sections of the steam column remain plain and parallel – the steam has only axial motion. This assumption allows to approximate the steam (water) flow in the piping as an aggregate of flat finite-elements (for instance PLANE 2D for the system COSMOS/M). Fig. 5 shows the finite-element model of the deviation of the main steam piping to a safety valve. The following limitations of the degrees of freedom of the nodes were introduced during the elaboration of the model:

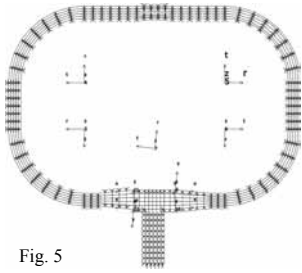


Fig. 5

- in the linear sections, the nodes have no degrees of freedom in transverse to the pipe axis direction;
- in the curvilinear sections the nodes have no degrees of freedom in the direction of the radius of the elbow.

The elastic characteristics of the material of the finite elements are defined by the condition for balance of the speed of the sound in steam (water) and the speed of sound in the material of the elements.

The speed of the sound of the steam is determined according to the formula:

$$(5) \quad c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho} k} ,$$

where p_0 and ρ are the static pressure and density of the steam accordingly and k is adiabatic coefficient.

The sound speed in the equivalent material of the finite elements is determined according to the formula:

$$(6) \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} ,$$

where E and ρ are the elasticity module and the material density, accordingly.

The elasticity module of the material of the finite elements is defined according to the formula:

$$(7) \quad E = p_0 \cdot k ,$$

The free oscillations of the so modeled steam column are described by the differential equations system:

$$(8) \quad [M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0$$

The forced oscillations are described by the differential equations system:

$$(9) \quad [M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\},$$

where $[M]$, $[C]$ and $[K]$ are accordingly the mass, the damping and the stiff matrices of the finite-element model;

$\{q\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{\ddot{q}\}$ – are the vectors of displacement, speed and acceleration node vectors, accordingly;

$\{F\}$ – vector of the external loading.

For the presented in Fig 5 finite element model, the pressure fluctuations in the main steam piping are applied as concentrated forces on the axis of the saddle tee. The pressure amplitudes along the length of the examined piping are determined according to the formula:

$$(10) \quad P = \beta_{\text{ДИН}} P_a,$$

where P_a is the amplitude of the pressure fluctuations in the steam piping;

P – amplitude of the pressure fluctuations in any point of the piping;

$\beta_{\text{ДИН}} = \sigma_e / \sigma_{ea}$ is a dynamics coefficient, equal to the ratio of the equivalent tensions in a given element of the mode, to the equivalent tensions in the first row of elements to which the external loading is applied.

V. Examples of Applications of the Presented Method for Vibration Analysis

Example V.1. The reasons for increased vibrations in the branches for safety valves of the main steam piping of 1000 MW unit of NPP are studied and the results are shown in Fig. 3. In the mode of 750 – 850 MW, the measured vibrations and pressure fluctuations in one of the branches have a predominant harmonic with frequency of 39.6 Hz and magnitudes 25 mm^{-1} и 0.8 bar accordingly, while the pressure fluctuations in the main steam piping are 0.04 bar. At loading of the unit above 850 MW, the measured vibrations and pressure fluctuations in the other branch with smaller measurement, have frequency of the predominating harmonic 44.4 Hz and magnitude of 19.7 mms^{-1} accordingly, and magnitude of the pressure fluctuations 0.6 bar at pressure fluctuations in the main steam piping 0.02 bar.

The calculation of the free oscillations of the steam column, according to the indicated on Fig. 5 finite-element model displayed that for the first branch the natural frequency is 38 Hz, while for the second branch is 45 Hz. The results of the calculations of the forced oscillations (see Fig. 6) show that the coefficients of dynamics of the pressure fluctuations in separate zones of the branch reach a value of 20.

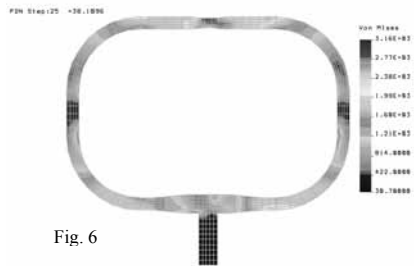


Fig. 6

The calculation of the free running and forced oscillations of the piping shows that in the region 37 Hz – 45 Hz, the system has 4 natural frequencies.

Consequently, the reason for increased vibrations of the piping is the simultaneous occurrence of acoustic and mechanic resonances in a given branch.

The decrease of the vibrations of the steam piping to levels 5 – 7 mms^{-1} is achieved by installation of 5 dampers type VES of the company GERB.

Example V.2

The reasons for increased vibrations of feeding low pressure water piping of two 220 MW units of TPP “Maritsa Istok – 2” and TPP “Maritsa Istok – 3” were investigated. The construction of the piping of both units are identical (see Fig. 3). The differences are in the thermal circuits of the units. The deaerator in the first plant increases the temperature of the feeding water with 35°C, while in the second plant the temperature is increased by 10°C.

The examination of the reasons for increased vibrations of the low pressure feeding water piping show that:

- the vibrations of the vertical risers of the piping to the feeding pumps reach 25 mms^{-1} and the predominating harmonics are in the frequency ranges 35 – 45 Hz and 75 – 85 Hz;
- the vibrations of the bearing metal construction reach 10 – 12 mms^{-1} and the predominating harmonics are in the same frequency ranges;
- the pressure fluctuations, measured after the deaerator and in the horizontal parts of the piping have amplitudes 0,1-0,15 bar и 0,3-0,5 bar accordingly, and the predominating harmonics are in the frequency ranges 35 – 45 Hz and 75 – 85 Hz;
- the numerical examination of the hydrodynamic resonances in the piping show that the water column in the piping has a natural frequency within the indicated frequency ranges, which allows occurrence of hydrodynamic resonance;
- the numerical examination of the free-running oscillations of the system piping-bearing construction displayed that there are 5 frequencies of free oscillations in the range 75 – 85 Hz, with maximal relative amplitudes in the vertical risers.

Consequently, the reason for the increased vibrations is the simultaneous occurrence of hydrodynamic and mechanical resonances in the piping.

The reduction of the vibrations of the piping and the bearing construction was achieved by increase of the stiffness of the bearing construction and with the installation of 3 piping dampers, designed by RPL “VDMC”. As a result of the corrections, the maximal vibrations of the piping were reduced bellow 10 mms^{-1} and of the piping – bellow 3 mms^{-1} .

The examination of the reasons for increased vibrations of the low pressure feeding water pipe line demonstrated that:

- the piping vibrations reach 25 mms^{-1} while the dominating harmonic is of 50 Hz and does not change, depending on the regime of system operation;
- the pressure fluctuations, measured after the deaerator and in the piping have low intensity (bellow 0.05 bar) and frequencies in the ranges 35 – 45 Hz and 75 – 85 Hz.
- the vibrations of the flange of the feeding pumps are increased and reach 7.8 mms^{-1} at frequency of 50 Hz.

The analyses of the results of the numerical examination of the dynamic pre-stressed and strained condition of the piping and the bearing construction and the data from the experimental investigations show that the reason for increased vibrations is the excitation of resonance oscillations in the piping, due to the kinematics excitation from the feeding pumps.

The decrease of the vibration level bellow 10 mms^{-1} was achieved by increase of the stiffness of the bearing construction of the piping and by decrease of the feeding pumps vibrations bellow 4.5 mms^{-1} .

VI. Conclusions

The practice of designing steam and hot water piping in the power energy sector and in the industrial enterprises needs improvements. It is necessary to introduce the requirement for vibration calculations of piping and their bearing constructions yet on the design stage.

The methods for vibration analysis of piping and for analysis of acoustic (hydrodynamic) processes on the basis of the "COSMOS/M" software system for finite-element analysis of constructions were tested and applied in the practice with proved operational ability.

References

1. Currucci V. A., Mueller R.T, Acoustically Induced Piping Vibrations in High Capacity Reducing Systems, 82-WA/PVP-8, ASME, New York, 1982.
2. Jungbauer D.E., Eckhardt L. L., Flow Induced Turbo-compressor and Piping Noise and Vibration Problems – Identification, Diagnosis and Solution. Proceedings of the Twenty-Sixth Turbomachinery Symposium, Texas, 1997.
3. VDI 3842, Schwingungen in Rohrleitungssystemen.
4. ASME. SECTION III. DIVISION1. SUBSECTION NC, Class2 Components. Piping Design NC3600 1995 EDITION.

Assoc. Prof. d-r Hristo Draganchev
e-mail: hr_st_dr@ms3.tu-varna.acad.bg

Dipl. Eng. Stefan Stefanov
e-mail: st_stephanov@abv.bg

Dipl. Eng. Petko Markov
e-mail: petko.markov@tu-varna.acad.bg

Dipl. Eng. Emil Stoev
e-mail: e_s_stoev@yahoo.com

Technical University of Varna
9010 Varna, Bulgaria

Simulation des zuverlässigkeitsbewerteten Ausfallverhaltens technischer Produkte unter Kollektivbeanspruchung

Prof. Dr.-Ing. H. SCHNEGAS

Hochschule Wismar, FB Maschinenbau/Verfahrens- und Umwelttechnik

Abstract

Der vorliegende Beitrag stellt Prognosemodelle vor, mit denen Konstrukteure, Instandhalter oder Anwender die zu erwartende Lebensdauer eines Produktes unter Kollektivbeanspruchung numerisch simulieren und graphisch darstellen können. Erkenntnisse aus der Betriebsfestigkeitslehre werden mit den für einen Produktausfall typischen wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesetzmäßigkeiten kombiniert. Dadurch lässt sich die Frage nach der Zuverlässigkeit eines Produktes nach einer definierten Betriebszeit bzw. zu einem bestimmten Zeitpunkt beantworten.

Keywords

Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Kollektivbeanspruchung

1 Klassische Lebensdauerprognose

Technische Produkte werden unter realen Einsatzbedingungen in der Regel stochastisch beansprucht. Zur besseren Handhabung wird die regellose Amplitudenfolge eines Beobachtungszeitintervalls analysiert und zu einem Beanspruchungskollektiv umgeformt. Die Stufen des Kollektivs werden dabei mit absteigender Amplitudenhöhe gebildet. Informationen zur Reihenfolge gehen leider verloren und viel diskutierte Reihenfolgeauswirkungen auf das Ausfallverhalten können nicht mehr berücksichtigt werden.

Zur Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer bei Kollektivbeanspruchung stehen eine Reihe von Schadensakkumulationshypothesen zur Verfügung. Die bekannteste und auch älteste Hypothese ist die Original-Miner Hypothese. Es gilt:

$$X = \frac{\sum x_i}{\sum \frac{x_i}{X_i}} \quad (1)$$

x_i sind dabei die Lastwechselzahlen die je Spannungsamplitudenhöhe im Beobachtungszeitraum auftraten und X_i die Lastwechselzahlen, die das betrachtete Konstruktionselement bei der jeweiligen Amplitudenhöhe ohne Ausfall mit einer genau definierten Wahrscheinlichkeit erreicht. Diese statistisch ermittelte Wahrscheinlichkeit steht für die Überlebenswahrscheinlichkeit, die wiederum ein Synonym für die Zuverlässigkeit ist.

Wird für die Lebensdauerlinie unter Berücksichtigung der Dauerfestigkeit B_N und der Grenzlastspielzahl X_N die Zweipunktegleichung

$$B_i^a \cdot X_i = B_N^a \cdot X_N \quad (2)$$

verwendet, kann die zu erwartende Lebensdauer durch unmittelbare Eingabe der Beanspruchungshöhen B_i und der zugehörigen Lastspielzahlen x_i bestimmt werden. Es gilt:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{X_N} \left(\frac{B_i}{B_N} \right)^a} \quad \text{für } R = \text{const.} \quad (3)$$

Alternativ sieht die Literatur die Berechnung einer äquivalenten Beanspruchung B_a mit

$$B_a = \sqrt[a]{\sum_{i=1}^n B_i^a \cdot \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}} \quad (4)$$

vor. Durch Einsetzen der äquivalenten Beanspruchung in die Lebensdauergleichung 2 ist ebenfalls die zu erwartende Lebensdauer X bei Kollektivbeanspruchung und für $R = \text{const.}$ numerisch bestimmbar. Hierfür gilt Gleichung (5).

$$X = \left(\frac{B_N}{B_a} \right)^a \cdot X_N \quad \text{für } R = \text{const.} \quad (5)$$

Der Nachteil liegt wie bereits beschrieben in der Betrachtung eines konstanten Zuverlässigkeitshorizontes, sodass Lebensdauern für Konstruktionselemente mit höheren Zuverlässigkeitsanforderungen klassisch nicht bestimmbar sind.

2 Zuverlässigkeitsbewertete Lebensdauerprognose

Soll nun die Zuverlässigkeit in die Lebensdauerbetrachtung mit einfließen, wird zunächst die spezifizierte Zweipunkte-Weibullverteilung in der Form

$$X_N(R_{Ausl.}) = \sqrt[\beta]{\frac{-\ln R_{Ausl.}}{-\ln R_N}} \cdot X_N \quad (6)$$

aufgestellt. Hiermit lässt sich in Bezug auf eine Lebensdauer bekannter Zuverlässigkeit und konstantem Beanspruchungshorizont (X_N, B_N, R_N) die zuverlässigkeitsbezogene zu erwartende Lebensdauer $X_N(R_{Ausl.})$ berechnen. In Anlehnung an die Gleichung 3 erhalten wir für eine Kollektivbeanspruchung die zuverlässigkeitsabhängige Lebensdauergleichung

$$X(R_{Ausl.}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{X_N} \left(\frac{B_i}{B_N} \right)^a \cdot \sqrt[\beta]{\frac{\ln R_N}{\ln R_{Ausl.}}}} \quad (7)$$

3 Zuverlässigkeitsbestimmung bei Kollektivbeanspruchung

Für die Bestimmung der "augenblicklichen" Zuverlässigkeit eines Bauteils vor Erreichen der mit Gleichung 7 geschätzten Lebensdauer, ist die Verwendung der äquivalenten Beanspruchung B_a aus Gleichung 4 denkbar. Für den äquivalenten Beanspruchungshorizont B_a be-

rechnet sich die aktuelle vorhandene Zuverlässigkeit zum Zeitpunkt x_a auf der Basis der Weibull-Verteilung mit

$$R_{\text{vorh.}}^a = \exp - \left(\frac{x_a}{T_a} \right)^\beta \quad \text{und} \quad T_a = \left(\frac{B_N}{B_a} \right)^a \cdot T_N \quad \text{mit} \quad R_{\text{vorh.}}^a = \exp - \left(\frac{x_a}{T_N} \cdot \left(\frac{B_a}{B_N} \right)^a \right)^\beta \quad (8)$$

Durch eine graphische Darstellung des vorhandenen Zuverlässigkeitshorizontes, der identisch ist mit einer Lebensdauerlinie im Wöhlerdiagramm, erhält der Anwender ein Abbild für die vorhandene Restlebensdauer des betrachteten Gebildes.

Reelle Zuverlässigkeitswerte sind allerdings nur nach Vollendung der jeweils betrachteten Kollektivgesamtlastspielzahl eines Beobachtungszeitintervalls zu erwarten, da innerhalb der Lastfolge des Kollektivs der Reihenfolgeeinfluss der Beanspruchungshorizonte mit Gleichung 8 keine Berücksichtigung findet und es somit zu einer Abweichung des Zuverlässigkeitsergebnisses kommt.

4 Zuverlässigkeitsbestimmung mit Berücksichtigung des Reihenfolgeeinflusses

Soll der Reihenfolgeeinfluss berücksichtigt werden, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen.

Erträgt ein Bauteil x_1 Lastwechsel der Beanspruchungshöhe B_1 , besitzt das Bauteil zum Zeitpunkt x_1 entsprechend Bild 1a die aktuelle Zuverlässigkeit R_1 mit

$$R_1 = \exp - \left(\frac{x_1}{T_1} \right)^\beta \quad \text{bzw.} \quad R_1 = \exp - \left(\frac{x_1}{T_N} \cdot \left(\frac{B_1}{B_N} \right)^a \right)^\beta \quad (9)$$

Folgen danach x_2 Lastwechsel einer Beanspruchung B_2 , verringert sich die Zuverlässigkeit R_1 auf die Zuverlässigkeit R_2 (siehe Bild 1b). Der Lebensdauerwert x_1^* ist dabei der theoretische Lastwechselwert, mit dem bei einer Beanspruchungshöhe B_2 die Zuverlässigkeit R_1 erreicht worden wäre. Der Wert ist mit Hilfe der Wöhlerliniengleichung zu berechnen. Es gilt :

$$R_2 = R_1 \left(\frac{x_1^* + x_2}{x_1} \right)^\beta \quad \text{mit} \quad x_1^* = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^a \cdot x_1 \quad (10)$$

Der Rechenansatz für R_2 ist hierbei auf die Umstellung von Gleichung 6 zurückzuführen. Analog gilt für ein drittes Beanspruchungs- und Lastwechselwertepaar gemäß Bild 1c

$$R_3 = R_2 \left(\frac{x_2^* + x_3}{x_2} \right)^\beta \quad \text{mit} \quad x_2^* = \left(\frac{B_2}{B_3} \right)^a \cdot (x_1^* + x_2) \quad (11)$$

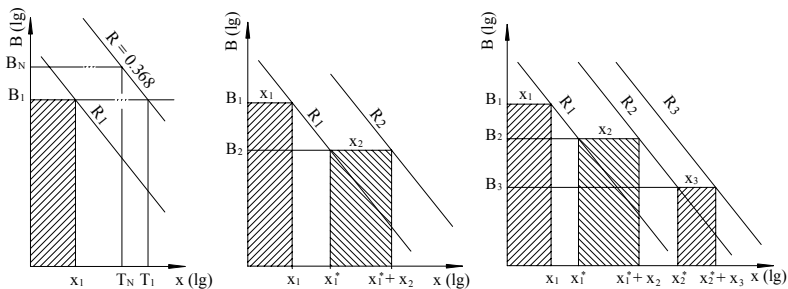


Abb. 1a-c : Schema der Zuverlässigkeitsentwicklung bei Kollektivbeanspruchung

Nach Verallgemeinerung der Lösungsansätze kann für die vorhandene Zuverlässigkeit einer Kollektivbeanspruchung nach n Stufen

$$R_{\text{vorh.}}^n = \exp \left[- \left(\frac{x_1}{T_1} \right)^\beta \cdot \prod_{i=2}^n \left(1 + \frac{x_i}{x_{i-1}^*} \right)^\beta \right] \quad \text{mit} \quad x_{i-1}^* = \left(\frac{B_{i-1}}{B_i} \right)^a \cdot (x_{i-2}^* + x_{i-1}) \quad (12)$$

$$i = 2, 3, \dots, n; x_0^* = 0$$

geschrieben werden, womit auch der Reihenfolgeinfluss beschreibbar wird. Eine konsequente Anwendung führt zur Erkenntnis, dass Lastwechsel hoher Beanspruchungshorizonte zu einer schnelleren Zuverlässigkeitsreduzierung führen als Lastwechsel niedriger Beanspruchungen. Für virtuelle $x_{i-1}^* < 1$ ist ein Zuverlässigkeitssprung bereits nach einem Lastwechsel zu berücksichtigen.

Mögliche Anwendungsgebiete liegen in der diagnostischen Überwachung sicherheitsrelevanter Bauteile im Zusammenhang mit der Instandhaltungsplanung.

5 Simulation fiktiver Konstruktionselemente

Alle bisher aufgezeigten Modelle gelten für Lebensdauerbetrachtungen an existierenden Bauteilen, wie sie aus der Sicht der Konstruktion frühestens an einem Prototyp vorgenommen werden können.

Sollen im Konstruktionsprozess bereits früher, also z.B. auf der Basis eines CAD-Modells Lebensdauerabschätzungen vorgenommen werden, ist die Kenntnis des Ausfallverhaltens einzelner Komponenten unter potentiellen Beanspruchungsfolgen erforderlich. Die Einzelzuverlässigkeiten sind zu einer Systemzuverlässigkeit entsprechend geltender Gesetzmäßigkeiten (siehe [1] und [2]) zu kombinieren.

Das Ausfallverhalten kann z.B. mit denen in der Tabelle gegebenen statistischen und festigkeitstheoretischen Eckdaten beschrieben werden. Anzuwenden ist eine synthetische Wöhlerlinie auf der Basis gegebener Parameter.

	a	b	T_x
Ermüdung ungekerbte Stäbe	12...15		5...8
gekerbte Bauteile			
- Spitzkerben	3 ... 4	∞	1,2 ... 1,4
- Normalkerben	5 ... 7	bzw. 2a-1	3 ... 5
- Flachkerben	6 ... 8		6 ... 8
- Schweißverbindung	4 ... 8		15 ... 25
- Kugellager	3	b = a	10
- Rollenlager	3,3		10
weitere Komponenten und Angaben in [1]			

In Anbetracht der relativen Neuheit des Fachgebietes Zuverlässigkeitstheorie im Maschinenbau sind die vorliegenden Daten natürlich bei weitem noch nicht ausreichend und somit ein lohnendes Arbeitsfeld aktiver Forschung.

Viel schwieriger erweist sich traditionell die Abschätzung möglicher Beanspruchungen. Klassisch werden Nennspannungen (B_{nenn}) ermittelt, die dann in Abhängigkeit vorhandener Systemparameter z.B. mit einem Anwendungs- oder Betriebsfaktor (K_B) auf einen maximalen Beanspruchungswert (B_{max}) transformiert werden (siehe Bild 2).

Für weitergehende Betrachtungen können nun im Bereich B_{\min} bis B_{\max} beliebige Beanspruchungsfolgen z.B. mit einem Zufallszahlengenerator erzeugt und mit den zuvor aufgezeigten numerischen Modellen hinsichtlich einer zu erwartenden Lebensdauer oder Zuverlässigkeit ausgewertet werden. Diese Vorgehensweise entspricht der Simulation des Ausfallverhaltens unter einer ebenfalls simulierbaren Beanspruchungsfolge.

Ein Einstufenkollektiv B_{\max} liefert dabei natürlich eine pessimistisch anzunehmende Lebensdauer bzw. Zuverlässigkeit, welches sicherlich hohen Sicherheitsansprüchen genügt, jedoch nicht einer kostenoptimalen Produktbetrachtung. Viel wahrscheinlicher ist hierbei eine Beanspruchungsverteilung, die wie in den meisten naturwissenschaftlichen oder technischen Anwendungsfällen einer Gleich- oder Normalverteilung folgt.

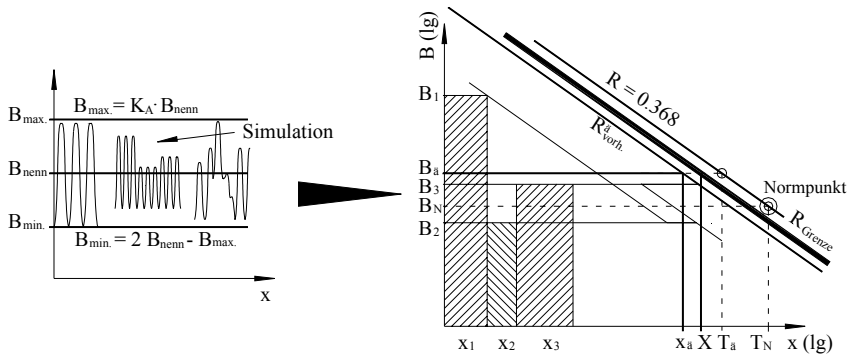


Abb. 2 : Schema der Zuverlässigkeitsentwicklung bei simulierter Kollektivbeanspruchung

Literatur

- [1] Schlottmann, D.; Schnegas, H.: Auslegung von Konstruktionselementen. Springer Verlag, Berlin, 2002
- [2] Schnegas, H.: Kosten- und zuverlässigkeitsbasierte Auslegungsmodelle maschinenbaulicher Produkte. Shaker Verlag, Aachen, 2002

Prof. Dr.-Ing. Henrik Schnegas
 Hochschule Wismar
 FB Maschinenbau / Verfahrens- und Umwelttechnik
 Fachgruppe Konstruktionstechnik
 Philipp-Müller Str. Haus 20
 PF 1210
 23952 Wismar

Tel. (03841) 753551
 e-mail : h.schnegas@mb.hs-wismar.de

Diskussion

Dr. Wegmann

Es ist prinzipiell anerkannt, dass die dargestellte Vorgehensweise besser ist als die der Sicherheitszahlen. Es gibt jedoch Hemmschwellen für ihre Akzeptanz in der Praxis. So ist die Ermittlung der Parameter schwieriger und auch die mathematischen Anforderungen steigen. Wäre es nicht möglich, das Verfahren in ein Rechenprogramm einzubinden und so für den Ingenieur leichter anwendbar zu machen?

Prof. Schnegas

Der erste Schritt muss sein, dem Ingenieur klar zu machen, dass Statistik ein wirksames Hilfsmittel für seine Arbeit sein kann. Ein Beispiel ist das Verfahren der statistischen Tolerierung, das sich bereits stärker durchsetzt. Voraussetzung ist, dass an den Hochschulen und Universitäten die Stochastik verstärkt gelehrt wird, dass nicht nur die Mittelwertbildung angewandt wird, sondern z. B. bei der Ermittlung von Festigkeitswerten von Werkstoffen auch deren Vertrauensbereich angegeben wird. Es muss klar sein: Statistik ist nicht zusätzlicher Aufwand, sondern ein verfügbares Arbeitsmittel. Rechenprogramme können ähnlich wie bei der Wälzlagerberechnung z.B. im Programm Mdesign aufgebaut sein. Dort wird die Berücksichtigung einer anderen Zuverlässigkeit ja praktisch durch Auswahl eines Parameters $a_{1,2}$ schon realisiert. Es muss einfach nur möglich sein, Wahrscheinlichkeitsbeiwerte in Abhängigkeit von der gewünschten Qualität des Erzeugnisses (Billigprodukte, Qualitätsprodukte) neben den traditionellen Werten einzugeben.

Prof. Rugenstein

Sollen Mathematiker oder Ingenieure die Lehre der Statistik an der Universität tragen?

Prof. Schnegas

Wichtig ist, dass die Beispiele nicht rein theoretisch sind, sondern dass mit Beispielen aus der Praxis des Ingenieurs die Möglichkeiten und Einsatzgebiete der Statistik und Wahrscheinlichkeitslehre aufgezeigt werden.

Prof. Schlottmann

In Rostock gibt es eine gute Zusammenarbeit mit den Mathematikern. In deren Lehrveranstaltungen wird sogar die technisch interessante Weibull – Verteilung behandelt.

Prof. Schnegas

Ich bin ständiger Gast in der Arbeitsgruppe „Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit“ im Verband deutscher Mathematiker und kann sagen, dass hier die Anzahl der Ingenieure und technisch Interessierten ständig zunimmt. Ich habe also die Hoffnung, dass es in dieser Beziehung aufwärts geht. Es ist natürlich noch viel Arbeit zu tun.

Theoretische Untersuchungen einer starren Ausgleichsrollenkupplung

ATANASOV, Zvjatko; BALTADJIEV, Angel; BOJINOV, Lubomir; RADEV, Nedyalko;

TU Varna

Einführung

Eine der Hauptfunktionen von Kupplungen neben der Übertragung eines Drehmomentes besteht im Ausgleichen von Fluchtungs- oder Lagefehlern von Wellen. Ursache von Fluchtungs- oder Lagefehlern können u.a. elastische Verformungen der Wellen und Lager unter Belastung sowie Ausrichtfehler bei der Montage sein.

Es ist eine Reihe von Konstruktionen bekannt, die Ausgleichsfunktionen haben:

- Kreuzkupplung – radialer Versatz
- Zahnkupplung – Winkel-, Radial-, Axialversatz
- Gelenkkupplung – Winkelversatz
- Elastische Kupplungen – kombinieren die Eigenschaften der oben genannten

Konstruktionen, haben aber leider größere Abmessungen, kleinere Tragfähigkeit und kurze Lebensdauer.

Sowohl Montage - und/oder Betriebsfehler als auch konstruktive Ursachen, die aus dem Funktionsprinzip resultieren, können radiale Nachgiebigkeit hervorrufen. So zeigt es das Beispiel der Schraubenpumpe der Firma „Nemo Pumpen“, bei der die Exzentrizität der Arbeitswelle vom Funktionsprinzip bestimmt wird (s. Bild.1)/1/. Bei dieser Konstruktion werden zwei Kupplungen angewandt, die einen Winkelausgleich ermöglichen.

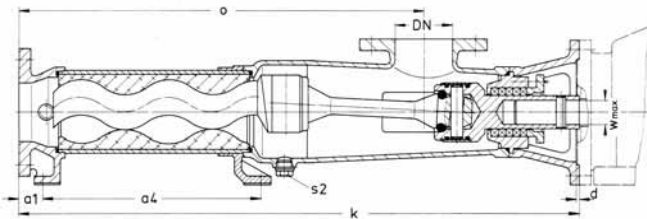


Bild 1.

Bei diesen Pumpen ist die Anwendung einer Kreuzscheibenkupplung ungünstig, da diese Konstruktionen nur kleine Winkelgeschwindigkeiten und kleine winklige Nachgiebigkeiten gestatten /3/.

Die Zahnkupplungen ermöglichen einen Winkelversatz im Intervall von 0.5 bis 1.5° /3/.

In /4/ wird die Konstruktion einer Ausgleichskupplung dargestellt, die die Anforderungen an diese Mechanismen besser erfüllt.

In diesem Beitrag wird die Konstruktion einer starren Ausgleichsrollenkupplung vorgestellt.

Hauptaufgaben

1. Entwicklung einer verbesserten Konstruktion einer Ausgleichsrollenkupplung, die einen großen Winkelversatz ausgleicht und relativ kleine Abmessungen hat.
2. Die gleiche Konstruktion wird theoretisch untersucht. Beziehungen für die Dimensionierung der Hauptkupplungselemente werden abgeleitet.
3. Die Hauptprojektparameter einer Baureihe für diese Konstruktion werden bestimmt.

Konstruktion und Wirkungsprinzip

Das erste der obengenannten Probleme ist mit dem in Bild 2 gezeigten Konstruktionsaufbau gelöst.

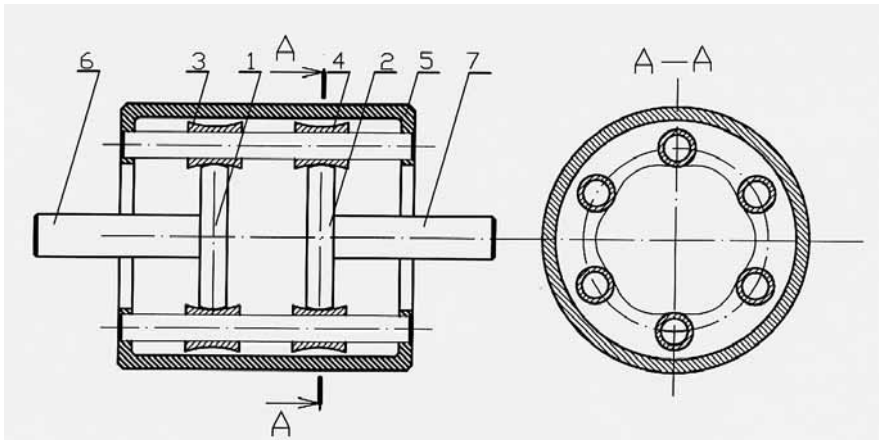


Bild 2.

Die Kupplung überträgt das Drehmoment von Welle (6) auf Welle (7) mit Hilfe der Halbkupplung (1), die die Rollen (3) bewegt.

Die Achsen der Rollen (3) sind im Gehäuse (5) untergebracht und dienen gleichzeitig auch als Achsen der Rollen (4). Die Rollen (4) sind ihrerseits im Kontakt mit der Halbkupplung (2), und so wird mit ihrer Hilfe die Welle (7) angetrieben.

Die Außenkontur der Halbkupplungen (1) und (2) hat eine bestimmte Anzahl von Nocken, die von unterschiedlichen Kurventypen gebildet werden /2/. Im Querschnitt senkrecht zur Drehachse sind die Drehscheiben (1) und (2) mit einem Kreisbogen mit Radius r_3 geformt (Bild 3).

Die Außenfläche der Rollen (3) und (4) entstehen durch Drehung eines Kreisbogens mit Radius r_4 um die Wellenmitte (Bild 3). Wegen der Montageverträglichkeit zwischen den Scheiben und Rollen soll der Radius r_4 die folgende Beziehung erfüllen:

$$r_4 \geq r_3 \quad (1)$$

Der Kreisbogen mit Radius r_4 bildet die Außenfläche der Rollen. Sein Zentrum muss mit der Drehachse der Scheiben (1) und (2) zusammenfallen, um einen Winkelversatz der Wellen (6) und (7) ausgleichen zu können.

Die Punkte zwischen den Nocken auf der Außenoberfläche der Scheibenprofile (1) und (2) befinden sich auf einem Kreis mit Durchmesser D (Bild 3), der folgende Bedingung erfüllt:

$$D = 2 \cdot r_4 \quad (2)$$

Der Rollendurchmesser im kleinsten Querschnitt ist mit d_2 beziehungsweise der Radius mit r_2 bezeichnet.

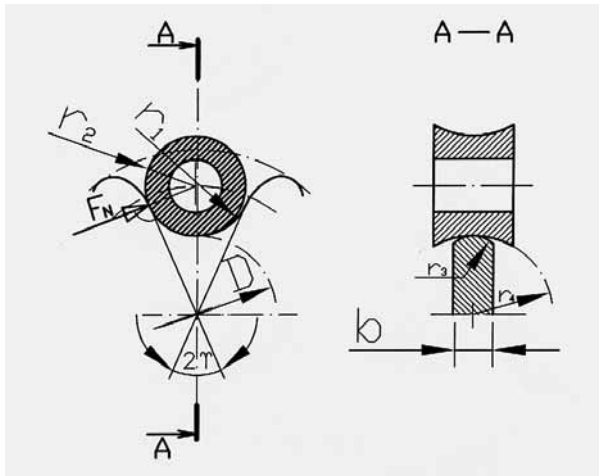


Bild 3

Analyse des Spannungszustandes der Kupplungselemente und Ermittlung der Hauptbeziehungen für ihre Berechnung

Aus Bild 3 wird deutlich, dass der Wert der Kontaktspannungen maßgebend für die Tragfähigkeit der Kupplung ist. Diese Kontaktspannungen entstehen zwischen den Rollen und der Halbkuplung bei der Übertragung des Drehmomentes.

Sie werden nach der Formel von Hertz bestimmt:

$$\sigma_H = \sqrt[3]{\frac{F_N \cdot E_{red}^2}{2 \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot \rho^2}} \quad (3)$$

wobei

F_N die Normalkraft senkrecht zu den Kontaktflächen der Rolle und des Nockens der Halbkuplung ist. Aus der Gleichgewichtsbedingung folgt:

$$F_N = \frac{2 \cdot k \cdot T}{z \cdot (D + d_2) \cdot \cos \gamma} \quad (4)$$

Dabei bezeichnen:

T – Drehmoment in Nm

z – Rollenzahl,

k – Belastungskoeffizient (berücksichtigt Überlastung),

γ – Kontaktwinkel, für den laut Bild 3 die folgende Formel gilt:

$$\sin \gamma = \frac{d_2}{D + d_2} \quad (5)$$

E_{red} – reduzierter E-Modul in N/m² der Werkstoffe für die Kontaktbauteile. Hier sind beide aus Stahl.

ν – Querkontraktionszahl, für Stahl beträgt sie 0,3.

ρ_{red} – reduzierter Krümmungsradius im Kontaktpunkt.

Für den reziproken Wert des Krümmungsradius unter Berücksichtigung, dass in den senkrecht zu einander stehenden Flächen die Radien r_1 , r_2 , r_3 und r_4 betragen, gilt:

$$\frac{1}{\rho_{\text{red}}} = \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \quad (6)$$

Im Weiteren werden folgende Konstruktionsparameter als dimensionslose Größen eingeführt:

$$\alpha = r_3 / r_4 \quad ; \quad \beta = r_4 / r_2 = D / d_2 \quad ; \quad \delta = r_1 / r_2 \quad (7)$$

Nach Einsetzen der Konstruktionsparameter aus Gl. (7) in Gl. (6) sowie nach Einsetzen von (4) und (5) in (3) folgt für die Kontaktspannungen:

$$\sigma_H = \frac{1}{D} \sqrt[3]{\frac{4k \cdot T \cdot E_{\text{red}}^2 \cdot \beta^2 (\alpha \cdot \beta (\delta - 1) + \delta (1 - \alpha))^2}{z \cdot \pi (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{\beta \cdot (\beta + 2)} \cdot \alpha^2 \cdot \delta^2}} \quad (8)$$

Die von den Materialeigenschaften abhängigen Werte sind im Faktor Z_M zusammengefasst:

$$Z_M = \sqrt[3]{\frac{E_{\text{red}}^2}{\pi \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (9)$$

Für Stahl gilt $Z_M = 25 \cdot 10^6 \text{ Pa}^{2/3}$

Mit den dimensionslosen Parametern aus Gl.7 folgt für Z_H :

$$Z_H = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \beta^2 \cdot [\alpha \cdot \beta (\delta - 1) + \delta (1 - \alpha)]^2}{\alpha^2 \cdot \delta^2 \cdot \sqrt{\beta \cdot (\beta + 2)}}} \quad (10)$$

Mit den bisher eingeführten Größen folgt für die Kontaktspannungen

$$\sigma_H = \frac{Z_H \cdot Z_M}{D} \sqrt[3]{\frac{k \cdot T}{z}} \leq \sigma_{HP} \quad (11)$$

wobei σ_{HP} die zulässige Kontaktspannung ist.

Bei der Dimensionierung der Konstruktion gilt die Ungleichung (11) für die Berechnung des Durchmessers D der Halbkupplung. Des Weiteren wurden folgende dimensionslose Koeffizienten eingeführt:

$$\alpha = r_3 / r_4 \quad ; \quad \beta = r_4 / r_2 = D / d_2 \quad ; \quad \delta = r_1 / r_2$$

$$D \geq \frac{Z_H \cdot Z_M}{\sigma_{HP}} \sqrt[3]{\frac{k \cdot T}{z}} \quad (12)$$

Bei der Wahl des Koeffizienten β muss berücksichtigt werden, dass sich die beiden Rollen bei der Montage nicht berühren. Dafür gilt aus der Kupplungsgeometrie (Bild 3):

$$(D + d_2) \cdot \sin \frac{\pi}{z} \geq d_2 + D(1 - \cos \varphi) \quad (13)$$

φ – Neigungswinkel der Wellenachse, bezogen auf die Rollachsen beim Winkelausgleich
Nach Dividieren der Formel (13) durch d_2 und Umformen, bekommt man für die Werte des Koeffizienten β folgenden Ausdruck:

$$\beta \geq \frac{1 - \sin \frac{\pi}{z}}{\sin \frac{\pi}{z} - (1 - \cos \varphi)} \quad (14)$$

Die Analyseergebnisse von (14) sind in der Tabelle 1 dargestellt. Dabei betragen $z = 2 \dots 12$ und $\varphi = 0^\circ, 25^\circ$ und 40° .

Tab.1

z		2	3	4	6	8	10	12
$\varphi = 0$	β -größer als	0	0.16	0.41	1.00	1.61	2.23	2.86
$\varphi = 25^\circ$		0	0.17	0.48	1.23	2.13	3.19	4.48
$\varphi = 40^\circ$		0	0.21	0.62	1.88	4.14	9.07	29.60

Aus Ungleichung (14) kann die maximal zulässige Rollenzahl Z_{\max} in Abhängigkeit des Winkels φ abgeleitet werden:

$$z_{\max} \leq \frac{\pi}{\arcsin(1 - \cos \varphi)} \quad (15)$$

Dabei gilt, dass der Zähler von (14) größer als 0 ist.

Bei Winkel $\varphi = 40^\circ$ bekommt man aus (15) $Z_{\max} < 13,3$. Das heißt, dass die reale maximale Rollenzahl $z = 12$ ist.

Aus Gleichung (10) berechnet man den dimensionslosen Parameter Z_H für die Werte

$\alpha = 0.5 \dots 0.9$; $\beta = 0.25 \dots 4$ und $\delta = 1.2$.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Tab.2

Z_H									
$\alpha \downarrow$	$\beta \rightarrow$	0.25	0.50	1.00	1.20	1.50	2.00	2.50	4.00
0.5		0.71	1.02	1.46	1.62	1.83	2.16	2.46	3.31
0.6		0.55	0.80	1.17	1.30	1.49	1.78	2.06	2.85
0.7		0.42	0.62	0.94	1.05	1.22	1.49	1.75	2.50
0.8		0.30	0.46	0.74	0.84	0.99	1.24	1.49	2.22
0.9		0.20	0.32	0.56	0.66	0.80	1.04	1.28	2.00

Bestimmung der Hauptprojektparameter und Analyse der erzielten Ergebnisse

Aus der abgeleiteten Beziehung (12) zur Bestimmung des Durchmessers D der Halbkupplung ist ersichtlich, dass bei geometrischer Ähnlichkeit der Verhältnisse der Baureihenabmessungen der Durchmesser D proportional dem Ausdruck $\sqrt[3]{k \cdot T}$ ist.

Um den Einfluss der übrigen Parameter (z, α, β) auf die Abmessungen der Kupplung festzustellen, wurden Berechnungen für $k \cdot T = 100 \text{ Nm}$, zulässige Spannungen

$\sigma_{\text{HP}} = 800 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ sowie $Z_M = 25 \cdot 10^6 \text{ Pa}^{2/3}$ durchgeführt.

Geometrische Parameter, die einen Einfluss auf die dimensionslose Größe Z_H haben, wurden variiert. Es werden Varianten mit einer Rollenanzahl $Z = 3, 4, 6, 8, 10$ und 12 durchgeführt, wobei für alle Varianten die gleichen Abmessungen von $\alpha = r_3 / r_4 = 0.9$ angenommen werden. Für $\beta = r_4 / r_2 = D / d_2$ werden die nächstgrößeren Werte bei $\varphi = 25^\circ$ angenommen aus den für jede Rollenanzahl minimal zulässigen Werten für diesen Parameter.

Zur Bewertung der Ergebnisse wird der Konstruktionsdurchmesser D_{gab} bestimmt, den man aus folgender Formel erhält:

$$D_{\text{gab}} = D + d_2 + d_2^{\text{max}},$$

wobei $d_2^{\text{max}} = d_2 + D \cdot (1 - \cos \varphi)$

Und endgültig folgt: $D_{\text{gab}} = D \cdot (2 - \cos \varphi) + 2 \cdot d_2$ (16)

Diese Berechnungsergebnisse sind in der Tab. 3 dargestellt.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass man minimale Abmessungen bei gleich bleibenden Belastungen und Rollenanzahl $Z = 4$ und 6 erhält. Die Analyse des Materialeinsatzes zeigt, dass die Variante mit vier Rollen wirtschaftlicher ist, da die Rollenbreite bei dem gleichen Winkel φ bedeutend kleiner wird, weil der kleinere Durchmesser D der Scheibe halb so groß ist.

Die endgültige Auswahl und Bewertung werden nach der Analyse der Ausgleichmöglichkeiten getroffen. Das ist auf das komplizierte Zusammenwirken zwischen Scheibe und Rollen in der Ebene zurückzuführen, die nicht mit der von den Achsen der Welle und des Gehäuses (5) bestimmten Ebene zusammenfallen (Bild 2).

Tab.3

z	β	Z_H	D, mm	d_2, mm	$D_{\text{gab}}, \text{mm}$
3	0.25	0.20	20	80	182
4	0.50	0.32	30	60	153
6	1.50	0.80	64	43	156
8	2.50	1.28	93	38	178
10	3.50	1.75	118	34	197
12	5.00	2.47	157	32	236

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse einer Baureihe für eine Konstruktion mit 4 und 6 Rollen bei gleichen geometrischen Verhältnissen und Werkstoffen.

Tab.4

k.T., Nm	z=4			z=6		
	D,mm	d ₂ ,mm	D _{gab} ,mm	D,mm	d ₂ ,mm	D _{gab} ,mm
25	19	38	96	40	27	98
40	22	44	112	47	32	115
63	26	52	131	55	37	134
100	30	60	153	64	43	156
160	35	70	179	75	50	182
250	41	82	208	87	58	212
400	48	96	243	102	68	248
630	56	112	283	118	79	288
1000	65	130	330	138	92	336

Zusammenfassung

Die erzielten Untersuchungsergebnisse gestatten folgende Schlussfolgerungen:

1. Die vorgeschlagene Konstruktion hat gute Ausgleichseigenschaften.
2. Es wurden Zusammenhänge zwischen Belastungen, geometrischen Parametern und Materialeigenschaften abgeleitet. Sie wurden analysiert und daraus die Begrenzungen bei der Wahl geeigneter Parameterwerte abgeleitet.
3. An Hand eines Beispiels wurde der Einfluss der Rollenanzahl auf die Hauptabmessungen der Kupplung untersucht. Es wurden zwei Baureihen mit vier und sechs Rollen für Drehmomente von 25 bis 1000 Nm entwickelt.
4. Weitere Untersuchungsschwerpunkte für die Ausgleichsmöglichkeiten sind unter Berücksichtigung der komplizierten Zusammenhänge zwischen Scheibe und Rollen notwendig.

Literaturverzeichnis:

1. Katalog „Nemo Pumpen“ - der Firma NETZSCH MONOPUMPEN – GmbH.
2. Litvin F.L.- Theorie der Zahnradverzahnung (russisch), Nauka, Moskau, 1968
3. Poliakov. V. S; Barbash I.D.: Kupplungen, Mashinostroene, 1973, S.335 (russisch)
4. Barrel coupling TCB-type JAURE, <http://ringfeder-usa.com>

Gezielt eingebrachte Vorspannungen in FVK-Elemente

Gerhard SCHARR

Universität Rostock

Abstract

Vor- und Eigenspannungen können sich auf die Beanspruchbarkeiten eines Faser-Verbund-Kunststoff (FVK) sowohl günstig als auch ungünstig auswirken. Entscheidend ist, ob die Überlagerung von Last- und Vor-/Eigenspannungen zu einer Erhöhung oder Erniedrigung der resultierenden Spannungen führt. Schon der Herstellungsprozess bewirkt i.d.R. thermisch induzierte Eigenspannungen, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können. Mit Hilfe mechanischer oder thermomechanischer Verfahren ist es möglich, gezielt Vorspannungen in FVK-Elemente (Bauteile) einzubringen. Dadurch ist eine bessere Faserausnutzung möglich [1], [5].

Keywords

Vorspannung, Eigenspannung, Faser-Verbund-Kunststoff, Faserausnutzung

1 Einleitung

„Schädliche“ Eigenspannungen reduzieren und gezielt eingebrachte Vorspannungen erhöhen die Beanspruchbarkeit von Faser-Verbund-Kunststoffen. Bild 1 zeigt die verstärkende und versteifende Wirkung der Fasern. Die Polymermatrix hat die Aufgabe die Fasern zu stützen, zu schützen und Kräfte in diese zu leiten. Festigkeiten und Steifigkeiten der Polymermatrices liegen weit unter denen der Fasern. Die Bruchdehnung der Matrices ist (sollte) dagegen deutlich höher als die der Fasern sein. Da die Fasern hohe Zugspannungen aufnehmen können, bietet sich ein Einbringen der Vor-/Eigenspannungen über diese Komponente an, vergleichbar dem Vorspannprinzip beim Spannbeton.

2 Thermo- und Hygro-Eigenspannungen

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungskoeffizienten (WK) und Quellkoeffizienten (QK) von Faser und Matrix entstehen bei Temperaturänderungen und/oder Feuchteänderungen im FVK Eigenspannungen. Diese während der Herstellung oder im Einsatz der FVK-Bauteile auftretenden Eigenspannungen können bei multidirektionalen Faser-Verbund-Kunststoffen in Mikro- und Makro eigenspannungen unterteilt werden.

Mikro- und Makro eigenspannungen

Als Mikro eigenspannungen sollen die in Faser und Polymermatrix auftretenden Spannungen bezeichnet werden (Bild 2). Nach dem Abkühlen von der Härtungstemperatur auf Raumtemperatur unterliegen die Fasern Druck- und die Matrix Zugspannungen. Nimmt die Matrix nach der Herstellung Feuchtigkeit auf, quillt sie und die thermisch induzierten Eigenspannungen werden teilweise abgebaut. Die Feuchteverteilung im FVK weist häufig einen großen Gradienten auf. Dies gilt insbesondere für dicke Lamine.

Daneben sind in einem Mehrschichtverbund (MSV) auch Makroeigenstressungen aufgrund der sehr unterschiedlichen Wärmedehn- und Quellkoeffizienten einer unidirektionalen Einzelschicht in und senkrecht zur Faserrichtung vorhanden. Makroeigenstressungen oder Eigenstressungen I. Art der Faser-Verbund-Kunststoffe sind über einen Faser-Matrix-Bereich „verschmierte“ Verbund- bzw. Schichtstressungen. In Bild 3 sind die Makroeigenstressungen eines symmetrischen $0^\circ/90^\circ$ -MSV schematisch dargestellt.

Es handelt sich dabei um ein mittleres FVK-Scheibenelement, bei dem nur Normalstressungen in der Verstärkungsebene, nicht aber Randnormal- und Randschubstressungen eingetragen sind. Der in Bild 3 dargestellte Eigenstresszustand (Druckstressungen in Faserrichtung und Zugstressungen senkrecht dazu) liegt nach einer Heißhärtung oder Entfeuchtung vor.

Symmetrischer und unsymmetrischer Aufbau

Ein symmetrisch aufgebauter, ebener Mehrschichtverbund bleibt auch nach der Temperatur- und / oder Feuchtebeaufschlagung eben. Dabei wird eine gleichmäßige T- bzw. M-Verteilung über dem Querschnitt vorausgesetzt. Die Eigenstressungen stehen im mechanischen Gleichgewicht und sind nicht durch äußere Kräfte oder Momente bedingt: Summe der Kräfte und Momente im FVK sind gleich Null!

Ist ein ebener Mehrschichtverbund unsymmetrisch zur Mittelfläche aufgebaut, können die Temperatur- und Feuchteänderungen neben Eigenstressungen auch unerwünschte Formänderungen der Faserverbund-Struktur hervorrufen. Bild 4 zeigt die mit der Finiten-Elemente-Methode berechnete Formänderung einer unsymmetrischen CFK-Platte [$0^\circ/90^\circ$] nach der Aushärtung. Theorie und Experiment lieferten die gleiche Verformung und zwar eine doppeltgekrümmte Schale (hyperbolischer Paraboloid). Solch ein exzentrisch orthotroper MSV stellt im Gegensatz zu dem symmetrischen Verbund (Bild 3) ein „gekoppeltes Scheiben-Platten-Problem“ dar. Scheibenverformungen (Dehnung / Scherung) werden dann durch Scheiben- und / oder Plattenbeanspruchungen sowie durch Temperatur- und / oder Feuchtebeanspruchung hervorgerufen. Plattenverformungen (Krümmung / Verwindung) werden wiederum durch Platten- und / oder Scheibenbeanspruchungen sowie durch Temperatur- und / oder Feuchtebeanspruchung hervorgerufen.

Eigenstressungen in FVK-Rohren

Bei symmetrischen oder unsymmetrisch aufgebauten FVK-Rohren / -zylinderschalen bleibt bei Temperatur- und / oder Feuchtebeaufschlagung der Kreisringquerschnitt erhalten. Trennt man einen Faserverbund-Ring auf, zeigt sich an der spontanen Ringverformung das Vorhandensein von Eigenstressungen. Gelingt es, diesen Eigenstresszustand zu reduzieren bzw. zu optimieren, dann ist eine Verbesserung der Faserausnutzung im Verbund möglich.

Faserverbund-Rohre weisen im Gegensatz zu ebenen FVK-Teilen neben den schichtparallelen Spannungen zusätzlich radiale Eigenstressungen auf [2]. Besonders bei dickwandigen Rohren können diese Spannungen zu vorzeitigen Schäden führen, siehe Bild 5. Wärmedehn- und Quellkoeffizient in radialer Richtung sind relativ groß und in tangentialer Richtung (Umfangsrichtung) klein. Bei den Steifigkeiten verhält es sich umgekehrt. Steife Umfangsfasern und kleiner WK / QK behindern eine radiale Kontraktion bei Abkühlung bzw. Entfeuchtung des FV-Rohres. Dünnere Rohrwindungen, niedrigere Gelier- und Härtungstemperatur und langsame Abkühlgeschwindigkeit sind beispielsweise Maßnahmen zur Minderung der Schadensproblematik. Bild 5A (Foto) zeigt den Schaden (Delamination) eines CFK-Rohres (Walze), der während der Herstellung aufgetreten ist. In Bild 6 sind die numerisch und analytisch gerechneten radialen und tangentialen Eigenstressungsverläufe zu sehen [5]. Das dickwandige CFK-Rohr wurde dabei um 120°C abgekühlt.

3 Steigerung der Belastbarkeit durch gezielt eingebrachte Vorspannungen in den FVK

Mit mechanischen oder thermomechanischen Verfahren können Eigenspannungen gezielt in die FVK-Bauteile eingebracht werden – gezielt hinsichtlich Verteilung, Größe und Vorzeichen der Spannung. Bei den mechanischen Verfahren werden FVK-Teile im vorgespannten Zustand zu einem Bauteil oder Kraffteinleitung gefügt und somit die Vorspannung in der Struktur eingefroren. Setzt man bei diesen Verfahren zusätzlich Wärme in Höhe der Glasübergangstemperatur ein, kann man einen zusätzlichen Effekt aufgrund der Spannungsrelaxation in der Polymermatrix erreichen [3].

Wird ein multidirektionaler FVK über die Glasübergangstemperatur erwärmt und vorgespannt (z.B. auf ca. 50% der Festigkeit), unter Vorspannung abgekühlt und anschließend entlastet, dann ist es möglich, in den rissgefährdeten Querlagen, die normalerweise thermisch induzierte Querspannungen aufweisen, Druckspannungen zu erzeugen. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es erfolgreich gelungen, die Querspannungsbruchdehnung im FVK wesentlich zu erhöhen. Da die Laminatbeanspruchung, bei der erstmals Zwischenfaserbruch auftritt, häufig identisch mit der maximal zulässigen Beanspruchung ist, z.B. aus Dichtigkeitsgründen, bedeutet dies eine Steigerung der zulässigen Betriebsspannungen und der Faserausnutzung.

Beispiel 1: Blattfeder

Im folgenden wird ein vorgespanntes FVK-Bauteil vorgestellt, bei dem die Eigen/Vorspannung gezielt mit Hilfe eines mechanischen Verfahrens eingebracht werden. Es handelt sich dabei um Entwicklungskonzepte vorgespannter FVK-Biegefedern (Blattfedern). Diese Idee ist für Biegefedern nicht neu. Bei Stahlblattfedern werden z.B. durch Kugelstrahlen Randdruckeigenspannungen erzeugt. Dieses Verfahren hat die im Bild 7 vorgestellten Konzepte ursprünglich angeregt. Spätere Recherchen haben gezeigt, daß bei der Fa. Ciba (Basel) und an der Universität Kassel [4] auch an dieser Thematik gearbeitet wurde. Bild 7 zeigt zwei von vielen Möglichkeiten, Biegeeigenspannungen in FVK-Blattfedern zu erzeugen. Die Variante II zeichnet sich durch eine einfachere Herstellung und bessere Ausnutzung des Materials aus. Bei beiden Verfahrensvarianten ist eine Verringerung der schädlichen Randspannung die Folge.

Beispiel 2: Dickwandige Wickelteile

Gewickelte FVK-Bauteile haben normalerweise nach der Herstellung innen tangential Zug- und außen Druckspannungen (siehe Bild 5). Radial liegen Zugspannungen vor. Dieser Eigenspannungszustand ist bei vielen Anwendungen, z.B. bei Druckbehältern, ungünstig. Überhöhte Zugspannungen bei Innendruck überlagern sich mit den Zugeigenspannungen an der inneren Randfaser.

Mit einer Variation der Fadenspannung beim Wickeln (von innen nach außen steigend), konnte der Eigenspannungszustand umgekehrt werden (siehe Bild 8). Eine Verbesserung der Faserausnutzung und somit Steigerung der „Bauteil-Leistungsfähigkeit“ ist die Folge.

4 Maßänderungen infolge Relaxation der Vor- / Eigenspannungen

Die Mikro- und Makroeigenspannungen können aufgrund einer Spannungsrelaxation in der Matrix mit der Zeit abnehmen. Dabei hängt das Relaxationsverhalten u. a. von der Temperatur, vom Feuchtegehalt, vom Spannungsniveau und bei Duromeren zusätzlich vom Vernetzungsgrad ab. Teilkristalline Kunststoffe kriechen bzw. relaxieren in der Regel mehr als amorphe und Thermoplaste in der Regel mehr als Duroplaste.

Eine Relaxation der zuvor beschriebenen Eigenspannungen im Faser-Verbund-Kunststoff ist vorteilhaft, wenn die Eigenspannungen und Lastspannungen das gleiche Vorzeichen aufweisen. Aufgrund der Überlagerung von Eigen- und Lastspannungen im Betrieb sollte zwecks

optimaler Materialausnutzung ein eigenspannungsfreier oder besser ein eigenspannungs-optimierter Zustand angestrebt werden.

Unerwünscht ist der Spannungsabbau gezielt in den FVK eingebrachter Vorspannungen. Unerwünscht sind ebenfalls die mit der Spannungsrelaxation verbundenen Maßänderungen des Bauteils. Schon eine geringfügige Geometrieänderung einer CFK-Struktur kann den Einsatz, z.B. als Antennenkomponente oder Meßwerkzeug, beeinträchtigen. Die Größenordnung der maximalen Längenänderungen infolge Spannungsrelaxation kann abgeschätzt werden, wenn der Beitrag der Matrix zum Elastizitätsmodul des Faser-Verbund-Kunststoffes ermittelt wird.

5 Ausblick

Es gibt noch viele Beispiele in der Technik, bei denen eine Vorspannung ebenfalls eine Verbesserung der Tragfähigkeit bedeutet. Häufig können dabei schon bewährte Konstruktionen mit konventionellen Werk- bzw. Baustoffen die Anregung geben, wie z. B. Spannbeton. Zur Betonvorspannung werden heute auch GFK- oder CFK-Spannglieder eingesetzt.

Vielsprechend sind auch Vorspannungen bei stabilitätsgefährdeten Strukturen/Elementen. So knickt ein Stab oder beult eine Schale/Platte erst bei höheren Lasten, wenn sie Zugvorspannungen unterliegen. Natürlich funktioniert diese Methode nur bei statisch unbestimmten Systemen. Aussicht auf Erfolg bzw. Einsatz haben diese vorgespannten Konstruktionen aber nur, wenn der Nachweis der langzeitigen Funktionstüchtigkeit und der Wirtschaftlichkeit erbracht werden kann.

Literatur

- [1] Scharr, G.: Vor- und Eigenspannungen in Faser-Kunststoff-Verbunden. KUNSTSTOFFE 82 (1992) 11, S. 1131-1135
- [2] Jakobi, R.: Zur Spannungs-, Verformungs- und Bruchanalysen an dickwandigen, rohrförmigen Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Fortschritt-Bericht, Reihe 5, Nr. 126
- [3] Schürmann, H.: Zur Erhöhung der Belastbarkeit von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden durch gezielt eingebrachte Eigenspannungen. VDI-Fortschritt-Bericht, Reihe 1, Nr. 70
- [4] Puck, A.: Hochleistungs-GFK-Bauteile für den Fahrzeug- und Maschinenbau. KUNSTSTOFFE 80 (1990) 9, S. 1012-1018
- [5] Scharr, G.: Eigenspannungen in dickwandigen CFK-Kreisringscheiben sind beherrschbar. KUNSTSTOFFE 84 (1994) 3, S. 299-301

Prof. Dr.-Ing. Gerhard S C H A R R
Universität Rostock
Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik
Direktor des Instituts für Konstruktionstechnik / Lehrstuhl für Leichtbau
18051 Rostock
email: gerhard.scharr@mbst.uni-rostock.de

Faser – Verbund - Kunststoff

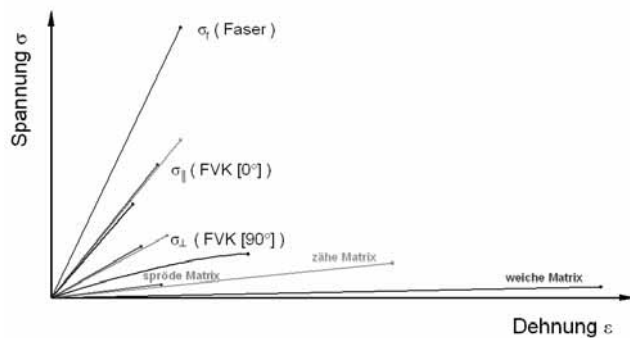


Bild 1: $\sigma - \varepsilon$ - Diagramme vom Faser-Kunststoff-Verbund und den Komponenten Faser und Matrix

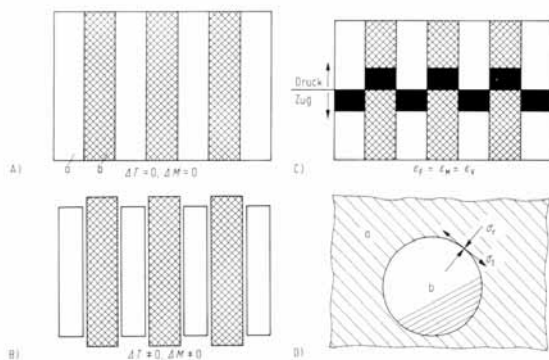


Bild 2: Mikroeigenstressungen in einer UD-Schicht

A: Referenzzustand (spannungsfrei)

B: Faser – Matrix – Verbund gelöst

C: FVK in schlüssigem Verbund

D: Spannungen in der Ebene $\perp \perp$

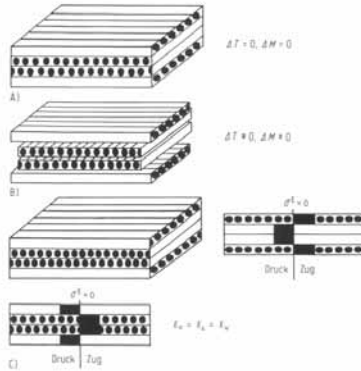


Bild 3: Makroeigenstressen

- A: Referenzzustand
- B: Faser-Matrix-Verbund gelöst
- C: FVK in schlüssigem Verbund

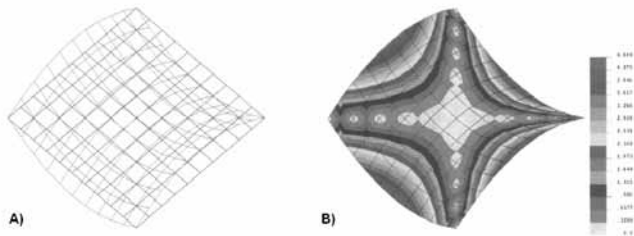


Bild 4: Verformung eines unsymmetrischen CFK-Laminats [0°/90°] nach einer 120°C-Härtung (Ergebnis einer FEM-Berechnung)

A: verformtes- und unverformtes FE-Netz B: verformtes 0°/90°-Laminat (Ergebnis in mm)

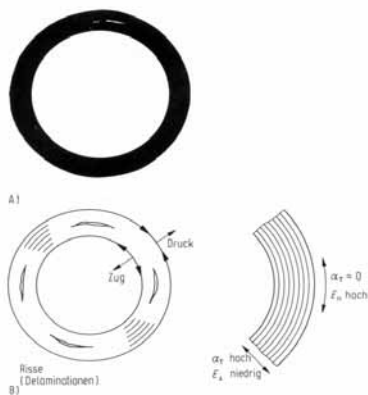


Bild 5: Schaden an einem CFK-Kreisring

A: Ringquerschnitt mit Delamination (Foto)

B: Schematische Darstellung

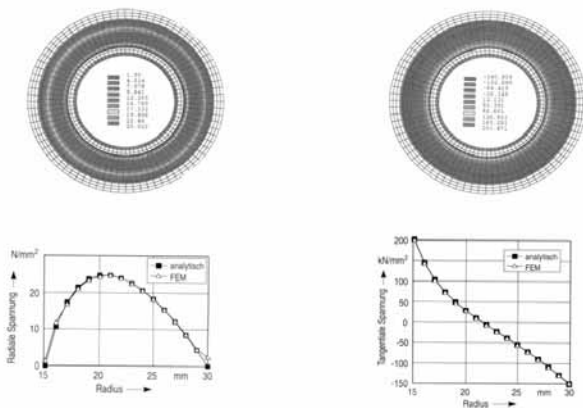


Bild 6: Dickwandiger CFK-Kreisring

Radiale und tangentielle Spannungen nach der Härtung ($\Delta T = 120^\circ C$)

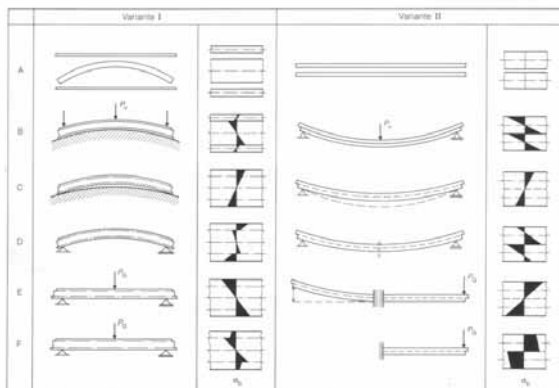


Bild 7: Vorgespannte FVK-Biegefeder (Blattfeder)

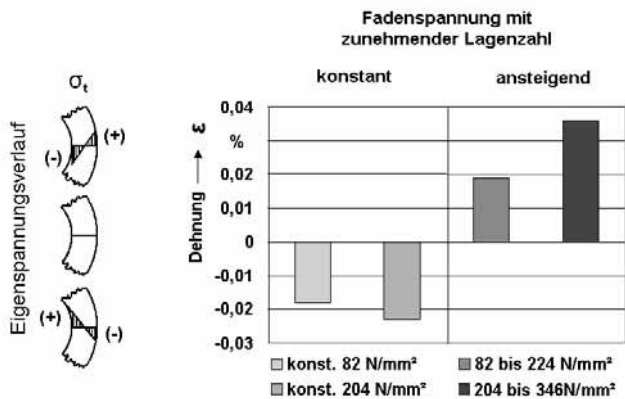


Bild 8: „Positiver“ Eigenstressungsverlauf durch Veränderung der Fadenspannung

Fatigue Tests an komplexen Faserverbundstrukturen im Flugzeugbau

Prof. Dr. L. DETERS¹, Dr. Frank ENGELMANN¹,
Dipl. Ing. G. HAASE²

1. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

2. Airbus

Abstract

Dieser Beitrag ist ein Erfahrungsbericht und beschäftigt sich mit den Besonderheiten von Fatigue Tests an komplexen Faserverbundstrukturen und geht dabei auf Damage Tolerance, Risswachstum und Schadenserkennung ein. Im Wesentlichen stützt sich dieser Vortrag auf Erkenntnisse aus dem Fatigue Test der EXTRA-400, der von 1998-2000 bei der IABG in Ottobrunn durchgeführt wurde.

Keywords

- Fatigue
- Faserverbund
- Damage Tolerance
- Fail Safe
- Safe Live

1. Übersicht

1.1 Statik und Festigkeit Gestern

Die wesentlichen Treiber der Entwicklung eines Flugzeuges waren schon immer die Forderungen nach immer besseren Flugleistungen. Bei gleichzeitig größter Sicherheit und Einhaltung ökologischer Gesichtspunkte sind diese Vorgaben zu erfüllen.

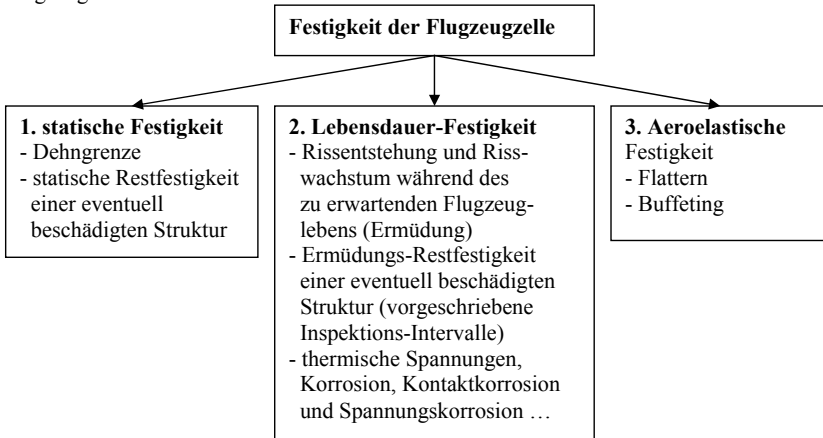
Dieses Bestreben stellt immer höhere Anforderungen an die Struktur und deren Leichtbau. Allein durch rein statische Auslegung und die bis dahin üblichen Bauweisen war die Strukturfestigkeit bis in die 50er Jahre beherrschbar.

Mit dem Beginn des Jet-Zeitalters kam es zu den ersten massiven Materialermüdungsproblemen. 1954 zerbarsten zwei der seinerzeit modernsten Verkehrsflugzeuge DeHavilland Comet nach jeweils 1000 Flügen in großer Höhe. Als Unfallursache wurde Materialermüdung an einen Fensterausschnitt der Druckkabine ermittelt. Trotz der damals bereits vor dem Erstflug der Comet vorgenommenen Versuche in einem Wassertank, war dieser Schaden nicht vorhersehbar.

Das führte zu einem vollständigen Umdenken im Bereich des Leichtbaues. Es entstand die Fail Safe-Philosophie bei der Auslegung von Leichtbaustrukturen. Es entstanden Werkstoffprüfungsverfahren zur Schadenserkennung, wie Röntgen-, Wirbelstrom- und Ultraschalluntersuchungen, die heute selbstverständlich sind.

1.2 Lebensdauerfestigkeit – neue Designphilosophien

Bei der Auslegung einer Flugzeugstruktur ist das Gewicht die entscheidende Größe. Um die vielfältigen Belastungen auf die Flugzeugzelle während des gesamten Lebens ertragen zu können, muss sie nach Kriterien der Ermüdungslebensdauer ausgelegt sein. Inzwischen nimmt die Lebensdauerfestigkeit einen zentralen Platz bei der Auslegung einer Flugzeugzelle ein.



Die Design-Philosophie im Bereich der Strukturentwicklung wird bestimmt durch:

- **Safe Life-Philosophie (sicheres Erleben)**
Die Strukturbauteile werden auf die während eines Flugzeuglebens zu erwartenden statischen Lastfälle und das dynamische Ermüdungsspektrum hin ausgelegt. So ausgelegte Bauteile sind dauerfest dimensioniert, aber deshalb auch entsprechend schwer.
- **Fail Safe (beherrschbares Versagen)**
Es wird davon ausgegangen, dass Risse auftreten und damit einzelne Teile ausfallen könnten. Um dann die Funktionsfähigkeit zu gewährleisten, werden redundante Lastpfade konstruiert. Die Struktur dieser Lastpfade muss ausreichende Restfestigkeit gegen Vibrationen und Flattern bieten und eine sichere Beendigung des Fluges erlauben.
- **Damage Tolerance (ertragbarer Schaden)**
Zusätzlich zu der Fail Safe-Philosophie werden in der Struktur vorhandene Schäden, z.B. Risse sowie deren Wachstum mit berücksichtigt. Bedingung dafür ist es, die den zeitlichen Verlauf des Risswachstums zu kennen. Wenn das gegeben ist, führen die nicht entdeckten Risse innerhalb eines Wartungsintervalls nicht zum Versagen der Struktur. Zusätzlich angebrachte Stringer wirken als Risstopper und verhindern ein Risswachstum.

Durch die Umsetzung dieser Philosophien bei der Entwicklung gelingt es im Allgemeinen, die geforderte Lebensdauer zu erreichen.

Für die konventionelle Metallbauweise liegen gesicherte Erkenntnisse zur Lebensdauerberechnung vor. Diese basieren auf jahrzehntelanger Erfahrung in Entwicklung, Test und Betrieb von Flugzeugstrukturen in Metallbauweise. Etwas anders ist das bei der relativ neuen Faserverbundbauweise.

2. Die Faserverbundbauweise und ihre Besonderheiten in Hinsicht auf die Ermüdungslebensdauer

Schon 1957 flog das erste GFK-Segelflugzeug (fs 24 Phönix) und mit der SB10 entstand 1972 das erste in CFK-Bauweise hergestellte Segelflugzeug. Der Technologieträger LFU 205 leitete dann die Epoche der Kunststoffsportflugzeuge ein. Heute fertigen fast alle deutschen Leichtflugzeugbauer in Faserverbundtechnologie. Dennoch werden heute nur Segelflugzeuge und Leichtflugzeuge komplett in der Faserverbundbauweise hergestellt.

Aber auch im Verkehrsflugzeugbau setzen sich tragende Komponenten in dieser Bauweise immer stärker durch. Leitwerke der Airbusfamilie, Ruder und Klappen, aber auch Tragflächenteile und Leitwerke für den A380 werden in Faserverbundbauweise gefertigt. Großbauteile werden in Negativ-Halbschalen mit Hilfe der Autoklavtechnik hergestellt und verklebt, teilweise auch vernietet. Für Kleinserien und im Segelflugzeugbau hat sich die Nasslaminiertechnik in Negativformen durchgesetzt.

Grundlage zum Erreichen der geforderten Festigkeiten und Steifigkeiten bilden die Faserverstärkungen (Fibre reinforcement), die in Form von Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern. Als Matrix (Bettungsmasse) werden meist Epoxidharze verwendet.

Anders als bei der Metallbauweise kann je nach Bauteilbeanspruchung die Faserorientierung so gewählt werden, dass das Bauteil optimal ausgenutzt wird.

Oft werden die Strukturen in Wabensandwichbauweise produziert, die anders als z.B. ein Metallflügel nicht mehr über die große Anzahl von Rippen und Stringern verfügen. Die Gewebelagen werden dann oft mit 0°-90°-45° Ausrichtung laminiert. Ein Risswachstum wird durch diese Anordnung der Gewebelagen reduziert.

Faserverbundwerkstoffe weisen im Gegensatz zu den metallischen Werkstoffen keinen stabilen Dauerfestigkeitsbereich auf. Nach Lebensdauern von 10^6 bis 10^7 Lastwechseln muss mit dem Versagen gerechnet werden. Die eigentlichen Versagensphänomene (mikrostruktureller Versagensprozess) ist noch immer Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Initiale Delaminationen mit dem Abfall der Steifigkeit sowie interlaminares Schubversagen sind oft Versagensursache.

Deshalb kommt bei ingenieurmäßiger Auslegung noch immer das konservative Auslegungskriterium einer maximal zulässigen Dehnung von ca. 0,4% (je nach Werkstoff) zur Anwendung.

2.1 Besonderheiten bei der Planung von Fatigue Tests an Faserverbundstrukturen

Die Designphilosophien hinsichtlich Safe Life, Fail Safe und Damage Tolerance sind inzwischen fester Bestandteil bei der Planung und Durchführung von Fatigue Tests.

Dennoch gibt es einige Besonderheiten, die durch die Anwendung des Faserverbundwerkstoffes entstehen:

- *Manufacturing Defects*
sind oft von außen nicht feststellbar. Sie können prinzipiell in jedem Bauteil vorkommen. Zu ihnen zählen z.B. Fehlverklebungen, Faserondulationen und die Bildung von Harznestern. Da diese oft nicht bemerkt werden und während des ganzen Flugzeugslebens vorhanden sind, ohne repariert zu werden, müssen diese *ultimate load* ertragen und dürfen nicht zu Schadenswachstum führen.
- *Impact Damages*
entstehen durch äußere Einwirkungen, wie Steinschlag, Vogelschlag oder bei Kollisionen mit Hallentoren oder anderen Flugzeugen. Diese Schäden sind nicht immer optisch sichtbar und werden in VID (visible impact damage) und BVID (barley visible impact damage) unterschieden. Sichtbare Schäden werden in der Regel sofort repa-

riert. Daher müssen diese Schäden lediglich *limit load*, nicht aber *ultimate load* ertragen. Wichtig ist daher, für das Wartungshandbuch solche Schäden nach Lage und Größe zu klassifizieren, um im späteren Einsatz dem Halter des Flugzeuges eine sichere Auskunft zu geben, bis zu welcher Schadensgröße Reparaturen möglich sind. Um auch Aussagen über das Ermüdungsverhalten von möglichen Reparaturen treffen zu können, müssen diese Reparaturen durchgeführt und statisch und dynamisch mitgetestet werden. Die *Reparaturstellen* müssen dabei wiederum *ultimate load* ertragen.

- **Damage Tolerance**

Ziel ist es, Erkenntnisse über den zeitlichen Verlauf des Risswachstums zu erlangen. So kann ausgeschlossen werden, dass nicht entdeckte Schäden innerhalb eines Wartungsintervalls zum Versagen der Struktur führen. Gegen die Ausbreitung von Rissen ist die Faserverbundstruktur jedoch relativ unempfindlich. Weitaus kritischer sind Delaminationen. Diese sind optisch schwer feststellbar, führen aber zu einem Abfall der Steifigkeit. Dieser wiederum kann benachbarte Bauteile oder die Wabe bei einer Wabensandwichstruktur schädigen. Eine Steifigkeitsmessung der Struktur kann hier wichtige Erkenntnisse liefern.

Zwischen CFK und Leichtmetall kommt es oft zur Kontaktkorrosion. Für die metallischen Bauteile (Beschläge) sind Risszähigkeit und Rissfortschritt von großer Bedeutung.

- **Safe Life**

Metallische Bauteile, die mit der CFK-Struktur verschraubt sind (z.B. Flügelhauptbeschläge und Hauptbolzen) sollten Safe Live ausgelegt werden.

3. Beispiele von Fatigue Tests

3.1 Airbus A340-600

Der Test an der A340-600 wurde in Zusammenarbeit von Airbus-Deutschland in Hamburg, der IABG in Ottobrunn und der IMA in Dresden durchgeführt.

- *Beginn: 30.10.2001*

- *Ende: 20.06.2003*

- *insgesamt: 50.000 test flights (repräsentativ für eine Einsatzdauer von 25 Jahren)*

- *Anzahl der Sensoren: 3.700*



Bild 1 Fatigue Test des A340-600

3.2 Eurofighter EF2000

Der MAFT (major airframe fatigue test) des Eurofighter wurde bei der IABG in Ottobrunn durchgeführt.

- *Abschluss der Tests: 04.09.1998*

- *insgesamt: 18.000 simulierte Flugstunden*

- *Lebensdauerfaktor: 3*

(entsprechende Einsatzdauer 30 Jahre)

- *Anzahl der Missionsprofile: 17 unterschiedliche Flüge für 3 Flugmissionen*



Bild 2. MAFT des EF2000

- *Anzahl der Hydraulikzylinder: 70*

- *Anzahl der Sensoren: 450*

3.3 Fatigue Test Extra 400

Bei dem Fatigue Test der Extra 400 handelte es sich um eine der ersten vollständig in CFK-Wabensandwichbauweise hergestellten Flugzeugzellen, die „full scale“ getestet wurde.

- zertifizierte Lebensdauer: 20.000 Stunden
- prozentualer Anteil der Flüge mit Druckbeaufschlagter Kabine: 75%
- Lebensdauerfaktor: 2
- durchgeführt vom 20.01.1998 bis zum 12.10.1999

Bild 3 Fatigue Test der Extra 400



3.3.1 Ziel

Ziel des komplexen Tests der gesamten Flugzeugstruktur war es, im Rahmen der Zulassung nach FAR 23 alle strukturellen Aspekte und deren Zusammenwirken so gut wie möglich abzudecken. Dazu wurden unterschiedliche Lasten an Flügel, Leitwerk und Rumpf/Motorträger und Fahrwerk sowie Druckkabine aufgebracht und getestet.

Der Test umfasste Statische Tests und den Lebensdauertest. Dabei wurden Herstellungsfehler, und auch im Betrieb auftretende mögliche Schäden simuliert und auf ihre statische Festigkeit sowie ihr Ermüdungsverhalten untersucht. Die Schäden wurden auch repariert und die Reparaturen statisch und dynamisch getestet, um im Rahmen einem Wartungsprogrammes Inspektionsintervalle und mögliche Reparaturen festlegen zu können. Nach simulierten zwei Leben (40.000 h) sind Restfestigkeitsversuche durchgeführt werden.

3.3.2 Testaufbau

Der Testgegenstand war der Prototyp (SN 01) der Extra 400 der bereits vor dem Test 150 echte Flugstunden absolviert hatte.

Spannweite: 11,50 m
Länge: 9,39 m
Höhe: 3,09 m

Das Flugzeug wurde mit Hilfe von 6 Stützen statisch bestimmt gelagert. Diese waren mit Kraftmessdosen ausgerüstet, um jederzeit

die Lastsituation im Test kontrollieren zu können. Die Lasteinleitung erfolgte über 9 Hydraulikzylinder (4 am Flügel, zwei am Höhenleitwerk, einer am Seitenleitwerk und zwei am Fahrwerk). Diese gewährleisteten eine differenzierte Einleitung der Lasten an den einzelnen Bauteilen je nach getestetem Lastfall. Über ein pneumatisches System wurde der Kabineninnendruck simuliert. Während der Tests wurden die Parameter über Kraftmessdosen bzw. Drucksensoren erfasst und mit den zulässigen Werten verglichen. Ein Überschreiten der zulässigen Werte hätte zur Abschaltung der Testanlage geführt.

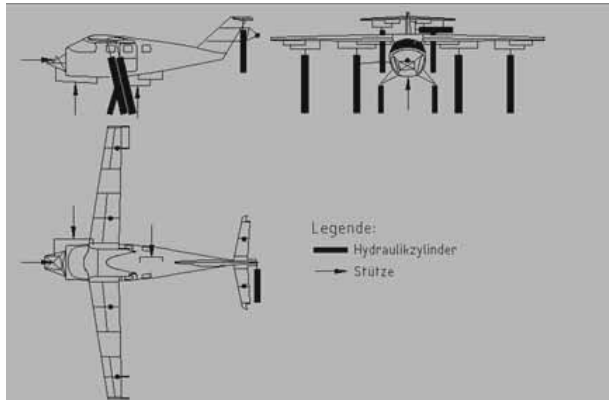


Bild 4 Testaufbau

Für die Statischen Tests war das Flugzeug mit Dehmessstreifen (7 auf der linken Flügelhälfte, 9 am Höhenleitwerk und 13 am Rumpf angebracht). Um die Steifigkeit des Flügels messen zu können, wurden insgesamt 4 Wegaufnehmer an den Flügelenden installiert.

3.3.3 Belastungsprogramm

Für die Erstellung des Belastungsprogrammes wurde ein repräsentatives Missionsprofil aufgestellt, das in Startphase, Steigen, Reiseflug, Sinkflug, Landeanflug und Landephase unterteilt war. Daraus konnten 24 verschiedene Flugtypen ermittelt werden, die jeweils unterschiedlich lange andauern und in verschiedene Flughöhen führen. Der Anteil der Flüge mit Druckbeaufschlagter Kabine beträgt dabei z.B. 75%. Auf Grundlage des FAA-Reports /4/ konnte ein Einzelflugprogramm aufgestellt werden, das die Verteilungshäufigkeit von Manöver- und Böenlasten in verschiedenen Flughöhen berücksichtigt. Dabei wurden 93 verschiedene Lastfälle getestet, wobei einige nur einmal während des gesamten Flugzeuglebens vorkommen.

Die Durchmischung der einzelnen Flüge zu einem Lebensdauerprogramm wurde mit einem Pseudo-Randomgenerator erzielt.

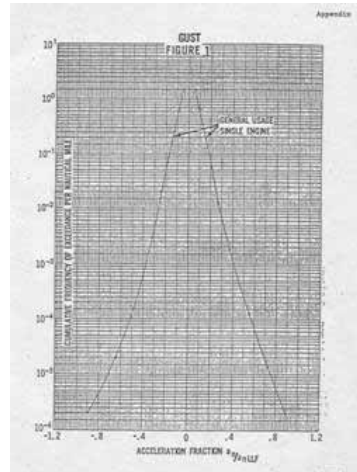


Bild 5 Verteilungshäufigkeit der Böenlasten

3.3.4 Testablauf

1. Erste 100 Flüge (zur Verifizierung des Flight Test Programms)
Anschließend: Inspektion
2. Beflammungstest der Motorträgerbefestigung (besondere Form eines Damage Tolerance Tests – Forderung nach FAR 23)
Anschließend: Inspektion
3. Statische Versuche bis ultimate load (zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses wurde der Flügelkasten auf 72°C erwärmt)
Anschließend: Inspektion
4. Damage Tolerance Tests bis limit load
Anschließend: Inspektion
5. Erste 5.000 Flüge
Anschließend: Inspektion
6. Erste 15.000 Flüge
Anschließend: Inspektion und Reparatur der bewusst eingebrachten Schäden
7. Erste 30.000 Flüge (erstes Leben)
Anschließend Inspektion
8. Weitere 30.000 Flüge (zweites Leben)
Anschließend Inspektion
9. Abschließende Statische Versuche bis ultimate load
10. Restfestigkeitsversuch Flügel
Abschließend Inspektion

3.3.5 Aspekte der Schadenstoleranz

Um Aspekte der Schadenstoleranz zu berücksichtigen, wurden sowohl Herstellungsfehler (Manufacturing Defects) als auch im Betrieb entstehende Beschädigungen (Impact Damages) getestet.

- *Manufacturing Defects:*
Da die Schäden von außen nicht feststellbar sind und in jedem Bauteil vorkommen können, ist ihre Anzahl oft unbekannt. Es muss gezeigt werden, dass mit diesen Schäden ultimate load ertragen werden kann und dass die Schäden nicht zum Wachstum neigen.
- *Impact Damages:*
Die Schäden wurden gezielt mit einem Impactor eingebracht. Dabei wurden bewusst Schäden in hoch belastete Zonen eingebracht. Das sind Schäden in Flügel- und Rumpfschafe, auf Holmen und Gurten sowie in Bereichen der Bolzenverbindungen.
 - Flügel: 16 Schäden mit einer Schädigungsenergie zwischen 10-60J
 - Höhenleitwerk: 14 Schäden mit einer Schädigungsenergie zwischen 10-30J
 - Rumpf: 33 Schäden mit einer Schädigungsenergie zwischen 10-60J
- *Damage Tolerance:*
Für folgende Schäden konnte gezeigt werden, dass limit load ertragen werden kann, ohne dass Risse fortschreiten. Außerdem konnte mit diesen Schäden $\frac{1}{2}$ Leben auf der Testanlage simuliert werden, ohne dass ein Risswachstum erkennbar war.
 - 300 mm Sägeschnitt in der oberen Flügelschale
 - 50 mm Sägeschnitt in der Höhenleitwerksschale
 - 50 mm Sägeschnitt in der Seitenleitwerksschale
 - 300 mm Sägeschnitt in der Rumpfröhre
 - 230 mm Sägeschnitt in der Druckkabine bei plötzlicher Enthermetisierung
 - fehlender Flügelbefestigungsbolzen (1 von 4)
 - fehlender Höhenleitwerksbolzen (1 von 4)
 - fehlender Motorträgerbefestigungsbolzen (1 von 4)
- *Reparaturen:*
Es wurden zur Simulation einer Reparatur an Rumpf ein Sandwichpanel von ca. 0,8m² und Flügel ein Sandwichpanel von 0,25 m² ausgetauscht.

3.3.6 Testergebnisse

Der Test endete erfolgreich am 12.10.1999. Als Ergebnisse lieferte der Test:

- keinerlei Schäden an der Primärstruktur (weder statisch bis ultimate load, noch im Lebensdauerversuch)
- kein Risswachstum der eingebrachten Schäden (weder statisch bis limit load, noch im Lebensdauerversuch)
- Während des dynamischen Versuches kam es zu kleineren Schäden an den Stahlteilen der Lasteinleitung sowie zu Leckagen an der Kabinentür und deren beweglichen Teilen
- Bruch des Flügels während der Restfestigkeitsversuche bei $j = 1,811$. Der Bruch verläuft durch das reparierte Sandwichpanel auf der linken Flügeloberseite und den benachbarten Handlochdeckel, ohne Störungen durch Aussteifungs- oder Deckeleffekte (siehe Bild 7).



Bild 6 Restfestigkeitsversuch der Flügel



Bild 7 Bruchstelle am Flügel

3.3.7 Erfahrungen

- Faserverbundstrukturen sind weitgehend unkritisch gegenüber Rissfortschritt. Viel größeren Einfluss haben Delaminationen.
- Während der planmäßigen Inspektionen und bei abschließender Inspektion der Bruchstelle stellte sich heraus, dass sich die Schadensanalyse an komplexen CFK-Bauteilen als sehr schwierig erweist, da keine Weißbrüche wie in GFK sichtbar werden und Delaminationen nur durch „Klopfprobe“ zu finden sind. Das Versagen der Wabe im CFK-Wabensandwich ist mit zerstörungsfreien Werkstoffprüfungsmethoden nur begrenzt möglich.
- Eine Steifigkeitsmessung zur Beurteilung der Bauteilschädigung ist außerordentlich hilfreich.
- Der Versagensfall am CFK-Tragflügel trat nicht plötzlich ein, sondern begann mit dem Ausbeulen der Flügeloberschale. Wenn diese ihren Traganteil verliert, kommt es zum Versagen des Holmes aufgrund Faserbruch.

Literatur

- [1] Ch. W. Kensche, Fatigue of Materials and Components for Wind Turbine Rotor Blades, European Commission, Directorate-General XII, Science, Reserch and Development, 1996
- [2] EA-400 Damage Tolerance Concept, Doc. N°: EA-05209.3, EXTRA-Flugzeugbau GmbH 1994
- [3] EA-400 Static and Dynamic Test of Primary Structure, Doc. N°: EA-05301.2, EXTRA-Flugzeugbau GmbH 1999
- [4] Fatigue Evaluation of Wing and Associated Structure on Small Airplanes, Report No. AFS-120-73-2, Engineering and Manufacturing Devision Airframe Branch 1973
- [5] Hünecke, Klaus, Die Technik des modernen Verkehrsflugzeuges, Motorbuch Verlag, Stuttgart, 2000
- [5] IABG, Pressemitteilung vom 08.09.1998
- [6] IABG, Pressemitteilung vom 28.11.2001
- [7] Prof. Dr.-Ing. Karl Schulte, Entwicklung eines Degradationsmodells zur Abschätzung der Restlebensdauer von Faserverbund- Strukturen, Forschungsbericht 2000 – 2001

- [8] 85000 "Flights" Without Take-Off, from page 80 of FLUG REVUE 10/96

Prof. Dr. L. DETERS
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
- Maschinenelemente + Tribologie -
39106 Magdeburg
email: ludger.deters@mb.uni-magdeburg.de

Dr. Frank ENGELMANN
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
- Maschinenelemente + Tribologie -
39106 Magdeburg
email: frank.engelmann@mb.uni-magdeburg.de

Dipl. Ing. G. HAASE
Airbus
Abteilung EYCAT
21129 Hamburg
email: gunnar.haase@airbus.com

Mehrachsig statisch und zyklisch beanspruchter Vergütungsstahl – eine berechenbare Größe

Hans-Peter LÜPFERT, Heinz-Joachim SPIES

TU Bergakademie Freiberg

Abstract

Die Berechnung der Wirkung von mehrachsigen Last- und Eigenspannungen auf die Dauerfestigkeit erfordert die Berücksichtigung der relativen Richtungszuordnungen zwischen konstanten und wechselnden Spannungsanteilen. Das entwickelte Festigkeitsmodell erfasst das Bruchverhalten der großen Gruppe der Vergütungsstähle und wurde durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen an mehrachsig statisch vorgespannten und durch zyklische Normal- und Schubspannungen beanspruchten Hohlzylinderproben aus dem Stahl 20MnCr5 im vergüteten Zustand verifiziert.

Keywords

Werkstofffestigkeit, Bruchverhalten, Festigkeitshypothese, Eigenspannungen, mehrachsig,

1 Einleitung

Während der ersten Phasen des Konstruktionsprozesses durchgeführte Spannungsberechnungen stützen sich überwiegend auf einfache Berechnungsmodelle und ergeben im Allgemeinen eine geringe Anzahl von Spannungskomponenten. Die Bewertung der Spannungen ist dann leicht unter Nutzung der klassischen Festigkeitshypothesen sowie der Festigkeitsfunktionen nach Wöhler, Smith- bzw. Haigh möglich und führt zu Ergebnissen, deren Genauigkeit zwar beschränkt ist, die aber für viele konstruktive Entscheidungen zunächst ausreicht.

Für die Spannungsberechnung im Rahmen des Sicherheitsnachweises hoch beanspruchter Konstruktionsteile werden zunehmend numerische Methoden eingesetzt. Die so berechneten örtlichen Spannungen sind fast ausnahmslos mehrachsiger Natur und - sofern die realen Belastungs-Zeit-Funktionen geeignet berücksichtigt werden - durch eine Kombination von konstanten und wechselnden Spannungsanteilen gekennzeichnet.

Die Bewertung mehrachsiger Spannungen mit sowohl konstanten als auch wechselnden Spannungsanteilen erweist sich als wesentlich komplexer als die Bewertung von einfachen Sonderfällen, wie z.B. rein statische oder rein wechselnde Beanspruchungen. Es wurden zahlreiche Festigkeitshypothesen vorgeschlagen, darunter das sogenannte quadratische Versagenkriterium [1], die Schubspannungsintensitätshypothese [2] und das Dang Van Kriterium [3]. Vor allem die Schubspannungsintensitätshypothese zeigt bei der Bewertung von mehrachsigen Beanspruchungen mit Zugvorspannungen gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen, jedoch lassen die bekannten Hypothesen sowohl eine ausreichende Anpassung an die jeweils vorliegende Werkstoffduktilität als auch an die bei Druckbeanspruchung veränderten Bruch- und Festigkeitseigenschaften vermissen.

Konstante Spannungsanteile (Mittelspannungen) können die Schwingfestigkeit erheblich beeinflussen. Bekannte Approximationen dieses Festigkeitsverhaltens stammen von Goodman [4], Smith [5], Gerber [6] und Dietmann [7]:

Goodman	Smith	Gerber	Dietmann
$\sigma_A = \sigma_W \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)$	$\sigma_A = \sigma_W \frac{\left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)}{\left(1 + \frac{\sigma_m}{R_m} \right)}$	$\sigma_A = \sigma_W \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \right]$	$\sigma_A = \sigma_W \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right)}$

Sie spiegeln in dieser Reihenfolge den zunehmenden Einfluss positiver Mittelspannungen auf die Schwingfestigkeit von Werkstoffen mit zunehmend sprödem Bruchverhalten wider. Im Bereich negativer Mittelspannungen ist allerdings insbesondere die Funktion von Gerber nicht durch Versuchsergebnisse zu belegen.

Ausgehend von einem allgemeinen Modell der statischen Festigkeit und Dauerfestigkeit, welches die uneingeschränkte Palette der Werkstoffe mit semiduktilem Verhalten insbesondere auch bei wirkenden Druckvorspannungen erfasst [8], wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Verifikation und Bestimmung der Materialkonstanten von Vergütungsstählen, speziell des Modellwerkstoffes 20 MnCr5 im vergüteten Zustand, durchgeführt.

2 Festigkeitsmodell

Bei der Bewertung mehrachsiger Spannungen ist es unverzichtbar, die unterschiedlichen Ausfallarten einerseits „Schwingbruch“ und andererseits „spontaner Ausfall durch Höchstbeanspruchung“ (Gewaltbruch) zu unterscheiden.

Um den Schwingbruch zu vermeiden, muss die Bedingung

$$q_W \max \left\{ \frac{\bar{\sigma}_v}{\sigma_A} \right\} + (1 - q_W) \sqrt{2} \operatorname{eff} \left\{ \frac{\bar{\sigma}_v}{\sigma_A} \right\} < 1 \quad (1)$$

erfüllt sein. Sie enthält den werkstoffabhängigen Wichtungsfaktor

$$q_W = \frac{\sqrt{3} - \frac{\sigma_W}{\tau_W}}{\sqrt{3} - 1}, \quad (2)$$

der bei duktilem Werkstoffverhalten ($\sigma_W \approx \sqrt{3} \tau_W$) verschwindet und bei ideal sprödem Werkstoffverhalten ($\sigma_W \approx \tau_W$) den Wert 1 annimmt.

Die Größe $\bar{\sigma}_v$ ist die Vergleichsspannung der wechselnden Spannungsanteile (gekennzeichnet durch den Überstrich). Sie wird als gewichtetes Mittel der entsprechenden Vergleichsspannungen der Normalspannungs- und der Gestaltänderungsenergiehypothese bestimmt:

$$\bar{\sigma}_v = q_W \max \bar{\sigma}_{NH} + (1 - q_W) \bar{\sigma}_{GEH}. \quad (3)$$

Die Festigkeitsbedingung (1) fordert bei sprödem Werkstoffverhalten in völliger Übereinstimmung mit der Normalspannungshypothese, daß die bezüglich ihres Betrages größte Hauptnormalspannung der wechselnden Spannungsanteile den Wert der Ausschlagfestigkeit σ_A unterschreitet. Bei ideal duktilem Werkstoffverhalten muss dagegen der in diesem Fall entscheidende Effektivwert der mit der Gestaltänderungsenergiehypothese gebildeten Vergleichsspannung der wechselnden Spannungsanteile $\bar{\sigma}_v$ den Wert $\sigma_A / \sqrt{2}$ unterschreiten. Die zuletzt genannte Forderung ist gleichbedeutend damit, daß als Vergleichsgröße für ein- und mehrachsige Werkstoffbeanspruchungen der zeitliche Mittelwert der je Werkstoffvolumen gespeicherten Gestaltänderungsenergie fungiert.

Durch die gewichtete Überlagerung der genannten Kriterien unter Nutzung der Wichtungsfaktoren q_W und $1 - q_W$ wird erreicht, dass im Falle von semiduktilem Werkstoffverhalten ein geeigneter Übergang und Ausgleich erfolgt.

Werden die konstanten Spannungsanteile (Mittelspannungen) durch die Hauptnormalspannungen σ_{1m} , σ_{2m} , σ_{3m} ausgedrückt, kann ihr Einfluss auf die Dauerfestigkeit (Ausschlagfestigkeit σ_A) durch die Verallgemeinerung des Approximationsvorschlages von Dietmann [7] erfasst werden, indem die Quadratwurzel durch den Exponenten p ersetzt wird. Bei Mehrachsigkeit der konstanten Spannungsanteile müssen neben den linearen Glieder auch die gemischten Glieder $\sigma_{1m}\sigma_{2m}$, $\sigma_{2m}\sigma_{3m}$, $\sigma_{3m}\sigma_{1m}$ in die erweiterte Beziehung aufgenommen werden:

$$\sigma_A = \sigma_W \left[1 - \sum_{i=1}^3 \left(K_i \frac{\sigma_{im}}{R_m} + L_i \sqrt{\frac{|\sigma_{im} \sigma_{jm}|}{R_m^2}} \right) \right]^p \quad \text{mit} \quad p = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_{Sch}}{2\sigma_W}\right)}{\ln\left(1 - \frac{\sigma_{Sch}}{2R_m}\right)}. \quad (4)$$

Der Exponent p wird von den Verhältnissen der Zugfestigkeit R_m , Wechselfestigkeit σ_W und Zugschwellfestigkeit σ_{Sch} bestimmt. Bei duktilem Werkstoffverhalten gilt etwa $p \approx 0,4$, während bei zunehmender Sprödigkeit der Wert 1 erreicht oder sogar überschritten wird.

Die Indizes i und j können in dieser Schreibweise die Werte 1, 2, 3 annehmen, wobei j stets die dem Index i im Zyklus 1-2-3-1 folgende Zahl ist.

Für die in Beziehung (4a) enthaltenen Faktoren K_i und L_i gilt:

$$\begin{aligned} K_i &= \lambda \left(1 - \varepsilon_{\varphi z} \mu \sin^2 \varphi_i \right) + d_z (1 - \lambda) && \text{für } \sigma_{im} > 0 \\ K_i &= \lambda \left(1 - \varepsilon_{\varphi d} \mu \sin^2 \varphi_i \right) + d_d (1 - \lambda) && \text{für } \sigma_{im} < 0 \\ L_i &= a\lambda + e(1 - \lambda) && \text{für } \sigma_{im}\sigma_{jm} < 0 \\ L_i &= b\lambda + f(1 - \lambda) && \text{für } \sigma_{im} > 0; \sigma_{jm} > 0 \\ L_i &= c\lambda + g(1 - \lambda) && \text{für } \sigma_{im} < 0; \sigma_{jm} < 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Der Winkel φ_i gibt den Richtungsunterschied zwischen der Wirkungsrichtung der Hauptschwingbeanspruchung $\bar{\sigma}_i$ und der konstanten Hauptnormalspannung σ_{im} an.

Die in (5) auftretenden Größen λ und μ werden von den vorliegenden wechselnden und konstanten Spannungen bestimmt:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\frac{\bar{\sigma}_1^2}{1} - \frac{\bar{\sigma}_2^2}{2}}{\frac{\bar{\sigma}_1^2}{1} + \frac{\bar{\sigma}_2^2}{2}}; && |\bar{\sigma}_1| \geq |\bar{\sigma}_2| \geq |\bar{\sigma}_3|; \\ \mu &= \frac{|\sigma_{1m} + \sigma_{2m}|}{|\sigma_{1m}| + |\sigma_{2m}|}; && |\sigma_{1m}| \geq |\sigma_{2m}| \geq |\sigma_{3m}|. \end{aligned} \quad (6)$$

Die Ermittlung der in den Größen K_i und L_i enthaltenen Parameter a bis d_z , d_d sowie $\varepsilon_{\varphi z}$ und $\varepsilon_{\varphi d}$ erforderte ergänzend zu den im Schrifttum veröffentlichten Versuchsergebnissen eigene experimentelle Untersuchungen, da für das Werkstoffverhalten bei negativer Summe der Mittelspannungen bisher keine verwertbaren Ergebnisse bekannt geworden sind.

Um Überbeanspruchung des Werkstoffes zu unterbinden, genügt es nicht, Schwingbrüche zu vermeiden. Zusätzlich ist es notwendig, den spontanen Ausfall durch Gewaltbruch infolge Überschreitung der ertragbaren Höchstbeanspruchung auszuschließen. Dies geschieht durch zeitlich lückenlose Erfüllung des aus zwei Teilkriterien bestehenden Festigkeitskriteriums

$$q \frac{\max\{\sigma_{\Sigma,i}\}}{R_m} + (1-q) \frac{\sigma_{\Sigma,GEH}}{R_{p0,2}} < 1 \quad (7 a)$$

$$\frac{\sigma_{\Sigma,GEH}}{\sigma_{dF}} < 1. \quad (7 b)$$

Kontrolliert werden die zum Zeitpunkt t vorliegenden Gesamtspannungen σ_{Σ} (ohne Trennung in konstante und wechselnde Anteile) bzw. deren Hauptnormalspannungen.

Das Teilkriterium (7 a) bewertet die gewichtete Summe der Werkstoffbeanspruchung durch die numerisch größte Hauptnormalspannung und durch die mit der Gestaltänderungsenergiehypothese berechneten Vergleichsspannung. Der werkstoffabhängige Faktor

$$q = \frac{\sqrt{3} - \frac{R_{p0,2}}{\tau_F}}{\sqrt{3} - 1} \quad (8)$$

ermöglicht die dem Werkstoffbruchverhalten angemessene Wichtung der genannten Anteile. Das Teilkriterium (7 b) folgt aus der Gestaltänderungsenergiehypothese und trägt dem näherungsweise ideal duktilen Verhalten der metallischen Konstruktionswerkstoffe bei mehrachsiger Druckbeanspruchung Rechnung.

3 Experimentelle Untersuchungen

Als Modellwerkstoff für die im Rahmen eines Forschungsprojektes [9, 10] durchgeführten experimentellen Untersuchungen fand der Stahl 20MnCr5 im vergüteten Zustand Verwendung. Der eingestellte Werkstoffzustand wird durch nachstehende Festigkeitskennwerte gekennzeichnet:

$$\begin{aligned} R_m &= 1028 \text{ MPa}; & R_{p0,2} &= 940 \text{ MPa}; \\ \sigma_w &= 516 \text{ MPa}; & \sigma_{Sch} &= 832 \text{ MPa}; \\ \sigma_{dF} &= 1003 \text{ MPa}; & \tau_F &= 559 \text{ MPa}; \\ \tau_w &= 303 \text{ MPa}. \end{aligned} \quad (9)$$

Die Festigkeitsverhältnisse $R_{p0,2}/\tau_F$ und σ_w/τ_w betragen rund $\sqrt{3}$ und zeigen so das nahezu ideal duktile Verhalten des Werkstoffes. Gleiches signalisiert auch die geringe Überschreitung der Ersatzfließgrenze $R_{p0,2}$ durch die Druckfließgrenze σ_{dF} um nur 7 % und die geringe Größe des Exponents $p = 0,42$.

Zur Ermittlung des Festigkeitsverhaltens bei zweiachsiger konstanter Vorspannung und überlagerter einachsiger Wechselbeanspruchung wurden hohlzylindrische Proben in einer Druckzelle durch komprimierte Luft von außen statisch vorgespannt und durch einen 250-kN-Resonanzpulsator in Längsrichtung stationär zyklisch bean-

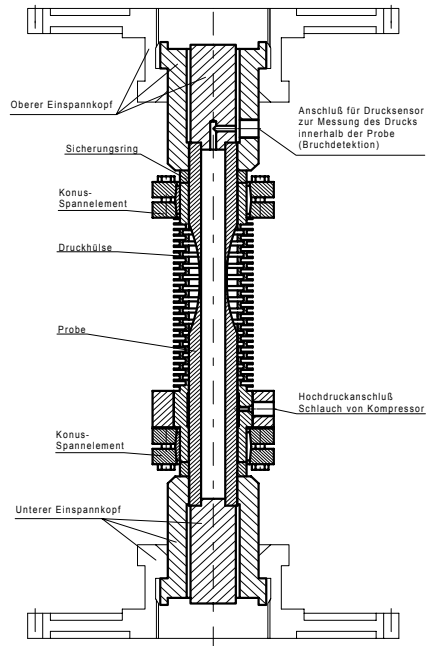


Abb. 1. Hohlzylinderprobe mit Druckhülse

spricht. Die verwendeten Proben weisen den Innendurchmesser 16 mm und im kleinsten Querschnitt auf einer Länge von 5 mm den Außendurchmesser 18 mm auf. Zu beiden Seiten dieses zylindrischen Bereiches vergrößert sich die Außenkontur mit einem Ausrundungsradius von 100 mm auf den maximalen Außendurchmesser von 32 mm. Über die Ergebnisse dieser Versuche wurde bereits berichtet.

Die Ermittlung des Festigkeitsverhaltens bei zyklischer Schub- bzw. Torsionsbeanspruchung und überlagerter zweiachsiger konstanter Vorspannung erfolgte ebenfalls unter Nutzung des erwähnten 250-kN-Resonanzpulsators an den bereits beschriebenen Hohlzylinderproben. Für die Umsetzung der Translationsbewegung des Pulsators in die erforderliche zyklische Verdrehung der Probe diente eine handelsübliche Torsionsprüfvorrichtung mit verlängerten Jochelementen.

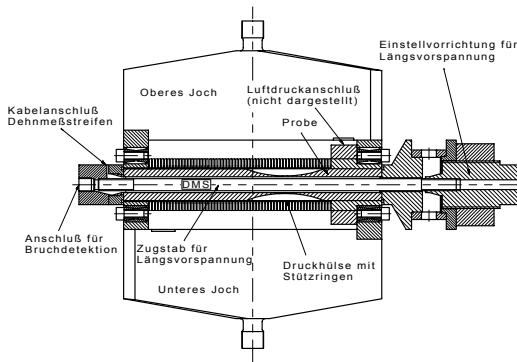


Abb. 2.

Prüfvorrichtung zur Einleitung zyklischer Torsionsbeanspruchung und gleichzeitig wirkender mehrachsiger statischer Druckvorspannung

Die konstante Druckvorspannung in axialer Richtung wurde durch Verspannen mit einem im Zentrum der Probe angeordneten Zugstab realisiert. Eine konstante Druckvorspannung in Umfangsrichtung der Probe konnte durch Erhöhung des Luftdruckes in der Umgebung der Probe erzielt werden. Hierfür wurde die Probe im Inneren eines dünnwandigen Stahlrohres (Druckhülse) angeordnet, welches an beiden Enden mit Ringspannelementen fest auf die Schäfte der Probe gepresst wurde. Zur Begrenzung der beim Einleiten der Druckluft auftretenden radialen Aufweitung der Druckhülse wurde diese mit einer Vielzahl von 3 mm dicken Stützringen (Lochscheiben) umgeben. Fresserscheinungen infolge der bei Torsionsbeanspruchung der Probe unvermeidlich auftretenden Mikrogleitung der Stützringe konnten durch permanente Ölschmierung vermieden werden.

Die erwähnte Verlängerung der Jochelemente der Torsionsprüfeinrichtung ermöglichte den Einsatz einer Druckhülse mit 186 mm freier Länge. Bei gleichem Drillwinkel wie die Probe wurde die Druckhülse dadurch nur geringen zyklischen Torsionsspannungen ausgesetzt. Andernfalls hätte die dauerhafteste Auslegung der Druckhülse Schwierigkeiten bereitet.

Die Torsionsspannung im Außenrand der Hohlzylinder-Prüfkörper übersteigt die im Innenrand um das Verhältnis der Radien $r_a/r_i = 1,125$. Trotz unterschiedlich großer konstanter Spannungen tritt daher die größte Werkstoffbeanspruchung stets im Außenrand auf. Dort liegt unter Berücksichtigung des Außendruckes p_a ein dreiachsiger Spannungszustand vor, jedoch unterscheidet sich die dauerhafteste Auslegung der Druckhülse wegen der relativ geringen Radialspannung nur vernachlässigbar wenig von der des ebenen Spannungszustandes.

Die Dauerfestigkeitsversuche ergaben die in der letzten Spalte der Tabelle 1 aufgeführten Ergebnisse der Torsionsausschlagfestigkeit τ_A .

Tabelle 1: Experimentell ermittelte Torsionsausschlagfestigkeit τ_A

Prüfreihe	p_a in bar	τ_m	R_τ	$\sigma_{1m} =$ $\sigma_{axial\ m}$ in MPa	$\sigma_{2m} =$ $\sigma_{tang\ m}$ in MPa	$\sigma_{3m} =$ $\sigma_{rad\ m}$ in MPa	V Versuchsergebnis τ_A in MPa
T1	0	0	-1	0	0	0	303
T2	0	0	-1	-200	0	0	337
T3	225	0	-1	-215	-192	-23	367
T4	0	τ_A	0	0	0	0	266
T5	0	τ_A	0	-200	0	0	273
T6	225	$0,5 \tau_A$	-1/3	-215	-192	-23	359

(Die Spannungsangaben beziehen sich auf den Außenrand des Prüfbereichs der Hohlzylinderproben.)

4 Eigenschaften des Festigkeitsmodells nach Anpassung an die Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente ermöglichten die Bestimmung der in Beziehung (5) enthaltenen Konstanten, soweit sie die Wirkung von Druckvorspannungen voraussetzen. Es ergaben sich die Größen

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi d} &= 1,16; & a &= 0,80; & c &= -0,07; \\ d_d &= 1,50; & e &= 1,60; & g &= 0,12. \end{aligned} \quad (10)$$

Um mit dem Festigkeitsmodell auch Aussagen für den Zugvorspannungsbereich treffen zu können, wurden verlässliche Versuchsergebnisse der Fachliteratur ausgewertet, die an unterschiedlichen Bau- und Vergütungsstählen gewonnen wurden, deren Eigenschaften mit denen des untersuchten Vergütungsstahles 20MnCr5 hinreichend vergleichbar sind. Auf diese Weise wurden folgende Größen gefunden:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi z} &= 0,55 & \text{aus Versuchen an 34Cr4 und St60} & [11, 12] \\ d_z &= 0,94 & \text{aus Versuchen an Ck35 (V) und 34CrMo4 (V)} & [13] \\ b &= -0,35 & \text{aus Versuchen an St42-3 und St60} & [11, 14] \\ f &= -0,91 & \text{aus Versuchen an St 35} & [15] \end{aligned}$$

Mit dem Festigkeitsmodell wurde die Torsionsausschlagfestigkeit τ_A für den Werkstoff 20MnCr5 (V) bei überlagerter ebener Vorspannung bestimmt und in Abbildung 3 dargestellt.

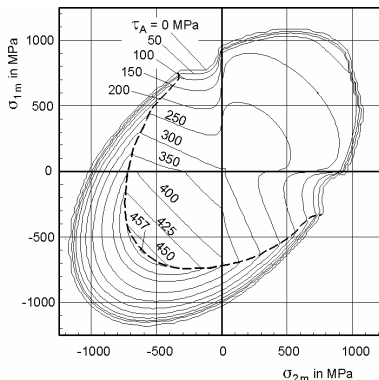


Abb. 3.

Torsionsausschlagfestigkeit τ_A in Abhängigkeit von der Größe der in gleicher Ebene wirkenden Druckvorspannungen σ_{1m} und σ_{2m} beim Spannungsverhältnis der zyklischen Torsionsbeanspruchung $R_\tau = -1$

Die Grenzkurve $\tau_A = 0$, die die ertragbare Größe der konstanten Spannungsanteile beschreibt, weist bis auf Anomalien im 2. und 4. Quadrant, die durch eine zu starke Festigkeitseinschränkung durch das Dauerfestigkeitskriterium (1) in diesem Bereich verursacht werden, eine ellipsenähnliche Form auf. Dies steht im direkten Zusammenhang mit der fast idealen Duktilität des untersuchten Werkstoffes.

Die Torsionsauschlagfestigkeit τ_A ist im Koordinatenursprung definitionsgemäß mit dem Wert der Torsionswechselfestigkeit τ_W identisch und fällt mit wachsender Größe der Vorspannungen. Das Werkstoffversagen wird hier durch das Dauerfestigkeitskriterium (1) bestimmt. Bei negativen Vorspannungen $\sigma_{1m} \approx \sigma_{2m} \approx 0,6\sigma_{dF}$ (3. Quadrant) übertrifft die prognostizierte Torsionsauschlagfestigkeit τ_A um maximal 50 % die Torsionswechselfestigkeit τ_W . Die eingezeichnete gestrichelte Linie zeigt an, dass bei weiterem Anwachsen der Druckvorspannungen das Festigkeitsverhalten nicht mehr vom Dauerfestigkeitskriterium (1), sondern vom Gewaltbruchkriterium (7) bestimmt wird.

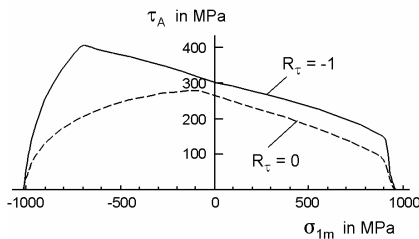


Abb. 4.
Torsionsauschlagfestigkeit
im Sonderfall $\sigma_{2m} = 0$

Bei Spannungsverhältnissen $R_\tau > -1$ reduziert sich allerdings der mögliche Festigkeitsgewinn durch Druckvorspannungen erheblich, im Falle $R_\tau = 0$ auf eine fast vernachlässigbare Größe (s. Abb. 4). Unabhängig vom Spannungsverhältnis erfordert somit die Erzielung einer hohen zyklischen Festigkeit unter Nutzung von Druckvorspannungen stets die Einstellung eines Werkstoffzustandes mit möglichst großer Druckfließgrenze σ_{dF} .

5 Zusammenfassung

Die Berechnung der Wirkung von mehrachsigen Last- und Eigenspannungen auf die Dauerfestigkeit erfordert die Berücksichtigung der relativen Richtungszuordnungen zwischen konstanten und wechselnden Spannungsanteilen sowie des unterschiedlichen Bruchverhaltens bei Zug- und Druckvorspannungen.

Mit dem neuen Festigkeitsmodell kann für die große Gruppe der im vergüteten Zustand eingesetzten Eisenwerkstoffe die Festigkeit bei beliebig mehrachsiger konstanter und überlagerter wechselnder Beanspruchung rechnerisch bestimmt werden.

An Hohlzylinderproben aus dem vergüteten Werkstoff 20MnCr5 wurden unterschiedliche Dauerfestigkeitsuntersuchungen bei wirkenden Druckvorspannungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Experimente ermöglichten die Bestimmung der Konstanten des Festigkeitsmodells, die die Wirkung von Druckvorspannungen voraussetzen. Die übrigen Konstanten wurden durch Auswertung von in der Fachliteratur veröffentlichten Versuchsergebnissen bestimmt.

Verwendete Formelsymbole

a, b, c, d _z	Parameter des Festigkeitsmodells
d _d , e, f, g	Parameter des Festigkeitsmodells
eff{}	zeitlicher Effektivwert
i	Index zur Bezeichnung der Hauptnormalspannungen bzw. zugeordneter Größen
j	Index wie i, aber im Zyklus 1-2-3-1 um den Wert 1 erhöht
K, L	Faktoren laut Formel (5)
m	Index konstanter Spannungsanteile (Mittelspannungen)
max{}	zeitlicher Maximalwert
p	Exponent (4)
q, q _w	Wichtungsfaktoren (8), (3)
R _m	Bruchfestigkeit
R _{p0,2}	Ersatzfließgrenze
ε _{φz} , ε _{φz}	Parameter des Festigkeitsmodells
λ, μ	Größen (6) zur Charakterisierung wechselnder bzw. konstanter Spannungsanteile
σ _A	Ausschlagfestigkeit bei Normalbeanspruchung
σ _{df}	Druckfließgrenze
σ _i	Hauptnormalspannung
σ _v	Vergleichsspannung
σ _{NH}	Vergleichsspannung, berechnet mit der Normalspannungshypothese
σ _{GEH}	Vergleichsspannung, berechnet mit der Gestaltänderungsenergiehypothese
σ _w	Wechselfestigkeit
σ _{Sch}	Schwellfestigkeit
σ _Σ	Gesamtspannung, bestehend aus konstantem und wechselndem Anteil
$\bar{\sigma}$	wechselnder Spannungsanteil
τ _A	Ausschlagfestigkeit bei Schubbeanspruchung
τ _F	Schubfließgrenze
τ _w	Schubwechselfestigkeit
φ _i	Richtungsdifferenzwinkel zwischen Hauptschwingbeanspruchung und konstanter Hauptnormalspannung σ _{im}

Literatur

- [1] Troost, A., E. El-Magd: Versagenskriterium metallischer Werkstoffe bei mehrachsiger Schwingbeanspruchung. Köln: Z. Flugwiss. 21 (1973) 4, S. 146 - 147
- [2] Liu, J., H. Zenner: Berechnung der Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung. Weinheim: Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik 24 (1993) S. 240 – 249, S. 296 – 303, S. 339 - 347
- [3] Dang Van, K. et al.: Criterion for High Cycle Fatigue Failure Under Multiaxial Loading. in "Biaxial and Multiaxial Fatigue", London: Mechanical Engineering Publications Limited 1989, S. 459 – 478
- [4] Goodman, J.: Mechanics applied to engineering. London 1899
- [5] Smith, J.H.: Some Experiments on Fatigue of Metals. London: Journal of the Iron and Steel Institute 82 (1910) S. 246 - 318
- [6] Gerber, H.: Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisen-Construktionen. München: Z. Bayr. Arch. Ing. 6 (1884)

- [7] Dietmann, H.: Festigkeitsberechnung bei mehrachsiger Schwingbeanspruchung. Berlin: Z. Konstruktion 25 (1973) S. 181 – 189
- [8] Lüpfer, H.-P.: Beurteilung der statischen Festigkeit und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe bei mehrachsiger Beanspruchung. Freiburger Forschungshefte A833, Leipzig – Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1994
- [9] Lüpfer, H.-P., H.-J. Spies: Einfluß mehrachsiger Druckvorspannungen auf die zyklische Festigkeit metallischer Konstruktionswerkstoffe. Freiberg 1999, unveröff. Arbeitsbericht zum DFG-Thema „Druckvorspannungen“ Lu 627/2-1
- [10] Lüpfer, H.-P., H.-J. Spies: Einfluss von Druckvorspannungen auf die Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe bei ein- und mehrachsiger Beanspruchung. Weinheim: Z. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 32 (2001), S. 837 - 844
- [11] El-Magd, E., S. Mielke.: Dauerfestigkeit bei überlagerter zweiachsiger Beanspruchung. Berlin: Z. Konstruktion 29 (1977) H. 7, S. 253 - 257
- [12] Heidenreich, R.; W. Schütz; I. Richter; H. Zenner: Schubspannungsintensitätshypothese – Dauerschwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung. Fraunhofer-Institut f. Betriebsfestigkeit Darmstadt, LFB-Ber.-Nr. FB-168 (1983)
- [13] Baier, F.: Zeit- und Dauerfestigkeit bei überlagerter statischer und schwingender Zug-Druck- und Torsionsbeanspruchung. Diss. TU Stuttgart 1970
- [14] Troost, A., E. El-Magd, S. Keil: Grundlagen zur Berechnung der Schwingfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung ohne Phasenverschiebung. Forschungsbericht des Landes NRW, Nr. 2812, Fachgruppe Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Westd. Verlag 1979
- [15] Issler, L.: Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe bei mehrachsiger phasenverschobener Schwingbeanspruchung. Diss. TU Stuttgart 1973

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die durch ihre Förderung die Durchführung der Arbeiten ermöglichte, wird ausdrücklich gedankt.

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Lüpfer
TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung
09596 Freiberg
email: luepfert@imkf.tu-freiberg.de

Prof. em. Dr.-Ing. Heinz-Joachim Spies
TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Werkstofftechnik
09596 Freiberg
email: spies@ww.tu-freiberg.de

Das Beanspruchungsverhalten einer Seiltrommel unter nicht rotationssymmetrischer Belastung

Steffen OTTO

Technische Universität Clausthal

Abstract

Die Dimensionierung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln basiert bisher auf der Annahme rotationssymmetrischer Lastverteilungen. Jüngste Untersuchungen des Instituts für Maschinenwesen der TU Clausthal, haben demgegenüber gezeigt, dass bei Seiltrommeln mit einem LeBus-Rillungssystem nicht-rotationssymmetrische Belastungen des Trommelmantels und der Bordscheiben auftreten. Der Artikel stellt einen Berechnungsansatz zur Ermittlung der nicht-rotationssymmetrischen Druckbelastung des Trommelmantels und der daraus resultierenden Beanspruchungen vor.

Keywords

Fördertechnik, Seiltrommel, LeBus-Rillungssystem

1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die heute existierenden Berechnungsverfahren zur Dimensionierung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln (z.B. [1], [2] und [3]) basieren auf rotationssymmetrischen Lastannahmen. Zu den Belastungen einer Seiltrommel zählen im Wesentlichen der vom Seilpaket auf den Trommelmantel ausgeübte Wickeldruck $p(x)$ und die Linienkräfte $F_i(r)$ und $F_j(r)$ der Seillagen auf die Bordscheiben (Bild 1).

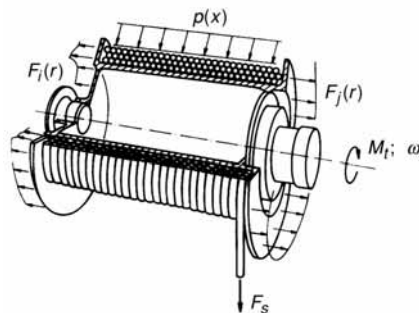


Bild 1: Rotationssymmetrische Druck- und Linienkraftverteilung als Grundlage für die Beanspruchungsermittlung mehrlagig bewickelter Seiltrommeln [2]

Die Annahme rotationssymmetrischer Belastungsverhältnisse widerspricht jedoch der in der Praxis beobachteten und experimentell nachgewiesenen Umfangslastverteilung auf Mantel und Bordscheiben. Dies gilt insbesondere für Seiltrommeln mit einer Mantelrillung nach dem LeBus-Prinzip. Das Rillungssystem nach LeBus ist durch vier Umfangsbereiche charakterisiert. Dies sind zwei Parallelabschnitte (PB) und zwei Kreuzungsabschnitte (KB), in denen das Seil jeweils um eine halbe Steigungsbreite in Axialrichtung abgelenkt wird (Bild 2). Die Winkelausdehnung des Parallel- und Kreuzungsbereiches und die Rillungssteigung variieren von Konstruktion zu Konstruktion. Sie sind vom Einsatzfall, dem Seildurchmesser, den Seiltoleranzen, den Trommelabmessungen und der Seilbiegesteifigkeit abhängig.

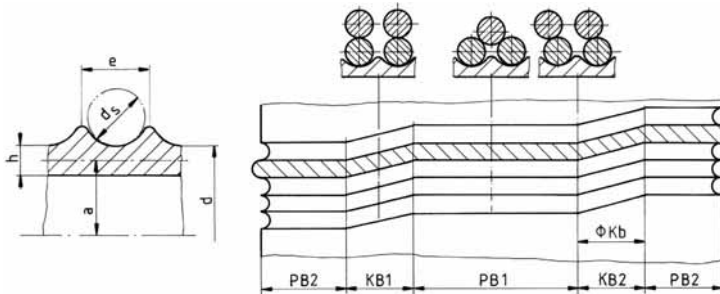


Bild 2: Bezeichnungen der Mantelgeometrie und Anordnung der Seilwindungen im Parallel- und Kreuzungsbereich

Durch die definierte Seilführung ist die Anordnung der Seilwindungen für den Parallel- und Kreuzungsbereich fest vorgegeben. Bild 2 (rechte Darstellung) verdeutlicht die sich verändernden Kontaktverhältnisse an drei ausgewählten Schnitten des Mantelumfanges in idealisierter Form. Eine Verschiebung der Kreuzungsbereiche von Seillage zu Seillage, wie sie in begrenztem Maße praktisch auftritt, wurde hier nicht betrachtet. Es kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen:

- *Mitte des Kreuzungsbereiches:* Die Windungen der oberen Lage erreichen ihren höchsten Punkt beim Überrollen der unteren Seilwindungen. Es liegt eine säulenförmige Stapelung der Seilquerschnitte vor.
- *Mitte des Parallelbereiches:* Die Windungen der oberen Seillage werden in den Lücken der unteren Windungen geführt. Das Wickelbild ist in diesem Bereich durch eine pyramidale Stapelung der Seilquerschnitte gekennzeichnet.
- *Beginn des Kreuzungsbereiches:* Die oberen Windungen werden durch die Vorgängerwindungen oder durch Führungskeile an der Bordscheibe abgelenkt und beginnen die darunter liegenden Windungen zu überrollen.

Bild 3 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer experimentellen Beanspruchungsanalyse an einer Seiltrommel mit einem LeBus-Rillungssystem. Die Messpunkte (KB1, PB1, KB2, PB2) waren bei diesem Versuch auf drei axial versetzten Schnittebenen – jeweils mittig in den Rillungsbereichen – angeordnet. Die Kurvenverläufe stellen den Anstieg der Tangentialspannungen bei konstanter Zugkraft F_S und zunehmender Lagenanzahl dar. Entgegen der Erwartung eines nahezu gleichmäßigen Beanspruchungsverlaufes über dem Umfang des Mantels treten ab der zweiten Seillage deutliche Unterschiede in den Tangentialspannungswerten auf, die sich mit zunehmender Bewicklung vergrößern. Bei Vollbewicklung mit sieben Lagen wei-

chen die minimalen und maximalen Tangentialspannungen um ca. 30% voneinander ab. Zwischen dem höchst beanspruchten Parallel- und Kreuzungsbereich (PB 1 und KB 2 im Diagramm) ergibt sich eine prozentuale Differenz von ca. 15%.

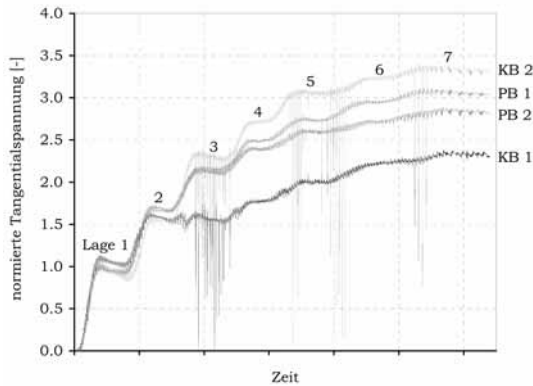


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der Tangentialspannungen am Innendurchmesser des Trommelmantels (Die Tangentialspannungen sind auf den Wert in der Seillage 1 normiert.)

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde der kausale Zusammenhang zwischen den experimentell festgestellten Beanspruchungsunterschieden und einer nicht-rotationssymmetrischen Druckbelastung $p(x, \phi)$ des Trommelmantels durch das Seilpaket näher beleuchtet. Weitere Einflussfaktoren, wie lokale Wanddickeänderungen des Mantels oder der Einfluss der Rillungssteifigkeit, konnten als Hauptursache für die nicht-rotationssymmetrische Beanspruchungsverteilung ausgeschlossen werden.

2 Die nicht-rotationssymmetrische Belastung des Trommelmantels

2.1 Einfluss des Wickelradienunterschieds zwischen den Rillungsbereichen

Das Bewickeln der ersten Seillage erfolgt sowohl im Parallel- als auch im Kreuzungsbereich über dem gesamten Umfang mit einem konstanten Wickelradius ($r_{pb,1} = r_{kb,1}$). Ab der zweiten Seillage ändert sich der Wickelradius über dem Umfang des Trommelmantels infolge des Überrollens der unteren Windungen innerhalb des Kreuzungsbereiches. Zwischen beiden Rillungsbereichen entsteht demnach ein Wickelradienunterschied Δr_1 (Bild 4).

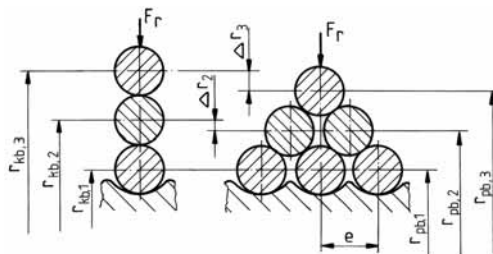


Bild 4: Unterschied Δr_1 zwischen dem Wickelradius $r_{pb,1}$ im PB und $r_{kb,1}$ im KB

Für den gesamten Umfang lässt sich unter Annahme geometrisch idealer Verhältnisse, d.h. bei Vernachlässigung von Seilquerschnitts- und Mantelverformungen, durch Erweiterung der von Dietz [1] angegebenen Formel, nachfolgender Zusammenhang für den Wickelradius $r_l(\phi)$ herleiten (Gl. 1).

$$r_l(\phi) = \left[a + \frac{h}{2} \right] + \frac{1}{2} d_s \left[1 + (1-l) \sqrt{4 - \frac{e^2}{d_s^2} F_\phi^2} \right] \quad (1)$$

mit: $F_\phi = 1$ im Parallelbereich und $F_\phi = \frac{\phi_{kb} - 2\phi}{\phi_{kb}}$ im Kreuzungsbereich

Mit der Voraussetzung, dass Beginn und Ende der Seilkreuzungen in jeder Lage mit den Vorgaben der Rillungsgeometrie übereinstimmen, ergibt sich der maximale Unterschied zwischen den Wickelradien in der Mitte des Kreuzungsbereiches bei einer Winkelposition von $\phi_{kb}/2$. Mit der zusätzlichen Annahme, dass die Seilkreuzungen einer jeden Seillage übereinander liegen, beträgt der maximale Radius $r_{kb,l}$ einer Seillage in der Mitte des Kreuzungsbereiches ausgehend von Gl. 1:

$$r_{kb,l} = \left[a + \frac{h}{2} \right] + d_s \left(1 - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

Unter Verwendung von Gl. 1 und Gl. 2 kann somit für das unverformte Seilpaket der maximale verhältnismäßige Unterschied zwischen den Wickelradien im Parallel- und Kreuzungsbereich mit Gl. 3 ausgedrückt werden.

$$K_{r,l} = \frac{r_{kb,l}(\phi)}{r_{pb,l}(\phi)} = \frac{\left[a + \frac{h}{2} \right] + d_s \left(1 - \frac{1}{2} \right)}{\left[a + \frac{h}{2} \right] + \frac{1}{2} d_s \left[1 + (1-l) \sqrt{4 - \frac{e^2}{d_s^2}} \right]} \quad (3)$$

Trommelkonstruktion	1	2	3	4	5	6
d_s	14	15	17	18	20	23
e	14,7	15,75	17,85	18,9	21,0	24,15
a	159,0	181,75	190,5	206,0	221,25	273,5
h	18,0	21,5	22,0	20,0	27,5	28,0
L	338,0	489,0	482,0	624,0	777,0	1111,0
ϕ_{kb}	54,0	55,0	55,0	54,0	45,0	54,0
$K_{r,1}$	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$K_{r,2}$	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011
$K_{r,3}$	1,021	1,020	1,021	1,021	1,021	1,020
$K_{r,4}$	1,030	1,028	1,030	1,030	1,030	1,029
$K_{r,5}$	1,037	1,036	1,038	1,037	1,038	1,036

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Trommelkonstruktionen mit den zugehörigen $K_{r,i}$ -Werten für die Betrachtung an unverformten Seilquerschnitten

Der maximale prozentuale Unterschied der Wickelradien wurde für eine Auswahl verschiedener Trommelgeometrien (Tabelle 1) untersucht. Die Maximalwerte liegen für eine fünflagige Bewicklung mit geringer Streubreite stets unterhalb von 5%. Es wird deutlich, dass der Seildurchmesser d_s im Vergleich zur Lagenanzahl l einen zu vernachlässigenden Einfluss besitzt, weil die Relation zur Seilsteigung e für verschiedene Trommelgeometrien nahezu konstant ist. Die Seilsteigung e wird im Allgemeinen, je nach der zu erwartenden Seiltoleranz, durch einen prozentualen Zuschlag zum Seildurchmesser (ca. 5% bis 6% des Seildurchmessers) ermittelt. Aus Gl. 3 geht hervor, dass für geringe Seiltoleranzen mit entsprechend kleinen Seilsteigungen der Unterschied zwischen den Wickelradien $K_{r,l}$ abnimmt. Der Einfluss ist aufgrund der geringen Variationsbreite der Seilsteigung generell aber sehr klein.

Die Änderung des Wickelradius $r_l(\phi)$ bewirkt eine umgekehrt proportionale Änderung des radialen Wickeldruckes innerhalb einer jeden Lage (Gl. 4). Mit den vorgenannten Erkenntnissen ist demnach festzustellen, dass der Wickeldruck im Kreuzungsbereich – aufgrund des größeren Wickelradius – kleiner als der Wickeldruck im Parallelbereich ist.

$$\sigma_{\phi,s} = \frac{P_{\max,l} \cdot r_l}{s}$$

mit: $r_l = f(\phi)$ und $\sigma_{\phi,s} = \frac{F_{s,l}}{s^2}$ folgt:

$$P_{\max,l} = \frac{F_{s,l}}{s} \cdot \frac{1}{r_l(\phi)} \quad (4)$$

Gl. 4 beschreibt den Zusammenhang zwischen der Seilzugkraft F_S und dem Wickeldruck in einfacher Weise. Der Einfluss der Seilelastizität und die Auswirkung von Entlastungserscheinungen infolge von Seilquerschnitts- und Mantelverformungen werden hiermit nicht erfasst. Der Druckbetrag $p_{\max,l}$ entspricht deshalb dem theoretischen Maximaldruck einer Seillage. Im Folgenden wird der Einfluss der hier nicht berücksichtigten Entlastungsmechanismen auf das Druckverhältnis zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich abgeschätzt.

2.2 Einfluss des Seilpaketsteifigkeitsunterschieds zwischen den Rillungsbereichen

Die Druckentwicklung auf den Trommelmantel resultiert aus einer Last-Verformungs-Kopplung, in der Belastungs- und Entlastungsmechanismen parallel ablaufen. Wesentliche Einflussparameter bilden dabei die Seilpaketsteifigkeit und die Mantelverformungen. Beide Einflussgrößen ändern sich nicht nur während des Wickelprozesses kontinuierlich, sie besitzen außerdem eine unterschiedlich hohe Ausprägung im Parallel- und Kreuzungsbereich. Aus experimentellen Untersuchungen ist beispielsweise bekannt, dass der Querelastizitätsmodul der pyramidalen Seilwindungsanordnung im Parallelbereich ca. 70% des Wertes für die Säulenordnung im Kreuzungsbereich beträgt [2]. Aufgrund der daraus resultierenden unterschiedlichen Seillagenverformung ergeben sich im Parallel- und Kreuzungsbereich verschiedene Wickeldrücke. Im Fall der nicht-rotationssymmetrischen Mantelverformung wird die Lastverteilung zudem durch das zu erwartende beliebig gekrümmte Verformungsbild des Mantels bestimmt, welches partielle Druckverlagerungen über dem Umfang hervorrufen kann. Die Lösung dieser Last-Verformungs-Beziehung ist allerdings noch offen. Im Folgenden wird deshalb ein Belastungsmodell zur Einordnung des Wickeldruckunterschiedes zwischen dem Parallel- und Kreuzungsbereich entwickelt. Darin werden sowohl die unterschiedlichen Wickelradien als auch die variierende Seilpaketsteifigkeit in beiden Rillungsbereichen berücksichtigt.

Das Druckverhältnis $K_{p,l}$ zwischen dem Druck p_{pb} im Parallelbereich und p_{kb} im Kreuzungsbereich einer jeden Lage l lässt sich allgemein mit Gl. 5 ausdrücken. Darin erfolgte eine bereichsweise Aufteilung des Wickeldruckes in den Druck ohne Entlastung und den Entlastungsanteil selbst.

$$K_{p,l} = \frac{p_{pb,l}}{p_{kb,l}} = \frac{p_{pb,max,l} - \Delta p_{pb,l}}{p_{kb,max,l} - \Delta p_{kb,l}} \quad (5)$$

Durch Ausnutzung des Zusammenhangs zwischen Druckbelastung und Seillagenradius nach Gl. 4 sowie des Verhältnisses der Wickelradien aus Gl. 3 geht Gl. 5 in Gl. 6 über.

$$K_{p,l} = \frac{p_{pb,max,l} - \Delta p_{pb,l}}{p_{kb,max,l} - \Delta p_{kb,l}} = \frac{p_{pb,max,l}}{p_{kb,max,l}} \cdot \frac{1 - \frac{\Delta p_{pb,l}}{p_{pb,max,l}}}{1 - \frac{\Delta p_{kb,l}}{p_{kb,max,l}}} = K_{r,l} \cdot \frac{1 - \frac{\Delta p_{pb,l}}{p_{pb,max,l}}}{1 - \frac{\Delta p_{kb,l}}{p_{kb,max,l}}} \quad (6)$$

Die Abschätzung des Entlastungsanteils $\Delta p_{kb,l}$ kann unter Verwendung der Berechnungsmethode von Dietz vorgenommen werden, womit eine Übertragung des von ihm angenommenen rotationssymmetrischen Belastungsmodells auf die Verhältnisse im Parallel- und Kreuzungsbereich verbunden ist. Die gegenseitige Beeinflussung beider Bereiche, welche Druckverlagerungen über dem Umfang des Trommelmantels hervorruft, bleibt außer Acht. Das von Dietz verwendete Säulenmodell der aufeinandergestapelten Seilwindungen (Bild 5) beschreibt die Kontaktverhältnisse und damit den Entlastungsmechanismus im Kreuzungsbereich sehr gut.

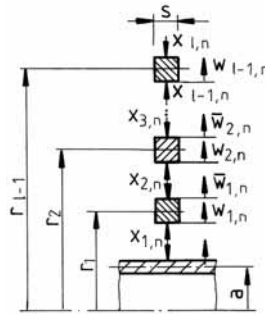


Bild 5: Abstraktion des Seilpaketes nach Dietz [1]

Für den Entlastungsanteil im Kreuzungsbereich $\Delta p_{kb,l}$ gilt somit:

$$\Delta p_{kb,l} = p_{kb,max,l} - p_{dietz,l}$$

$$\frac{\Delta p_{kb,l}}{p_{kb,max,l}} = 1 - \frac{p_{dietz,l}}{p_{kb,max,l}} = 1 - K_{c,l} \quad (7)$$

Die unterschiedliche Anordnung der Seilwindungen im Parallel- und Kreuzungsbereich mit den daraus resultierenden Steifigkeitsunterschieden im Seilpaket führt zu unterschiedlichen

Entlastungsbeträgen in beiden Rillungsbereichen. Dieser Entlastungsunterschied wird mit der Einführung des lagenabhängigen Bereichsfaktors $K_{b,l}$ beschrieben. Es gilt:

$$\Delta p_{pb,l} = K_{b,l} \cdot \Delta p_{kb,l} \quad (8)$$

Der Entlastungsbetrag steht in umgekehrt proportionalem Zusammenhang mit dem Querelastizitätsmodul des Seiles bzw. der Seilwindungsstapelung. Ausgehend von dem Sachverhalt, dass der Querelastizitätsmodul der pyramidalen Seilanordnung ca. 70% des Wertes der Säulenordnung im Kreuzungsbereich beträgt, kann demnach für den Bereichsfaktor $K_{b,l}$ eine obere Grenze von 1,4 festgelegt werden. Als untere Grenze für ein praktisch sinnvoll erscheinendes Untersuchungsintervall wird ein Bereichsfaktor von 0,7 definiert. Damit ist es möglich, Belastungsfälle in die allgemeine Betrachtung einzuschließen, bei denen der Entlastungsanteil im Parallelbereich kleiner als im Kreuzungsbereich ist. In der ersten Seillage gilt neben $K_{r,l} = 1$ auch $K_{b,l} = 1$, weil für beide Rillungsbereiche eine identische Seilpaketsteifigkeit anzunehmen ist.

Das Verhältnis zwischen dem Wickeldruck im Parallel- und Kreuzungsbereich einer jeden Lage l kann mit Gl. 7 und der Definition des Bereichsfaktors $K_{b,l}$ (Gl. 8) in Form von Gl. 9 geschrieben werden.

$$K_{p,l} = \frac{K_{r,l} - K_{b,l}(1 - K_{e,l})}{K_{e,l}} \quad (9)$$

Die Gesamtdrucke im Parallel- und Kreuzungsbereich ergeben sich aus der Summierung der Druckanteile aller Seillagen. Mit dem Verhältnis der Bereichsdrücke einer jeden Lage (Gl. 9) kann das Gesamtdruckverhältnis mit Gl. 10 berechnet werden. Dabei bilden die nach Dietz ermittelten Druckbelastungen den Bezugswert.

$$K_p = \frac{\sum_1 p_{pb,l}}{\sum_1 p_{kb,l}} = \frac{\sum_1 K_{p,l} \cdot p_{dietz,l}}{\sum_1 p_{dietz,l}} \quad (10)$$

Mit dieser Methode zur Einordnung der zu erwartenden nicht-rotationssymmetrischen Belastung des Trommelmantels lässt sich die winkelabhängige Druckverteilung als Stufenfunktion mit einem konstanten Druckniveau p_{pb} in beiden Parallelbereichen bzw. p_{kb} in beiden Kreuzungsbereichen beschreiben (Bild 6).

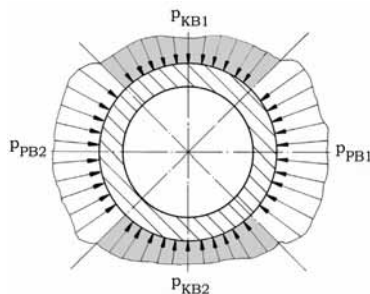


Bild 6: Druckverteilung über dem Trommelmantel mit unterschiedlich hohen Niveaus im Parallel- und Kreuzungsbereich (es gilt: $p_{pb1} = p_{pb2}$ und $p_{kb1} = p_{kb2}$)

3 Das Beanspruchungsverhalten des Trommelmantels

3.1 Voraussetzungen und Annahmen für das mechanische Modell

Aus mechanischer Sicht stellt der Trommelmantel einen geschlossenen, kreiszylindrischen, elastisch gelagerten und isotropen Körper dar, dessen Beanspruchungsverhalten mit Hilfe der linearen Biegetheorie der Kreiszylinderschale beschrieben werden kann. Für die Anwendung dieser Theorie gelten folgende Annahmen und Voraussetzungen:

1. Die Schalendicke h ist klein gegenüber den anderen Hauptabmessungen der Schalenmittelfläche (Anhaltswert: $0,05 \leq h/a \leq 0,15$) und schwach gekrümmt. Die im Kranbau und weiteren Bereichen der Hebetchnik eingesetzten Seiltrommeln erfüllen zumeist diese Voraussetzung.
2. Die Verformungen sind klein gegenüber der Schalendicke h .
3. Das Material wird als homogen, isotrop und linearelastisch angesehen. Es gelte das HOO-KESche Gesetz.
4. Alle Punkte auf einer Normalen zur unverformten Mittelfläche liegen auch nach der Verformung auf einer Normalen zur verformten Mittelfläche, d.h. alle Querschnitte bleiben eben (Bernoullische Normalenhypothese).
5. Die Normalspannung senkrecht zur Schalenmittelfläche nimmt Werte zwischen der Belastung p_n und Null an, sie kann im Vergleich zu allen anderen Normalspannungen vernachlässigt werden.
6. Die Schalendicke ändert sich bei der Belastung nicht. Somit kann die Dehnung senkrecht zur Schalenmittelfläche zu Null angenommen werden. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass die Wanddicke über dem Umfang und der Länge näherungsweise konstant ist.

Der Trommelmantel erfährt neben der radialen Druckbelastung $p_n(x, \phi)$ eine Axialbiegung durch die Seilzugkraft und ein Torsionsmoment infolge des Antriebes. Diese beiden Lastkomponenten besitzen, wie Dietz nachgewiesen hat, gegenüber dem radialen Wickeldruck einen zu vernachlässigenden Effekt auf die Beanspruchungen des Trommelmantels.

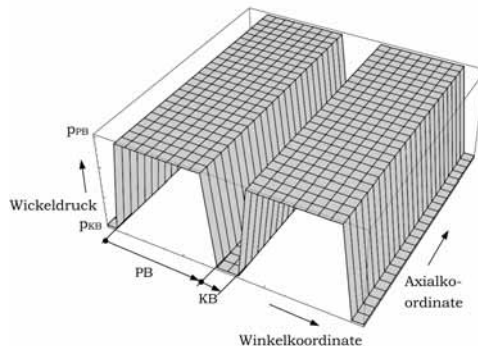


Bild 7: Dreidimensionale Druckfunktion $p_n(x, \phi)$

Die Beschreibung des nicht-rotationssymmetrisch wirkenden radialen Wickeldrucks $p_n(x, \phi)$ basiert auf der in Kapitel 2 hergeleiteten Stufenfunktion, welche über der Trommellänge als

konstant angesehen wird. Damit ist die Annahme verbunden, dass jede Seilwindung den gleichen Druck auf den Mantel ausübt, also keine Zugkraftänderung innerhalb einer Lage stattfindet. Bild 7 veranschaulicht die dreidimensionale Stufenfunktion für die Druckbelastung des Trommelmantels in einer qualitativen Darstellung.

3.2 Das System partieller Differentialgleichungen der Kreiszylinderschale

Für die Analyse des Beanspruchungsverhaltens einer beliebig belasteten Kreiszylinderschale existieren in der Literatur zahlreiche voneinander abweichende Theorien [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Krätzig [14] gibt einen umfassenden Vergleich und zudem Bewertungsmaßstäbe für die verschiedenen Methoden an. Zur Ermittlung der Trommelmantelbeanspruchungen unter der im Kapitel 2 erläuterten nicht-rotationssymmetrischen Druckverteilungsfunktion wurde die FLÜGGESche Theorie verwendet. Die Lösung des inhomogenen Systems partieller Differentialgleichungen nach FLÜGGE, welche hier nicht explizit angegeben ist, erfolgte mit Hilfe von Reihenansätzen für die Last- und Verschiebungskomponenten.

Die Verbindung von Mantel und Bordscheiben verkörpert für beide Elemente eine elastische Lagerung der Berandungskurven. Die Steifigkeit der Mantel-Bordscheiben-Verbindung wird durch die Dicke der Bordscheibe und des Mantels sowie durch die Kopplungsgeometrie selbst (z.B. Dicke der Stützscheibe oder des Getriebeflansches) bestimmt. Des Weiteren beeinflussen Stütz- und Zwischenscheiben häufig das Beanspruchungsverhalten des Trommelmantels, indem die aktive Mantellänge verkürzt wird. Für die Ermittlung spezieller Lösungen des Differentialgleichungssystems wurden idealisierte Randbedingungen verwendet, welche eine Fest-Los-Lagerung des Mantels mit einer ideal verdrehweichen (Bild 8, links) bzw. ideal verdrehsteifen Mantel-Bordscheiben-Verbindung (Bild 8, rechts) widerspiegeln. Im Vergleich zur Praxis werden damit potentielle Grenzfälle beschrieben.

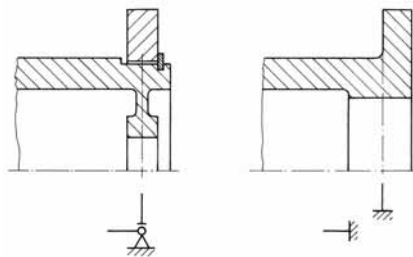


Bild 8: Idealisierte Mantel-Bordscheiben-Verbindungen; links: verdrehweiche Verbindung, rechts: verdrehsteife Verbindung

4 Auswirkungen der nicht-rotationssymmetrischen Druckbelastung

Das in Kapitel 2 vorgestellte Belastungsmodell ermöglicht es dem Konstrukteur, die Beanspruchungen des Trommelmantels für die in der Praxis auftretende nicht-rotationssymmetrische Lastverteilung zu ermitteln. Im Hinblick auf ein daran angepasstes Design können die Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen in Form nachstehender Hinweise resümiert werden:

- Bei Trommelkonstruktionen mit einem in Parallel- und Kreuzungsbereiche unterteilten Rillungssystem treten gegenüber den Ergebnissen der bisher gültigen Berechnungsverfahren Beanspruchungsüberhöhungen auf, deren Betrag in Anhängigkeit der Rillungsgeometrie variiert. Ursache dieses Effektes ist die bisher nicht berücksichtigte Biegespannung in Umfangsrichtung des Mantels. Bild 9 zeigt in diesem Zusammenhang für eine exemplarisch ausgewählte Trommelgeometrie ($h/a = 0,1$; $\kappa L = 8$) die Beanspruchungsüberhöhungen im Vergleich zu einer rotationssymmetrisch belasteten Schale, wenn eine freie radiale Mantelverformung angenommen wird. Für die in der Praxis üblichen Bereichseinteilungen von $2 \leq \phi_{pb}/\phi_{kb} \leq 3$ ergeben sich in diesem Fall Beanspruchungsüberhöhungen zwischen 10% und 30% im Vergleich zu den Ergebnissen bisheriger Berechnungsmethoden, wenn Druckunterschiede zwischen 5% und 15% angenommen werden.

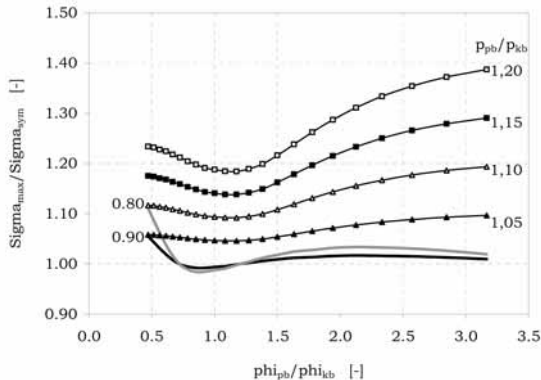


Bild 9: Verhältnis der inneren maximalen Tangentialspannungen

- Aus Bild 9 geht weiterhin hervor, dass für eine gegebene Druckbelastung des Trommelmantels ein optimales Verhältnis zwischen der Winkelausdehnung des Parallel- und Kreuzungsbereiches ($\phi_{pb} \approx \phi_{kb}$) existiert, für welches die Beanspruchungsüberhöhung minimal wird. Der Konstrukteur sollte daher unter gleichzeitiger Abwägung weiterer Aspekte (z.B. Spulungsverhalten, Seilverschleiß u.a.) dieses Optimum anstreben.
- Die nicht-rotationssymmetrische Druckverteilung wird u.a. vom Unterschied der Wickelradien zwischen Parallel- und Kreuzungsbereich beeinflusst. Dieser kann minimiert werden, indem der prozentuale Zuschlag zum Seildurchmesser für die Ermittlung der Rillensteigung verringert wird.
- Infolge des Druckunterschiedes treten zwischen dem Parallel- und Kreuzungsbereich axiale Verschiebungsdifferenzen auf (Bild 10), welche aufgrund der Verformungsbehinderung durch die Bordscheibe zusätzliche Axialkräfte im Anbindungsbereich bewirken. Diese Axialkräfte sind bei der Auslegung der Kopplungsgeometrie bzw. der Bordscheibenverbindung (z.B. Schweißnaht, Verschraubung) zu berücksichtigen.
- Die Stützwirkung des Seilpaketes behindert die freie Mantelbiegung in Umfangs- und Axialrichtung. Dies führt insbesondere bei der Verwendung steifer Seile zu Belastungs- und Beanspruchungsverlagerungen über dem Mantelumfang, die mit dem erarbeiteten Berechnungsverfahren analytisch nicht determiniert werden. Die Stützwirkung des Seilpaketes behindert ebenfalls das Ausbeulen des Trommelmantels. Der elastische Stabilitätskol-

laps bleibt deshalb für übliche Trommelgeometrien kein vordergründiges Versagenskriterium.

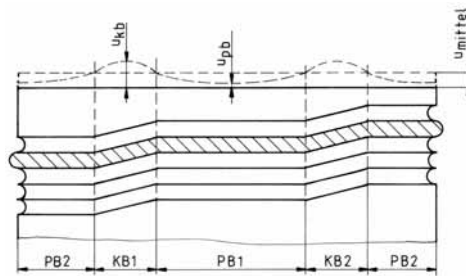


Bild 10: Axiale Verschiebungsdifferenzen zwischen den Rillungsbereichen

Zusammenfassend betrachtet bildet das vorgestellte Berechnungsverfahren den Einstieg in die Dimensionierung der gesamten Seiltrommel für die in der Praxis auftretenden nicht-rotations-symmetrischen Belastungen. Dies schließt zukünftig auch die Bordscheiben mit ein.

5 Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
a	Mittlerer Radius der Zylinderschale/des Trommelmantels	mm
d_S	Seildurchmesser	mm
e	Seilsteigung, Rillensteigung	mm
F_b, F_j	Axiale Linienkraft auf die Bordscheiben	N/mm
F_r	Radiale Linienkraft auf den Trommelmantel	N/mm
F_S	Seilzugkraft	N
h	Wanddicke der Zylinderschale/ des Trommelmantels	mm
K_b	Bereichsfaktor	-
K_e	Entlastungsfaktor	-
K_p	Wickeldruckverhältnis	-
K_r	Wickelradiusverhältnis	-
L	Länge des Trommelmantels	mm
l	Anzahl der Seillagen	-
p_{max}	auf den Trommelmantel wirkender maximaler Wickeldruck	N/mm ²
p_{dietz}	Seilpaketdruck nach Dietz	N/mm ²
p_n	Radialkomponente des Manteldruckes	N/mm ²
r	Wickelradius, Lagenradius	mm
s	Breite des Seilersatzquerschnittes nach Dietz	mm
Δp	Druckentlastung	N/mm ²

Δr	Differenz der Wickelradien	mm
κ	Abklingkonstante	mm ⁻¹
ϕ	Winkelkoordinate	rad
ϕ_{cb}	Winkel des Kreuzungsbereiches	rad
ϕ_{pb}	Winkel des Parallelbereiches	rad

Literatur

- [1] Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln, TH Darmstadt, Dissertation, 1971
- [2] Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel-Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilelastischem Werkstoffverhalten, TU Clausthal, Dissertation, 2001
- [3] Neugebauer, H.-J.: Berechnungsverfahren für ein- und mehrlagig bewickelte Seiltrommeln, TU Dresden, Dissertation, 1979
- [4] Flügge, W.: Statik und Dynamik der Schalen. 3. Auflage. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1962,
- [5] Flügge, W.: Stresses in Shells. 2. Auflage. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1973
- [6] Biezeno, C. B.; Grammel, R.: Technische Dynamik. Bd. 1: Grundlagen und einzelne Maschinenteile. 2. Auflage. Berlin u. a.: Springer Verlag, 1953
- [7] Girkmann, K.: Flächentragwerke – Einführung in die Elastostatik der Scheiben, Platten, Schalen und Faltwerke. 6. Auflage. Wien: Springer-Verlag, 1963
- [8] Wlassow, W. S.: Allgemeine Schalentheorie und ihre Anwendung in der Technik. Berlin: Akademie Verlag, 1958
- [9] Axelrad, E. L.: Leitfäden der angewandten Mathematik und Mechanik. Bd. 45: Schalentheorie. Stuttgart: B. G. Teubner, 1983
- [10] Pflüger, A.: Elementare Schalenstatik. 5. Auflage. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1981
- [11] Donnell, L. H.: Beams, Plates and Shells. New York: McGraw-Hill Book Company, 1976
- [12] Sanders, J. L.: On Improved First-approximation Theory for thin Shells. NASA Techn. Report R24, 1959
- [13] Rabich, R.: Ingenieur Taschenbuch Bauwesen. Bd. 1: Statik der Platten, Scheiben, Schalen. Edition Leipzig, 1964
- [14] Yavuz, B.; Krätzig W. B.: Mechanik der Flächentragwerke. Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn, 1985

Dipl.-Ing. Steffen OTTO
 Technische Universität Clausthal
 Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen
 Robert-Koch-Straße 32
 38678 Clausthal-Zellerfeld
 email: otto@imw.tu-clausthal.de

Gestaltung von Arbeits- und Umlenkwalzen für große Geschwindigkeiten und Arbeitsbreiten

Dieter H. MÜLLER, Markus KOCHMANN

Universität Bremen - Bremer Institut für Konstruktionstechnik

Abstract

Für Bahnwarenmaschinen der Textil-, Kunststoff-, Papier- und Druckindustrie gelten steigende Anforderungen in Bezug auf Produktionsgeschwindigkeit und Arbeitsbreite. Der Einsatz von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen in Kombination mit passiven und aktiven Maßnahmen zur Kompensation der Durchbiegung ermöglicht eine Erweiterung des Einsatzfeldes. Dargestellt wird die Entwicklungskette von der Bauteilgestaltung über die numerische Simulation bis zur Erprobung von Prototypen im Versuchsstand.

Keywords

Bahnwarenmaschinen, Walzen, CFK, Biegekompensation, FEM

1 Einleitung

In vielen Bahnwarenmaschinen für die Textil-, Kunststoff-, Papier- und Druckindustrie sowie für artverwandte Industriebereiche werden die Anforderungen insbesondere zur Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit und der Arbeitsbreite immer höher. Das dafür erforderliche, größere dynamische Potential der bahnbearbeitenden und bahntransportierenden Teile kann nur durch sehr leichte und teilweise sehr schnell laufende Walzen erreicht werden.

Leichte Arbeits-, Umlenk- oder Führungswalzen werden in allen produzierenden Bereichen der kontinuierlichen Bahnverarbeitung eingesetzt. Beispiele sind Arbeits- und Umlenkwalzen in:

- Continue-Anlagen zur Herstellung und Veredelung von Textilien und Nonwovens
- Anlagen zur Verarbeitung und Veredelung von Papier
- Herstellung und Weiterverarbeitung von Folien
- Anlagen der Druckindustrie

Die in diesen Anlagen eingesetzten Walzen lassen sich entsprechend ihrem Einsatz in drei Klassen einteilen:

- Walzen zur Bahnführung
- Walzen zur Bahnbearbeitung
- Walzen mit Wirkgeometrien

Die Abbildungen 1, 2 und 3 zeigen den schematischen Aufbau der entsprechenden Klassen. In der Textilindustrie erreicht die Produktionsgeschwindigkeit bei Vliesstoffkrepeln 400 m/min. In den nächsten vier bis fünf Jahren wird eine Steigerung auf ca. 500 m/min angestrebt. In der Papierindustrie sind Produktionsgeschwindigkeiten von mehr als

1000 m/min Stand der Technik. Ähnliches gilt für Anlagen zur Herstellung und Verarbeitung von Folien.

Auch in gleichförmig arbeitenden Anlagen sind häufig Komponenten eingesetzt, die zusätzlich zu den hohen Arbeitsgeschwindigkeiten noch eine reversierende Bewegung ausführen. Hier kommt es insbesondere auf niedrige Massen und damit Massenträgheitskräfte an, die bei der Beschleunigung des Bauteils auftreten und die die maximal erreichbaren Arbeitsgeschwindigkeiten begrenzen. Häufig sind die sehr schnell laufenden Walzen die technologisch bestimmenden Bauteile und limitieren Leistung und Qualität der herzustellenden Produkte.

Zur weiteren Produktionssteigerung ist gleichzeitig eine Vergrößerung der Arbeitsbreite der Maschinen erforderlich. In Teilen der Textilindustrie verdoppelte sich die Arbeitsbreite in den vergangenen zehn Jahren auf ein Maß von fünf Metern. In der Papierindustrie sind Arbeitsbreiten von zehn Metern üblich.

Diese Tendenz zu immer schnelleren und breiteren Arbeits- und Umlenkwalzen für Bahnwarenmaschinen wird von steigenden Anforderungen an Genauigkeit, Arbeitsruhe, Energiebedarf und Platzbedarf begleitet. Eine vergrößerte Arbeitsbreite bedeutet bei unveränderter Konstruktion eine exponentiell ansteigende Durchbiegung, die verschiedene Mängel nach sich ziehen kann:

- Veränderung des Spaltabstandes der Walzen zueinander über die Breite
- breitenabhängige Veränderung der Bahnspannung

Darüber hinaus wird die biegekritische Drehzahl abgesenkt, so dass der Betriebspunkt vom unterkritischen in den überkritischen Bereich verschoben werden kann. Das Durchfahren des kritischen Bereichs erzeugt weitere negative Effekte. In allen Anwendungsfällen wird die Produktqualität – bspw. gemessen an der Produktgleichmäßigkeit – infolge der Walzendurchbiegung zum Teil wesentlich verschlechtert. Der Forderung nach größeren Arbeitsbreiten und gesteigerten Geschwindigkeiten steht die steigende Anforderung an die Produktqualität und Laufruhe entgegen.[1]



Abbildung 1: Walze zur Bahnführung

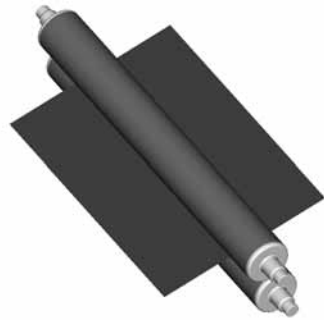


Abbildung 2: Walzen zur Bahnbearbeitung



Abbildung 3: Walze mit Wirkgeometrie

2 Werkstoffe

Diese Ziele können unter Verwendung klassischer Konstruktionswerkstoffe wie Stahl oder Aluminium nicht erreicht werden. Es sind Materialien erforderlich, die bei hohen Festigkeitswerten über ein deutlich niedrigeres spezifisches Gewicht verfügen. Der Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffen (CFK-Werkstoffe) schafft hier neue Möglichkeiten. In Tabelle 1 sind die für diese Aufgabe relevanten mechanischen Eckdaten aufgeführt. [2]

Es muss beachtet werden, dass für die CFK-Werkstoffe hier nur die Daten des Faserwerkstoffs aufgeführt sind. Diese Werte dürfen nicht direkt mit den Kennwerten für Stahl und Aluminium verglichen werden, da der Faseranteil, der Matrixwerkstoff sowie die Orientierung der einzelnen Laminatschichten Einfluss auf die daraus resultierenden Werkstoffeigenschaften des ausgeführten Bauteils haben. Die Werte eignen sich aber, um einen qualitativen Vergleich der Materialien durchzuführen.

Werkstoff		Stahl E 295	Aluminium legiert	C-Faser HTS	C-Faser XM	C-Faser XHM
E-Modul	[N/mm ²]	210000	70000	125000	190000	380000
Zugfestigkeit	[N/mm ²]	660	250	1750	1600	1600
Dichte	[g/cm ³]	7,85	2,70	1,55	1,73	1,75
Spez. E-Modul	[N·mm/g]	$0,27 \cdot 10^8$	$0,26 \cdot 10^8$	$0,81 \cdot 10^8$	$1,10 \cdot 10^8$	$2,17 \cdot 10^8$
Spez. Festigkeit	[N·mm/g]	$0,84 \cdot 10^5$	$0,93 \cdot 10^5$	$11,3 \cdot 10^5$	$9,25 \cdot 10^5$	$9,14 \cdot 10^5$

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften ausgewählter Konstruktionswerkstoffe

3 CFK-Walzen

Anders als bei flächigen Faserverbundbauteilen werden Walzen in der Regel in einem Wickelprozess hergestellt. Die zu Rovings zusammengefassten Einzelfasern werden in einem kontinuierlichen Prozess durch ein Harzbad geleitet und anschließend auf einem Wickeldorn abgelegt. Die Kombination aus der Rotation des Dorns und der Geschwindigkeit des axialen Vorschubs bestimmt den Wickelwinkel. Durch den schichtweisen Aufbau mehrerer Lagen mit unterschiedlichen Faserorientierungen wird das Rohr aufgebaut. Die Wahl und Kombination der einzelnen Lageorientierungen hat entscheidenden Einfluss auf die axiale Zug- und Schubsteifigkeit des Aufbaus. Nach dem Aushärten des Verbunds wird der Dorn ent-

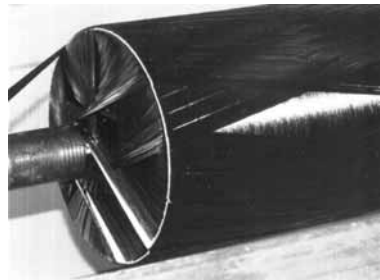


Abbildung 4: Aufbau einer CFK-Walze

nommen. Die Anbauteile (Zapfen) werden an den Fügeflächen verklebt. Die Oberfläche der Walze wird anschließend geschliffen und gegebenenfalls beschichtet. Durch das Schleifen der Oberfläche dürfen die Fasern der Tragschichten nicht unterbrochen werden. Die Schädigung der Tragschicht würde die mechanischen Eigenschaften des Bauteils beeinflussen. Durch das Aufbringen einer Radiallage kann eine Materialzugabe für das Schleifen vorgesehen werden, ohne die Tragstruktur der Walze zu verändern.

4 Biegekompensation

Durch die Wahl geeigneter Werkstoffe kann das Maß der statischen und dynamischen Durchbiegung reduziert werden. Unter bestimmten Randbedingungen kann dies aber nicht ausreichend sein. Hier können weitere konstruktive Maßnahmen erforderlich sein. Die Durchbiegung einer Walze kann durch verschiedene Verfahren reduziert werden.

Die Bombage von Walzen kompensiert die Durchbiegung durch eine Anpassung der Walzengeometrie. Die ursprünglich zylindrische Oberfläche wird konkav oder konvex geformt. Die Überlagerung dieser Form durch die Biegelinie führt zu einer geradlinigen Kontaktfläche. Eine vollständige Kompensation ist nur für die vertikale Ebene der Rotationsachse möglich. Die Bombierung von Walzen eignet sich nicht zur Kompensation einer dynamischen Durchbiegung.

Ein Reduzieren der statischen Durchbiegung, in Kombination mit einem verbesserten dynamischen Verhalten, kann durch die Beeinflussung der Rotationssteifigkeit der Lagerstellen erreicht werden. Bei einer einfachen Lagerung ist der Widerstand gegen ein Verdrehen der Lagerstelle sehr gering. Durch ein Festhalten des Rotationsfreiheitsgrades kann die Durchbiegung deutlich reduziert werden. Dies kann durch eine axial versetzte Doppellagerung erreicht werden.

Eine kraft- oder weggesteuerte Verstellung des äußeren Lagers kann die Durchbiegung weiter reduzieren. Dieses Rollbending wird durch die zulässigen Festigkeitswerte des eingesetzten Materials begrenzt. Aufgrund der vorliegenden Hebelverhältnisse müssen hier große Kräfte eingeleitet werden.

Die dynamische Durchbiegung einer Walze infolge von Unwuchten und externen Anregungen kann durch eine über die Zeit veränderliche Kompensationskraft weiter verringert werden. Diese aktiven Systeme bestehen aus drei Grundkomponenten:

- Sensor
- Regler
- Aktuator

Der Sensor nimmt die an der Lagerstelle wirkende dynamische Kraft oder Verformung auf. Im Regler wird der erforderliche Kraft- bzw. Wegbetrag berechnet. Diese Größe wird durch den Aktuator in die Struktur eingeleitet. Systeme zur aktiven Regelung von Strukturen müssen hohe Anforderungen bezüglich ihrer Geschwindigkeit und Stabilität nachweisen. Aktive Systeme ermöglichen den Betrieb einer Anlage im Bereich der Eigenfrequenzen der Struktur. [3]

5 Numerische Simulation

Mit Hilfe des Rechenmodells können Untersuchungen des statischen und dynamischen Verhaltens von Walzen durchgeführt werden. Als Werkzeug für die Berechnungen wird die Finite-Element-Methode (FEM) eingesetzt. Die Modellbildung baut auf den Konstruktionsdaten ausgeführter Walzen auf.

Unter Nutzung der Werkstoffdaten, die durch die Fasern, Faserlage und Packungsdichte definiert sind, werden die Möglichkeiten der Einsetzbarkeit von CFK-Walzen für Walzen mit hohem Schlankheitsgrad – also hohem Längen/Durchmesser-Verhältnis – für statische und dynamische Beanspruchungen ermittelt. Durch Integration konstruktiver Maßnahmen wird der Einsatzbereich erweitert, so dass aktive Maßnahmen zur Schwingungsreduzierung erst bei noch höheren dynamischen Beanspruchungen erforderlich werden.

Die Bestimmung von optimierten Gesamtgestaltungen unter der Berücksichtigung von veränderten Schichtaufbauten in der CFK-Struktur ermöglicht eine verbesserte Materialausnutzung.

Die Angaben über das Dämpfungsverhalten werden mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen am Versuchstand verglichen und optimiert. Die numerische Modellbildung ermöglicht neben der Untersuchung der elastischen Verformungen auch eine Vorausberechnung der auftretenden Bau-tenspannungen.

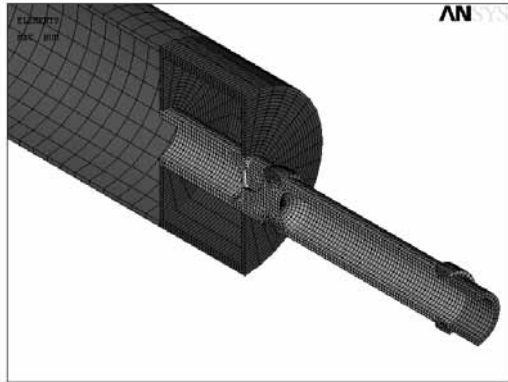


Abbildung 5: Walze mit Doppellagerung, FEM-Modell

Das Rechenmodell unterstützt die optimierte Gestaltung der Walzen. Darüber hinaus kann für einen gegebenen Lastfall die erforderliche Konfiguration des Rollbendings ermittelt werden.

Abbildung 7 zeigt zwei Konfigurationen einer Walze. Die Linien geben die Lage der Walzenmitte wieder. Im Fall 1 (rote Linie) verbleibt das verstellbare Lager in der Mittelposition. Die maximale Durchbiegung in der Walzenmitte beträgt 0,11 mm. Bei Fall 2 (blau) beträgt die Lagerverstellung 0,10 mm. Die maximale Durchbiegung reduziert sich hier auf 0,03 mm.

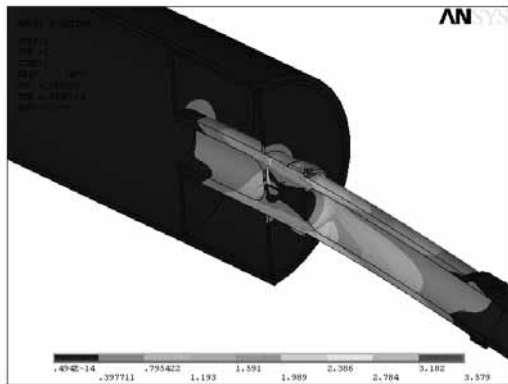


Abbildung 6: Walze mit Doppellagerung, Berechnungsergebnis

Durch die Integration der Abweichung über die Arbeitsbreite kann der Verstellweg mit dem niedrigsten Gesamtfehler schon während der Auslegung der Konstruktion bestimmt werden. Die Linienabweichung wird auf den Fehler normiert, der bei einem Lagerverstellweg von 0,0 mm erreicht wird. Im dargestellten Fall wird bei einem Verstellweg von 0,13 mm eine minimale Gesamtabweichung erreicht.

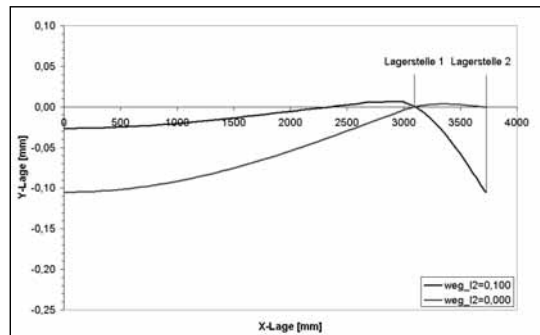


Abbildung 7: Verlauf der Mittellinie für unterschiedliche Lagerkonfigurationen

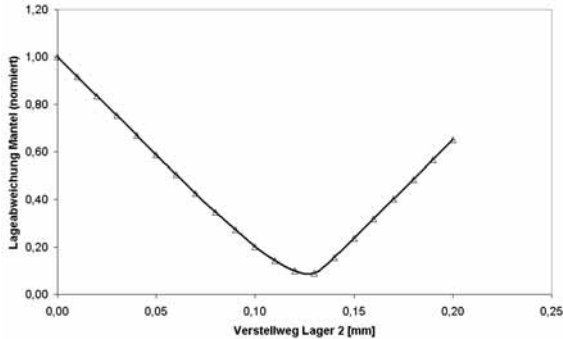


Abbildung 8: Biegekom-pensation: Normierte Dar-stellung der Gesamtabwei-chung für unterschiedliche Verstellwege beim Roll-bending

6 Verifikation

Die Maßnahmen zur konstruktiven Verbesserung der Walzen werden auf einem Versuchsstand auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft. Auf dem Versuchsstand können Walzen mit einer maximalen Arbeitsbreite von 7000 mm und einem Durchmesser von 700 mm erprobt werden. Die höchste erreichbare Drehzahl beträgt 6000 min^{-1} . Aufbauend auf ein Betonfundament verfügt der Versuchsstand über zwei axial verschiebbare Lageraufnahme. Dies ermöglicht die Anpassung an verschiedene Arbeitsbreiten. Durch die große Masse des Fundaments und acht elektropneumatisch wirkende Schwingungsdämpfer wird eine schwingungs isolierte Aufstellung erreicht, die einen Eintrag von fremderregten Schwingungen in das System verhindert. Die Gestaltung der Wangen ermöglicht die Aufnahme von Komponenten für die aktive und passive Schwingungsreduzierung. Der Versuchsstand verfügt über einen mechanisch entkoppelten Antrieb mit einer Leistung von 150 kW. Die hohe Bemessung der Antriebsleistung ermöglicht eine kurze Hochlaufzeit der Anlage. Dies ist insbesondere für den überkritischen Einsatz der Anlage erforderlich. Der kritische Drehzahlbereich kann in kurzer Zeit durchlaufen werden, was die auftretenden Resonanzphänomene reduziert.

Zur Erfassung der zeitlich veränderlichen Messgrößen ist der Versuchsstand mit Sensoren und einer digitalen Signalverarbeitung ausgerüstet. Beim Betrieb von Walzen mit glatter Oberfläche werden optische Systeme zur Wegmessung eingesetzt. Für Oberflächen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit nicht mit einem optischen System analysiert werden können, wird ein kapazitives Messsystem eingesetzt.

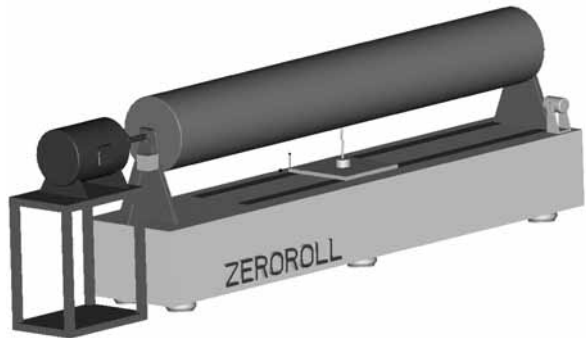


Abbildung 9: Versuchsstand, schematischer Aufbau

Im folgenden Beispiel wird das Ergebnis einer Walzenoptimierung dargestellt. Gegenstand ist eine Walze der Klasse 3, Walze mit Wirkgeometrie. Hier ist ein über die Arbeitsbreite konstantes Spaltmaß zur Wirkgeometrie von großer Bedeutung für die erreichbare Produktqualität. Die Walze hat eine Arbeitsbreite von 3600 mm und einen Durchmesser von 118 mm. Die Walze wird durch eine einfache Lagerung ohne Aktuatorik mit dem Anlagenfundament verbunden. Abbildung 10 zeigt das Schwingverhalten der nicht optimierten Walze (Variante A) bei einer Drehzahl von 1750 min^{-1} . Der maximal auftretende Schwingweg beträgt 0,5 mm. Die 1. Eigenfrequenz des Systems beträgt 34Hz. Die Walze wird bei $\omega_A=0,86 \cdot \omega_0$ betrieben.

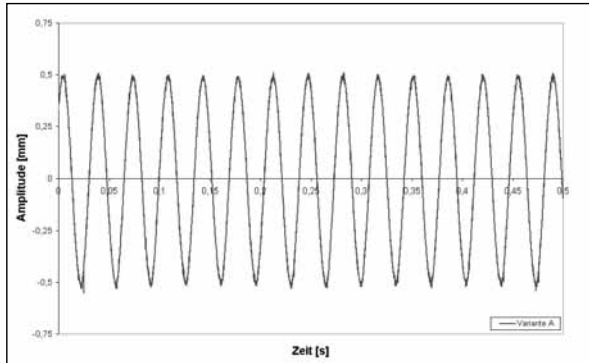


Abbildung 10: Schwingverhalten im Zeitbereich, Variante A

Abbildung 10 zeigt das Schwingverhalten der nicht optimierten Walze (Variante A) bei einer Drehzahl von 1750 min^{-1} . Der maximal auftretende Schwingweg beträgt 0,5 mm. Die 1. Eigenfrequenz des Systems beträgt 34Hz. Die Walze wird bei $\omega_A=0,86 \cdot \omega_0$ betrieben.

Zur belastungsgerechten Anpassung wurde der Wickelwinkel reduziert und ein Fasertyp mit höherer Steifigkeit eingesetzt (Variante B, Abbildung 11). Dies führt bei annähernd unveränderter Masse zu einem Anstieg des Biege-E-Moduls des Gesamtsystems. Die 1. Eigenfrequenz tritt nun bei 37Hz auf. Der Betriebspunkt liegt jetzt bei $\omega_B=0,78 \cdot \omega_0$. Diese Verschiebung führt zu einem reduzierten Einfluss der Resonanzphänomene. Der Verstärkungsfaktor ist stark reduziert. Im Betriebspunkt $n=1750 \text{ min}^{-1}$ liegt der maximal auftretende Schwingweg bei 0,05 mm.

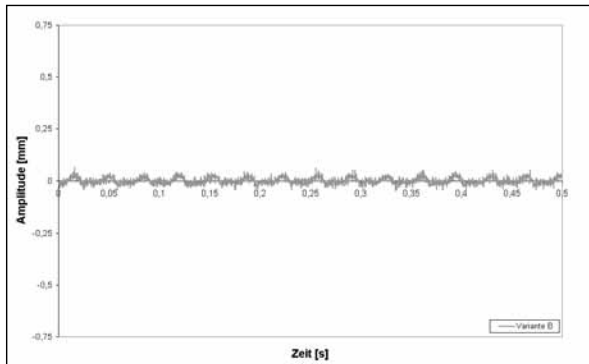


Abbildung 11: Schwingverhalten im Zeitbereich, Variante B

Danksagung

Teile dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen des Verbundprojekts “ZEROROLL –Arbeits- und Umlenkwalzen mit stark reduzierter Durchbiegung und aktiver Schwingungsunterdrückung für hohe Geschwindigkeiten und große Arbeitsbreiten“, das mit Mitteln des BMBF gefördert wird.

An dem Verbundprojekt sind die folgenden Partner beteiligt:

- ERAS GmbH, Göttingen
- FWT Wickeltechnik GmbH, Neunkirchen
- Spinnbau GmbH, Bremen, Konsortialführer
- Universität Bremen, Bremer Institut für Konstruktionstechnik

Literatur

- [1] Freund, H, Kautz, G, Müller, D.H., Wimmel, R: *Rahmenplan zum BMBF-Verbundprojekt ZEROROLL*, nicht veröffentlicht
- [2] Flemming, M, Ziegmann, G, Roth, S: *Faserverbundbauweise*, Springer Verlag 1995
- [3] Ulbrich, H: *Maschinendynamik*, Teubner Verlag 1996

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Dieter H. MÜLLER
Bremer Institut für Konstruktionstechnik
Universität Bremen
28359 Bremen
email: ml@biba.uni-bremen.de

Dipl.-Ing. M.Sc. Markus KOCHMANN
Bremer Institut für Konstruktionstechnik
Universität Bremen
28359 Bremen
email: kochmann@uni-bremen.de