5. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2007

am 20. und 21. September 2007
im Berghotel Bastei
in der Sächsischen Schweiz bei Dresden

Herausgegeben von

Ralph Stelzer
Technische Universität Dresden
Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD

Karl-Heinz Grote
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl Konstruktionstechnik

Jörg Feldhusen
RWTH Aachen
Lehrstuhl für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus

Frank Rieg
Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Klaus Brökel
Universität Rostock
Institut für Konstruktionstechnik

Dresden 2007

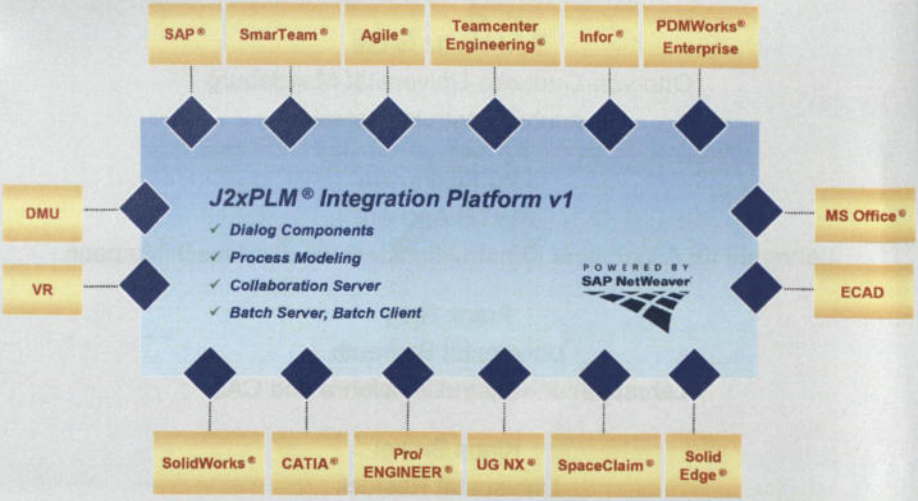
xPLM Solution

Mit xPLM Solution zum PLM Projekterfolg . . .

. . . unser Team berät und implementiert

- seit mehr als 23 Jahren
- in mehr als 1.000 PLM Projekten
- bei über 200 zufriedenen Kunden!

J2xPLM Integrationsplattform
CAD Integrationen für PLM, ERP und DMU



CAD zentrische Benutzerführung; individuell gestaltbare Benutzeroberflächen;
Skriptsprache für die flexible Definition kundenspezifischer Prozesse und Erweiterungen.
Web-Anbindung externer Entwicklungspartner; hohe Performance durch lokalen Arbeitsbereich

xPLM Solution GmbH, Helgolandstr. 9, D-01097 Dresden; xplm@xplm.com; www.xplm.com; Tel.: +49 (351) 82658-51; Fax: -88

Copyright © 2005-2007 xPLM Solution GmbH, Dresden. Alle Rechte vorbehalten. xPLM und J2xPLM sind Warenzeichen der xPLM Solution GmbH. Alle anderen Produkt- und Firmennamen sind Markenzeichen ihrer jeweiligen Eigentümer. Die Informationen dieser Anzeige sind unverbindlich und unterliegen dem Vorbehalt der jederzeitigen Änderung.

Vorwort

Das diesjährige 5. Gemeinsame Kolloquium Konstruktionstechnik auf der Bastei bei Dresden wird erstmals von fünf deutschen Universitäten getragen. Ich freue mich sehr, dass künftig mit Professor Jörg Feldhusen (Lehrstuhl und Institut für allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus) von der RWTH Aachen sowie Professor Frank Rieg (Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD) von der Universität Bayreuth zwei weitere renommierte Kollegen die Austragung und Organisation der Veranstaltungsreihe unterstützen werden.

Im Rahmen des diesjährigen Kolloquiums werden Werkzeuge und Methoden diskutiert, die die künftige Wettbewerbsfähigkeit deutscher Produkte unter den zunehmend verschärften Ansprüchen global aufgestellter Entwicklungs- und Absatzgebiete, der Sicherung der Nachhaltigkeit, der Reduktion von Kosten sowie der Verkürzung der Markteinführung sichern. Auch die zunehmende Integration von Mechanik-, Elektronik- und Softwarekomponenten erfordert neue Ansätze im Bereich der Modellierung sowie angepasste Prozesse innerhalb des Unternehmens wie auch über Unternehmensgrenzen hinaus. Die notwendige Verkürzung der Durchlaufzeiten bei gleichzeitig immer komplexeren Strukturen und zunehmenden Anforderungen an die Qualität verlangen neue Lösungen für die frühzeitige Analyse und Verifikation der Produkteigenschaften.

Das Kolloquium auf der Bastei bei Dresden bietet hier ein hervorragendes Forum für die Vorstellung und Diskussion neuer Ideen und Ansätze.

Der vorliegende Tagungsband fasst die Beiträge zusammen und gibt einen Überblick über die aktuellen Forschungen auf den genannten Gebieten.

Meinen Dank möchte ich an dieser Stelle meinen Professorenkollegen Grote, Brökel, Feldhusen sowie Rieg für deren Unterstützung aussprechen.

Auch meinen Mitarbeitern am Lehrstuhl, speziell Frau Heike Wieghardt sowie Frau Annett Kupka, danke ich für ihre Hilfe bei der Organisation des Kolloquiums.

Dresden, im August 2007

Ralph H. Stelzer

Entwicklungsmethodik, systematische Bearbeitung technischer Innovationen
H. Seifert, Bochum 1

Eine ganzheitliche Konstruktionsmethodik durch Vereinigung der Systemtheorie und der Dialektik
J. Feldhusen, Aachen; I. Schulz, Gerolzhofen 19

Prozessintegration eines integriertenCAD – VR – Arbeitsplatzes
R. Stelzer, W. Steger, Dresden 27

Optimierung der Produktentwicklung, hier am Beispiel von Kaltumformteilen
S. Jende, Peine 35

Heuristische Methoden für Ressourcengerechte Konstruktionsprozessplanung und Optimierung
T. Bercsey, T. Rick, Budapest 43

Strukturmechanische Untersuchungen zum Druckverhalten von Drucküberträgungsmedien in geschlossenen Stahlhülsen
E. Kloß, K. Brökel, Rostock 51

Bedeutung der Werkstoffwahl für die Konstruktion von explosionsgeschützten mechanischen Geräten
R. Träger, N. Schwarz, K.-H. Grote, F. Engelmann, Magdeburg
M. Beyer, Braunschweig 59

Algorithmenbasierte Produktentwicklung für integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung
M. Wäldele, A. Fügenschuh, H. Birkhofer, A. Martin, Darmstadt 73

Auslegungsmodell für komplexe Versagenskriterien im klassischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess
H. Schnegas, Wismar 83

Simulation and Visualisation of flexible Parts
R. Breining, S. Grimm, G. Goebels, Stuttgart 91

Eine integrierte Prozesskette in integralen Blechbauweisen
R. Anderl, Z. Wu, T. Rollmann, Darmstadt 105

Ein Ansatz zur Erhöhung der Stabilität der CAD-Modelle für die Verbesserung der Modell-Wiederverwendung in der Virtuellen Produktentwicklung
M. Abramovici, V. Meimann, Bochum 111

Analytische und experimentelle Verifikations-methoden anhand eines Wälzlagerkäfig-Simulationsmodells
T. Babbick, B. Sauer, Kaiserslautern 119

Bone slice recognition using two layer logsigmoid Artificial Neural Networks
S. Baksi, K. – H. Grote, Magdeburg 133

Digitale Prozesskette zur Erstellung individueller Implantate
St. Schreiber, Chr. Schöne, A.Figge, Dresden 143

Methodische Unterstützung der Systemintegration bei der Entwicklung von Mikrosystemen
R. Watty, H. Binz, Stuttgart 149

Unterstützung der kreativen Phasen im Produktentwicklungsprozess mit dem Elementmodell C&CM
A. Albers, Th. Alink, J. Oerding, Karlsruhe 159

Teilemanagement: Bedarf der Industrie -Anforderungen an die studentische Ausbildung
M. Curschmann; E. Leidich, W. Grahl, Chemnitz 169

Ableitung einer Produktvarianteaus einer Referenzvariante
J. Feldhusen, E. Nurcahya, Aachen 179

Optimierungspotenzial von RP gefertigten Urmodellen
D. Sohn, K.-H. Grote, F. Engelmann, Magdeburg 189

Kooperatives zweihändiges Interaktionsschema für virtuelle Bedienelemente
T. N. Doan, W. Steger, R. Stelzer, Dresden 199

Integrierte Finite Element Analysen in CAD-Systemen – ein Vergleich
A. Troll, B. Roith, F. Rieg, Bayreuth 207

Simulationsstudie zur Erhöhung der Modellabbildungsgenauigkeit durch Variation der Integrationsordnung in der Finiten Elemente Analyse
M. Zimmermann, B. Roith, A. Troll, F. Rieg, Bayreuth 219

Simulation der Einbausituation des Nancy-Nagels Richtlinien zur Vorbiegung
H.-P. Prüfer, Bochum 229

Leichtbau durch Einsatz von Topologieoptimierung
A. Dörnhöfer, F. Rieg, H.-R. Kröninger, Bayreuth 239

Simulationswerkzeuge für die Optimierung von Beveloidverzahnungen
H. Alxneit, H. Binz, Stuttgart 249

Wissensbasierte Ansätze in der virtuellenEntwicklung mechatronischer Produkte
M. Marinov, H. Krappe, M. Plößnig, A. Mahl, J. Ovtcharova, Karlsruhe 261

Autorenverzeichnis 275

Entwicklungsmethodik, systematische Bearbeitung technischer Innovationen

Hans Seifert
Ruhr-Universität-Bochum

Kurzfassung

Im Mittelpunkt des Aufsatzes steht eine erweiterte Fassung der Entwicklungs-methodik von Professor Rodenacker [1]. Die Begründung dazu liefert die Erfahrung, die bei der Bearbeitung von Innovationsproblemen, wie sie bei der Weiterentwicklung von technischen Problemen auftreten, gewonnen wurden.

Zunächst werden die Gedankengänge wiederholt, die zu einer verbesserten Struktur der Entwicklungsmethodik geführt haben. Die Struktur wird erklärt und die Handhabung der angepassten Methodik an einem Beispiel der Innovation demonstriert.

Zum zentralen Bestand der Rodenacker-Methode gehören die Begriffe „logisches und physikalisches Modell" eines konkreten technischen Produktes. Beide Begriffe sind abstrakt und werden im Analyseabschnitt einer Weiterentwicklung – nur diese Art der Produktentwicklung wird näher betrachtet – durch Abstraktion vom Konkreten abgeleitet und in ihrem synthetischen Teil durch Determination ergänzt oder erneuert.

Unsere Erfahrung hat gezeigt, dass mit den Begriffen logisches und physikalisches Modell getrennt zu arbeiten, aufwendig ist. Dazu kommt, dass der Begriff physikalisches Modell für den Entwicklungsingenieur nicht präzise genug definiert ist. Leichter fällt die Problembearbeitung, wenn man das physikalische Modell als einzigen dominierenden Begriff einführt und die begrifflichen Anteile der Logik als seine zusätzlichen Merkmale betrachtet.

Die eigentliche Strukturänderung der Methodik wird durch drei Wortelemente verursacht, die bei Rodenacker noch nicht auftauchen.

Diese sind:

1. Das Wort „Begriff" und die Bedeutung seiner „Definition" bei dem widerspruchsfreien Aufbau der Gedankengänge.
2. Der „hypothetische Schluss", der das hypothetische Urteil von Rodenacker ersetzt und
3. der Schlüsselbegriff „Teilidentität", der das dominierende Merkmal des hypothetischen Schlusses ist.

Die drei Wortelemente werden erläutert. Abschließend wird die Handhabung der Methodik an einem Beispiel der Innovation durchgängig gezeigt.

1. Einleitung

In diesem Aufsatz geht es um den Begriff „Entwicklungsmethodik" oder besser, um das Ergebnis einer Überarbeitung der Methodik, wie sie von Professor Rodenacker veröffentlicht wurde, und ihre Anwendung. Die Bearbeitung wurde nach Abschluss eines Forschungsvor-

habens [2] aufgenommen, nachdem feststand, dass seine Pro-blemlösung nur unvollkommen von der Methodenseite unterstützt worden war. Trotz dieses Nachteils ist das Vorhaben mit Erfolg abgeschlossen worden.

Zunächst wird die erweiterte Struktur der Methodik erklärt und die Handhabung der angepassten Methodik an einem einfachen Beispiel demonstriert. Titel des Beispiels ist „die Optimierung eines einfachen Kofferträgersystem". Dabei geht es weniger um den Inhalt der Entwicklungsaufgabe, als um eine systematische Einführung in die Methode, die bei diesem Beispiel nicht besonders schwierig ist. Grundsätzlich scheitert die Methodik nicht an dem Schwierigkeitsgrad des Problemfalls, im Gegenteil: Ihre Hilfeleistung für den Entwicklungsingenieur wird dort besonders deutlich.

Professor Rodenacker war lange Jahre an der TH München verantwortlich für das Lehr- und Forschungsgebiet der Konstruktionstechnik. Ihm verdankt der Autor, dass er sich mit methodischen Aspekten der Konstruktion und Entwicklung neuer technischer Produkte ernsthaft beschäftigt hat. Zum zentralen Bestand der Rodenacker-Methode gehören die Begriffe „logisches und physikalisches Modell" eines konkreten technischen Produkts. Beide Begriffe sind abstrakt und werden im Analyseabschnitt einer Weiterentwicklung durch Abstraktion vom Konkreten abgeleitet und im synthetischen Teil des Entwicklungsprozesses durch Determination ergänzt oder erneuert. Basis des logischen Modells ist das hypothetische Urteil der Logik: „Wenn A dann B" oder anders ausgedrückt: (man könne mit der Hypothese A die Konsequenz B gewinnen).

Nach Rodenacker liefert das physikalische Modell die Begründung des logischen Modells aufgrund des physikalischen Geschehens, das sich in Wirkräumen und auf Wirkflächen des technischen Gegenstands abspielt.

Unsere Erfahrung hat gezeigt, dass mit den Begriffen „logisches und physikalisches Modell" getrennt zu arbeiten, aufwändig und nicht in allen Teilen logisch ist. Dazu kommt, dass der Begriff „physikalisches Modell" für den Entwicklungsingenieur nicht präzise genug definiert ist.

Leichter fällt die Problembearbeitung eines technischen Entwicklungsprozesses, wenn man das „physikalische Modell" in der Anfangsphase der methodischen Bearbeitung als einzigen dominierenden Begriff einführt. Die Bereitstellung dieses Modells ist das größte Problem, das der Entwicklungsingenieur lösen muss.

Allgemein gilt die These, dass die Ursache technischer Funktionen von physikalischer bzw. naturwissenschaftlicher Art ist. Die Wirkung, die physikalisch/chemisches Geschehen als Ursache, z. B. an der Antriebswelle eines Verbrennungsmotors in Form von abnehmbarer mechanischer Energie erzeugt, nennt man auch die Funktion des Motors. „Funktion" bedeutet also die Aufgabenstellung, die ein technisches Produkt zu erfüllen hat. Das ist der Grund, weshalb technische Produkte in Schritten entwickelt, konstruiert und gebaut werden.

2. Kernpunkte der angepassten Entwicklungsmethodik

Im Rahmen dieser Veröffentlichung geht es nur um die funktionale Weiterentwicklung bereits konkret gegebener technischer Gegenstände und nicht um die Entwicklung von völlig Neuem. Die Analyse des aktuellen physikalischen Geschehens dieser Gegenstände steht dabei

an erster Stelle. Zur methodischen Bearbeitung der Analyse bringt die Logik zwei Wortelemente ein, die bei Rodenacker noch nicht auftauchen und die die Struktur des methodischen Vorgehens deutlich verändern. Das eine Element ist das Wort „Begriff" bzw. die Bedeutung seiner „Definition" für die inhaltliche und logische Beschreibung des Entwicklungsablaufes. Das andere Element ist der „hypothetische Schluss", der das hypothetische Urteil von Rodenacker ersetzt. Ein Schlüsselbegriff des logischen Schlussverfahrens ist die „Teilidentität", die dem Entwicklungsingenieur hilft, den Sinn seines Tuns deutlich zu machen.

Zu beiden Wörtern nur so viel:
Für den Benutzer irgendeines Begriffes müssen seine Bedeutung und sein Inhalt unbedingt geklärt, soll heißen, „widerspruchsfrei" sein. Sonst wird er mit seiner Rede, die er in der Öffentlichkeit halten will oder mit einer oberflächlich formulierten Argumentation nicht bestehen können. Bei der technischen Entwicklungsarbeit führen Begriffe, die nicht ausreichend durch Definition geklärt sind, zu Fehlleistungen.

Der Begriff eines Gegenstands, ob konkret oder abstrakt, wird durch Merkmale definiert. Die Anzahl der Merkmale, die ein Benutzer zum Verständnis des benutzten Begriffs benötigt, ist individuell verschieden. Je nach Wissensstand und Nähe zu seinem Inhalt ist die Anzahl der definierenden Merkmale mal größer, mal kleiner. Daraus ergibt sich ein differenzierterer, oder ein allgemeinerer Begriff. Auf die Person, die den Begriff definiert, kommt es an.

2.1. Definition des Begriffs „physikalisches Modell"

Für den Entwicklungsingenieur, der sich um die Analyse und in Fortsetzung um die Synthese kümmern soll, ist eine zutreffende und präzise Definition des Begriffes „physikalisches Modell" eine notwendige Bedingung; denn der Erfolg, der von seinen Überlegungen erwartet wird, hängt mit davon ab, wie er diesen Begriff verstehen will. Das physikalische Modell ist nicht konkret, sondern nur abstrakt zu begreifen. Dazu kommt, dass das Abstraktum nicht von vornherein zur Verfügung steht, sondern erst durch Denkoperationen nach logischen Gesichtspunkten gewonnen werden muss. Dann erst kann man von einer abstrakten Wirklichkeit sprechen.
Die vorläufige Definition eines physikalischen Modells könnte durch folgende Merkmale festgelegt werden: Das physikalische Modell ist im Wesentlichen durch physikalisches Geschehen bestimmt. Das Geschehen läuft in Wirkräumen oder auf Wirkflächen technischer Produkte ab. Merkmale des physikalischen Geschehens sind physikalische Zustandsgrößen, deren Zusammenwirken physikalischen Gesetzen folgt. Ihre Verläufe an einem Ort über der Zeit werden durch Messung (oder durch Berechnung) sichtbar.
Das ist eine erste Definition des physikalischen Modells, die bestimmten Gruppen von Personen, die außerhalb der direkten Entwicklungsverantwortung stehen, den Begriff ausreichend erklärt. Der Entwicklungsingenieur jedoch, zunächst verantwortlicher Bearbeiter der Analyse eines aktuellen physikalischen Geschehens, spürt, dass die genannte allgemeine Definition nicht ausreicht, um den Begriff „physikalisches Modell" für ihn umfassend begreiflich zu machen. Er sucht gedanklich nach einer Erweiterung: Das Merkmal, das die Definition des allgemeinen Begriffs „physikalisches Modell" für den Entwicklungsingenieur entschei-

dend erweitert, ist „Algorithmus eines Berechnungsverfahrens". Mit dem Verfahren ist es möglich, eine theoretisch begründete Analyse des physikalischen Geschehens zu erarbeiten. Sie gibt Auskunft über den Ablauf der physikalischen Zustandsgrößen in den Wirkräumen und ist abhängig von Ort (und Zeit). Ihre Vorlage ist Vorraussetzung dafür, zum einen die Qualität des Modells zu bewerten und zum anderen eventuell notwendige Schlüsse zu ziehen, um das Modell und damit die Funktion des Produkts zu verbessern. Das ist einer der Kernfragen, die im Rahmen einer Entwicklungsarbeit zu beantworten sind.
Das Wort „Algorithmus" hat den Status eines Begriffs. Eine Vorstellung über seine Definition liegt beim Entwicklungsingenieur in den meisten Fällen nur vage vor. Diese Vorstellung präzise zu formulieren ist ein Problem, das den Entwicklungsingenieur persönlich angeht. Er kann seine Definition nicht als „Fertigteil" irgendwo abrufen. Er muss die Merkmale des Begriffs „Algorithmus" selbst durch eigene Denktätigkeit erarbeiten oder unter seiner Kontrolle durch Dritte durchführen lassen. Letzteres ist eine Frage der Organisation durch das Management und bleibt hier unberührt.
Zur Unterstützung des Ingenieurs steht das zweite logische Wortelement zur Verfügung, das jetzt abzurufen ist. Es handelt sich um das „logische Schlussverfahren", das dem Entwicklungsingenieur bei seiner Suche, den richtigen Lösungsweg zu finden, behilflich sein soll. Es geht dabei nicht um eine automatische Lösungsfindung, sondern um eine logisch begründete Ordnung, die die Reihenfolge der durchzuführenden Denkschritte betrifft.

2.2. Definition der Begriffe „logisches Schlussverfahren und Teilidentität [3]"

An dieser Stelle soll nur Einführendes zum logischen Schluss gesagt werden. Das dann folgende Beispiel zeigt die praktische Anwendung des Schlussverfahrens im Ganzen. Zusammen mit dem Begriff „logisches Schlussverfahren" tritt, wie bereits erwähnt, noch der Begriff „Teilidentität" auf. Seine Bedeutung wird verstanden, wenn es um die Beantwortung der Frage geht, was mit „logisch" im Rahmen unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeit gemeint ist.
Das logische Schlussverfahren sei zunächst anhand eines einfachen Standardbeispiels eingeführt. Das ist an sich didaktisch nicht sehr geschickt, weil der eigentliche Grund seiner Anwendung, als „Problemlöser" im Forschungs- und Entwicklungsbereich eingesetzt zu werden, zunächst nicht einsichtig ist.
Am Anfang steht die Definition des logischen Schlusses: Der hypothetische Schluss ist eine Begriffsfolge, die sich in einen „Wenn-Satz" und einen „Dann-Satz" aufteilt. Im „Wenn-Satz" stehen logische Urteile als Prämissen, im „Dann-Satz" folgt der Schluss oder die Konsequenz, die aus den Prämissen nach einer noch nicht genannten logischen Regel gezogen wird. Das inhaltliche Verstehen der Regel ist entscheidend darüber, ob der Benutzer, also hier der Entwicklungsingenieur, das logische Schlussverfahren als Lösungsprinzip, z. B. zum Auffinden der Merkmale eines Berechnungsalgorithmus, begreift.
Zur näheren Erläuterung des Vorstehenden sei folgender „Wenn-Dann-Satz" angeführt:

Wenn Menschen sterblich sind und Athener Menschen sind und Sokrates ein Athener ist, dann folgt aus diesen drei kategorischen Urteilen die Konsequenz: „Sokrates ist sterblich" (Abb.1).

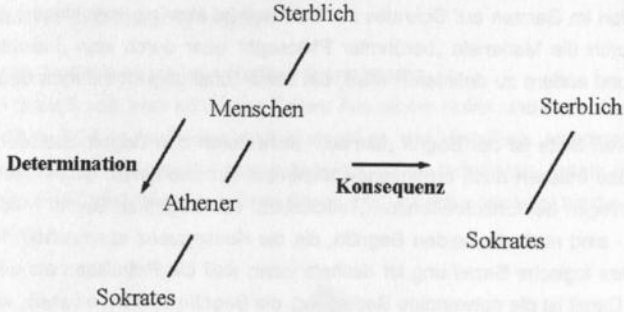


Abb. 1: Symbolische Darstellung des logischen Schlussverfahrens

Die Prämissen lauten also:

- Menschen sind sterblich.
- Athener sind Menschen.
- Sokrates ist ein Athener.

Rein formal gewinnt man daraus die Konsequenz: „Sokrates ist sterblich", wenn man das logische Subjekt „Sokrates" der letzten Prämisse mit dem Attribut „sterblich" der ersten Prämisse verbindet. Alle anderen Begriffe in den Urteilen tauchen sowohl als Subjekt als auch als Objekt bzw. Attribut auf und scheiden für den Inhalt der Konsequenz aus. Das Verfahren hat einen neuen Sachverhalt aufgedeckt, der in der Aufzählung der Prämissen als Urteil (Konsequenz) nicht unmittelbar notiert war. Damit kommt man zum eigentlichen, noch nicht geklärten Kern des Schlussverfahrens. Er ist mit der Frage verbunden, welche Bedingung von den Prämissen oder ihren Begriffen zu erfüllen ist, damit sie als solche in den „Wenn-Satz" des Schlusses eintreten können?

Am besten beantworten lässt sich diese Frage am oben besprochenen Beispiel. Die konkrete Aussage „Athener sind Menschen" ist eine wahre Prämisse und erfüllt die geforderte Bedingung, weil beide Begriffe „Athener" und „Menschen" (und auch die Begriffe der beiden anderen Urteile!) logisch durch „Teilidentität" verbunden sind. Was bedeutet der Begriff „Teilidentität"? Volle Identität besitzen Begriffe nur mit sich selbst. Die beiden Begriffe „Athener" und „Menschen" sind deshalb teilidentisch, weil die definierenden Merkmale des Begriffes „Menschen" vollständig von dem Begriff „Athener" übernommen werden (sonst wären Athener keine Menschen!). Aber mit diesen Merkmalen allein wären „die Athener" als solche nicht definiert. Es müssen noch zusätzlich die Merkmale in den Inhalt des Begriffes aufgenommen werden, die nur den Athenern und nicht den Menschen im Allgemeinen zukommen. Zum Beispiel, dass sie eine besonders tapfere Gruppe von Griechen sind und dass berühmte Philosophen aus ihnen hervorgegangen sind. „Menschen", als Allgemeinbegriff definiert,

können nicht als tapfere Griechen gelten. Die Eigenschaft der Tapferkeit im hier verstandenen Sinn betrifft nur eine Klasse von Menschen, eben nur die Athener.
Das gleiche gilt für alle anderen Prämissen, z. B.: „Sokrates ist Athener". Die Merkmale des Atheners treffen im Ganzen auf Sokrates zu. Sokrates ist aber ein individueller Begriff, der ergänzend durch die Merkmale „berühmter Philosoph" oder durch sein „individuelles Geburtsdatum" und andere zu definieren wäre, um seine Eindeutigkeit als Individuum herauszustellen.
Auf der anderen Seite ist der Begriff „Mensch" nicht durch den Begriff „sterblich" allein zu definieren, dazu müssen noch ergänzende Merkmale hinzukommen. Diese sind hier nicht angegeben. Wegen der fortschreitenden „Teilidentität" von Begriff zu Begriff - in Abb. 1 gut zu verfolgen - sind auch die beiden Begriffe, die die Konsequenz ausmachen, teilidentisch verbunden. Ihre logische Beziehung ist deshalb wahr, weil die Prämissen als wahr vorausgesetzt sind. Damit ist die notwendige Bedingung, die Begriffe erfüllen müssen, wenn sie als Merkmal eines Schlusses gelten sollen, genannt: Es ist ihre Teilidentität. Sie ist ein Schlüsselbegriff für den Entwicklungsingenieur. Bei seinen synthetischen Überlegungen, wachsen die Begriffe einer Begriffsfolge inhaltlich vom Allgemeinen zum Besonderen: Eine Mindestbedingung, die diese Begriffe erfüllen müssen, ist die „Teilidentität" (siehe praktisches Beispiel ab Seite 8).
Worin liegt nun das Problem, das angeblich mit dem Schlussverfahren zu lösen war? Die Aussage, dass Sokrates sterblich ist, ist so selbstverständlich und evident, dass der Aufwand eines Schlusses zu ihrem Beweis unnötig und sogar verfehlt wäre, weil seine Anwendung zu Missverständnissen führen kann. Das Wissen über den Zusammenhang zwischen Sokrates und Sterblichkeit ist allgemein so bekannt, dass ein kategorisches Urteil mit der Aussage „Sokrates ist sterblich" zu seiner Klärung völlig genügt. Kategorisch bedeutet: Diese Aussage gilt „ohne wenn und aber". Kein Mensch kommt auf die Idee, den Beweis einer solchen Behauptung in Form eines Schlusses zu fordern. Anders sieht die Situation aus, wenn die Aussage eines Ingenieurs lauten würde: „Die Zellspannung einer Brennstoffzelle ist berechenbar". Nur eine verschwindende Zahl von Ingenieuren könnte auf einen Beweis dieser „Behauptung" verzichten, wenn es darum ginge, ihren Inhalt begreiflich zu machen [4].
Für den Entwicklungsingenieur hat der Begriff „Behauptung" eine wegweisende Bedeutung. Im Zusammenhang mit diesem Begriff sieht er eine Anwendung des logischen Schlussverfahrens zur Lösung seiner persönlichen Probleme. Er geht dabei nicht von einer deduktiven Denkweise aus, die im Alltag üblich ist, sondern von einer abduktiven. Das abduktive Denken zum Lösen einer Problemstellung beginnt mit einer vorweggenommenen Behauptung (siehe Abb. 5!), und es sind die Prämissen ausfindig zu machen, die sie bestätigen. Die Prämissen, als direktes Wissen, sind nicht von vornherein dem Entwicklungsingenieur bekannt. Der Ent-wicklungsingenieur wird das „Schlussverfahren" benutzen, um die notwendigen Prämissen leichter entdecken zu können.

3. Praktische Anwendung der erweiterten Entwicklungsmethodik

An dem bereits genannten Beispiel soll die abduktive Anwendung des Schlussverfahrens im abschließenden Teil dieses Aufsatzes dargestellt werden. Wegen seines Umfanges ist leider nur eine verkürzte Beschreibung möglich.

3.1. Beispiel: Optimierung eines Kofferträgersystems

Das System besteht aus zwei konkreten Teilen: Aus einem Koffer und einer Person, die den Koffer trägt (Abb. 2). Ziel der Weiterentwicklung ist es, das Verhältnis „Handkraft F_H zur Gewichtskraft F_G des Koffers" von 1:1 mindestens auf 1:3 zu reduzieren. Ersatz der Handkraft F_H durch andere Aktionskräfte wie pneumatische, hydraulische oder elektrische Kräfte bleibt ausgeschlossen.

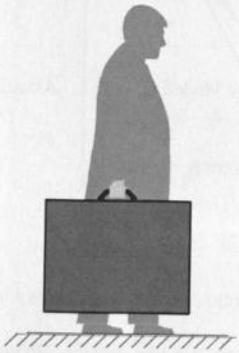


Abb. 2: Kofferträgersystem

Das Beispiel hat die gleiche einfache Qualität wie der Beweis des Urteils, dass Sokrates sterblich sei. Ein Ingenieur mit einem soliden Grundlagenwissen würde ohne Rückgriff auf kategorische Urteile ein verbessertes Kofferträgersystem sofort beschreiben können, das darüber hinaus noch die Forderung erfüllt, ein Minimum an Bauaufwand zu haben. Die Qualitätsfrage ist hier von untergeordneter Bedeutung. Es geht einzig und allein um eine verständliche Einführung in die analytische und synthetische Tätigkeit eines Entwicklungsingenieurs, die durch eine angepasste Entwicklungsmethodik unterstützt wird.

3.1.1 Analyse

Wir beginnen mit Abb. 3, das den chronologischen Ablauf der durchzuführenden Entwicklungsschritte für das Beispiel symbolisiert. Die durchzuführenden Arbeitsschritte sind durch Begriffe ohne Angabe ihrer Definitionen benannt. Trotz ihrer fehlenden Definitionen ergibt sich eine erste Orientierung, wie die Problemstellungen, die mit den Begriffen verbunden sind, zu bearbeiten sind. Ausgehend von dem gegenständlichen Abb. des Kofferträgersystems stellt die Analyse die Ursache fest, die die Funktion „Koffertragen" bewirkt. Die Ursache wird durch das „physikalische Modell A" beschrieben. Die Synthese baut auf dem Ergebnis

der Analyse auf und versucht die Funktion des Systems durch Erweiterung des „physikalischen Modells A" zu verbessern. Zunächst geht es um die Analyse. Die Synthese bleibt dabei außerhalb der Überlegung.

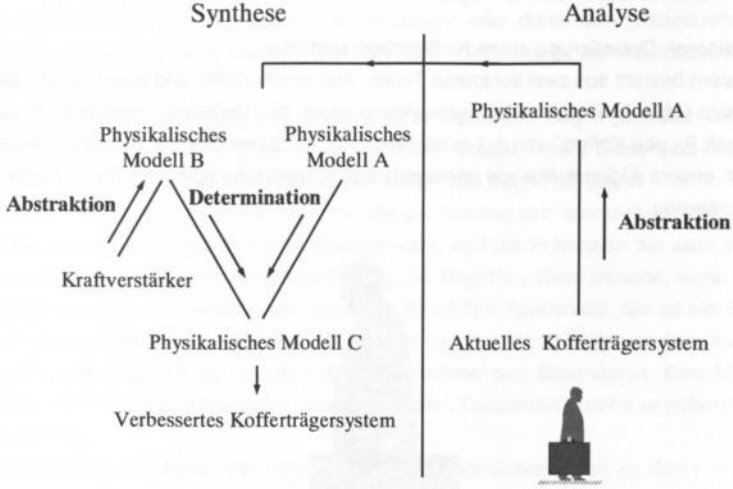


Abb. 3: Chronologische Arbeitsschritte des Entwicklungsablaufs

Der Entwicklungsingenieur entnimmt aus der rechten Hälfte der Abb. 3 folgendes logische Urteil, dem ein abstrakter Gedankengang vorausgegangen ist:

Das aktuelle Kofferträgersystem (konkret) hat Teil an den Definitionsmerkmalen des Begriffs „physikalisches Modell A" (abstrakt).

Abb. 4 stellt die Symbolik dieses Urteils dar. Dieser Satz gilt nur, wenn beide Begriffe durch Teilidentität verbunden sind. Das ist vorerst nicht zu entscheiden, da die Definitionsmerkmale des Modells A nicht bekannt sind. Es ist also die erste Aufgabe des Entwicklungsingenieurs, diese Merkmale festzustellen. Er nimmt einen neuen, jetzt determinierenden Gedankengang auf, der durch das logische Schlussverfahren unterstützt wird. Die vorweggenommene Behauptung lautet:

Es besteht ein logischer Zusammenhang zwischen dem „physikalischen Modell A" und einem ebenen „Kräftesystem der Statik" mit n-Kräften" (Abb. 5).

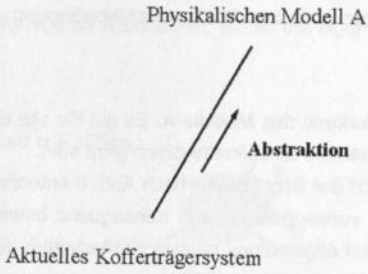


Abb. 4: Zwei Begriffe durch Abstraktion logisch verknüpft

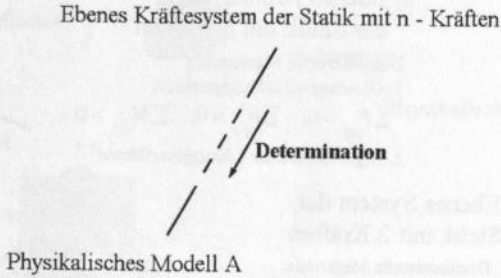


Abb. 5: Zwei Begriffe sind durch Determination logisch zu verknüpfen

Der Begriff „Statik" weist darauf hin, dass zu dem Trägersystem ruhende Kräfte gehören müssen, die sich im Gleichgewicht befinden.
Wie lauten die Prämissen, die diese Behauptung unterstützen? Zunächst ist die lückenhafte Begriffsfolge der Abb. 5 durch Begriffe zu ergänzen, die untereinander teilidentisch sein müssen. Durch Determination werden sie gefunden. Wegen ihrer Teilidentität sind sie gleichzeitig die definierten Merkmale des Begriffes „physikalischen Modell A". Abb. 6, durch Abb. 7 ergänzt, zeigt die vollständige Begriffsfolge. Die Anschaulichkeit wird durch die Skizzen erhöht, die jedem Begriff beigefügt sind. Sie ersetzen die eigentlich in Worte zu fassenden Definitionsmerkmale der Begriffe durch ihre Abb.liche Darstellung. Jedes einzelne Abb. erklärt, was mit ihm gemeint ist. Allerdings werden die Merkmale, die der Erkenntnis besonders dienlich sind, besonders herausgestellt. Dazu gehören die „Gleichgewichtsbedingungen der Statik" und die „Algorithmen" der möglichen Lösungsverfahren dieser Gleichungen. Eine erfolgreiche Problembearbeitung erfordert eine sichere Beherrschung dieser Algorithmen. Abb. 6a und 6b sind reine Begriffe der Physik. Besondere Angaben über den Wirkraum fehlen noch. Die Definitionsmerkmale von 6a und 6b sind, was leicht einzusehen ist, durch Determination auch dem Abb. 6c, also dem „physikalisches Modell A", zugeordnet. Daraus folgt die wichtige Erkenntnis, dass das „physikalische Modell A" ein ebenes System der Statik mit zwei Kräften ist. Seine Besonderheit ist durch die Merkmale „Wirkraum Koffer" (mit F_G im Schwerpunkt) und „Wirkfläche Handgriff" (mit F_H) bestimmt. Beide Merkmale und ihre lokale

Situation ergeben zusammen mit der Gleichgewichtsbedingung $\sum F_{iy} = 0$, das Kräfteverhältnis $\frac{F_H}{F_G} = 1$.

Es ist das markanteste Merkmal des Modells A. Es gilt für alle denkbaren äußeren Kräftepaare F_H und F_G, nur müssen die Einzelkräfte gleich groß sein.

Mit den Prämissen, die jetzt der Begriffsfolge nach Abb. 6 entnommen werden können, lässt sich auch rein formal die vorweggenommene Konsequenz beweisen, dass das „physikalische Modell A" sich wie ein allgemeines ebenes Kräftesystem der Statik mit n-Kräften verhält. Es ist im Gleichgewicht unter seinen Kräften.

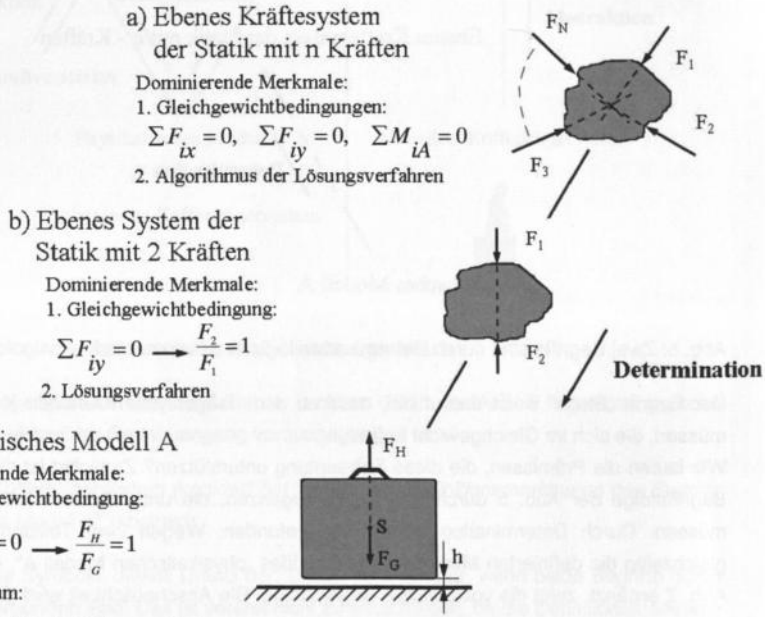


Abb. 6: Definition des physikalischen Modells A

Die Prämissen lauten (Abb. 6 und 7):

- Das ebene Kräftesystem der Statik mit zwei Kräften lässt sich aus dem ebenen Kräftesystem der Statik mit n-Kräften herleiten.
- Das physikalische Modell A ist ein ebenes Kräftesystem mit zwei Kräften, wobei die Besonderheit des Modells A die Kräfte F_G und F_H ausmachen. Sie genügen der Gleichgewichtsbedingung $\sum F_{iy} = 0$. Die Lösung dieser Gleichung ergibt das Kräfte-

verhältnis $\frac{F_H}{F_G} = 1$. F_H ist eine Aktionskraft, sie ist die eigentliche Ursache der Funktion „Koffertragen".

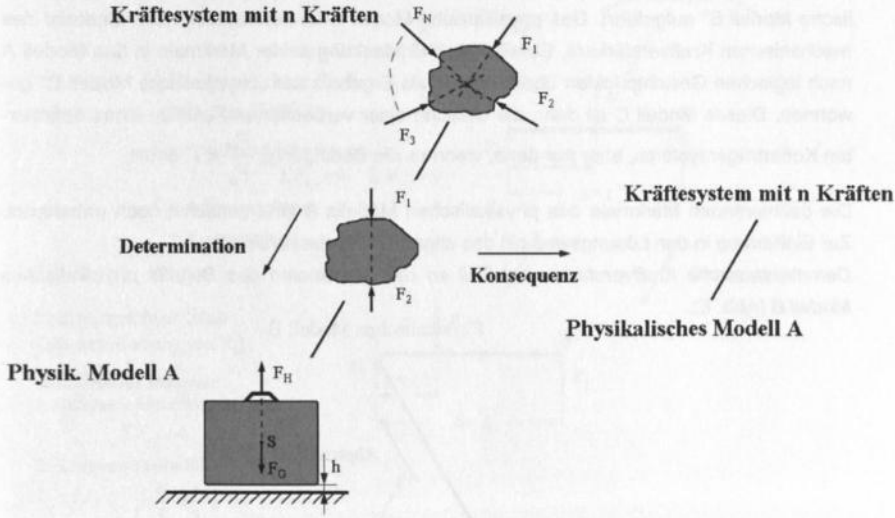


Abb. 7: Bestätigung der vorweggenommenen Konsequenz

Aus beiden Prämissen lässt sich formal nach bekanntem Muster die vorweggenommene Konsequenz bestätigen. Wegen des logischen Urteils nach Abb. 4 gilt auch die erweiterte Konsequenz, dass das Kofferträgersystem im Ganzen ebenfalls in einem logischen Zusammenhang mit dem ebenen Kräftesystem der Statik von n-Kräften steht. Dazu ist nur der Begriff „Kofferträgersystem" an den Begriff „physikalisches Modell A" der Abb. 7 gedanklich anzuhängen.

Damit ist die Analyse des Kofferträgersystems abgeschlossen und gleichzeitig die Basis gegeben, mit einem synthetischen Gedankengang zu beginnen, der sich auf eine mögliche Verbesserung der Funktion des Kofferträgersystems bezieht.

3.1.2 Synthese

Wir treten in die Synthese des verbesserten Kofferträgersystems ein. Die Analyse führte zu dem Ergebnis, dass das Kräfteverhältnis der angreifenden Kräfte $\frac{F_H}{F_G} = 1$ beträgt. Daraus ist aus Gründen der Statik zu schließen, dass mit zwei Kräften allein, kein Verhältnis $\frac{F_H}{F_G} < 1$ zu verwirklichen ist. Wenn diese Bedingung von einem verbesserten Trägersystem erfüllt werden soll, muss mindestens eine dritte Kraft in das System aufgenommen werden. Dazu ist zusätzlich ein mechanischer Kraftverstärker notwendig. Seine Entwicklung und Integration in

das physikalische Modell A ist die eigentliche synthetische Aufgabe des Entwicklungsingenieurs.

Zum besseren Verständnis betrachten wir noch einmal Abb. 3. In der Spalte der Synthese sind in der oberen Zeile der Begriff „physikalisches Modell A" und parallel dazu das „physikalische Modell B" aufgeführt. Das physikalische Modell B ist kennzeichnendes Merkmal des mechanischen Kraftverstärkers. Es wird nach Entdeckung seiner Merkmale in das Modell A nach logischen Gesichtpunkten überführt und als Ergebnis das „physikalische Modell C" gewonnen. Dieses Modell C ist dann die Ursache einer verbesserten Funktion eines optimierten Kofferträgersystems, aber nur dann, wenn es die Bedingung, $\frac{F_H}{F_G} < 1$, erfüllt.

Die definierenden Merkmale des physikalischen Modells B sind zunächst noch unbekannt. Zur Einführung in den Lösungsweg gilt das allgemeine logische Urteil:

Der mechanische Kraftverstärker hat Teil an den Merkmalen des Begriffs physikalisches Modell B (Abb. 8).

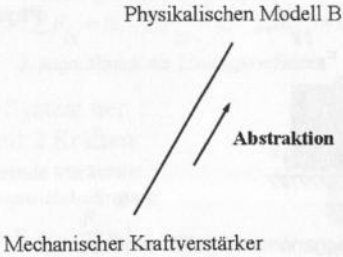


Abb. 8: Zwei Begriffe durch Abstraktion logisch verknüpft

Im nächsten Schritt werden mit Hilfe des Schluverfahrens die definierenden Merkmale des physikalischen Modell B gedanklich erarbeitet. Ausgangspunkt ist die Behauptung:

Das physikalische Modell B beruht auf einem Kräftesystem der Statik, das aus drei Kräften besteht (Abb. 9).

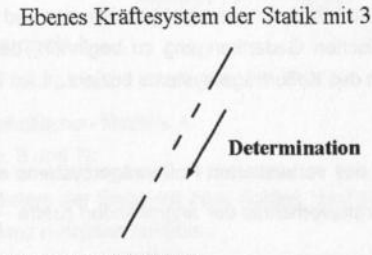


Abb. 9: Zwei Begriffe sind durch Determination logisch zu verknüpfen

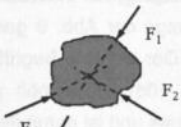
a) Ebenes Kräftesystem der Statik mit 3 Kräften

Dominierende Merkmale:

1. Gleichgewichtbedingungen:

$$\Sigma F_{ix} = 0, \quad \Sigma F_{iy} = 0, \quad \Sigma M_{iA} = 0$$

2. Algorithmus der Lösungsverfahren



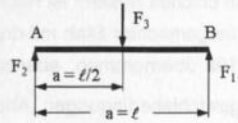
b) Freigemachter Stab mit drei Kräften

1. Gleichgewichtbedingung:

$$\Sigma F_{iy} = 0, \quad \Sigma M_{iA} = 0$$

2. Lösungsverfahren

3. Kraftverhältnis $\frac{F_1}{F_3} = \frac{1}{2} > \frac{1}{3}$



Determination

c) Freigemachter Stab (Ortsverschiebung von F_3)

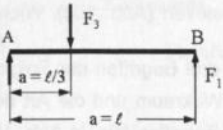
Dominierende Merkmale:

1. Gleichgewichtbedingung:

$$\Sigma F_{iy} = 0, \quad \Sigma M_{iA} = 0$$

2. Kraftverhältnis erfüllt:

$$\frac{F_1}{F_3} = \frac{1}{3}$$



d) Physikalisches Modell B eines mech. Kraftverstärkers

Dominierende Merkmale:

1. Gleichgewichtbedingung: $\Sigma F_{iy} = 0, \quad \Sigma M_{iA} = 0$

2. Äußere Kräfte: F_G und F_H

3. Auflagerkraft bei A: F_2

4. Wirkraum Balken

Zielsetzung erfüllt: $\frac{F_H}{F_G} = \frac{1}{3}$

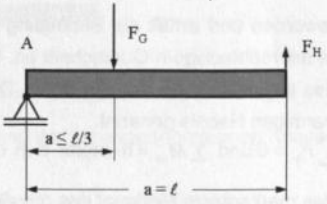


Abb. 10: Definition des physikalischen Modells B durch Determination

Zur Herleitung der Prämissen der vorweggenommenen Behauptung muss die Lücke der Begriffsfolge der Abb. 9 geschlossen werden. Abb. 10 zeigt das Ergebnis des Gedankenganges. Der unterste Begriff der Folge ist der Begriff des gesuchten physikalischen Modells B (Abb. 10d). Er enthält alle Merkmale der darüber stehenden Begriffe plus die des Wirkraumes und ist damit definiert

Der Gedankengang beginnt mit dem obersten Begriff „ebenes Kräftesystem der Statik mit drei Kräften". Ein solches System ist nach einem ersten Determinationsschritt (auf Teilidentität achten!) ein freigemachter Stab mit drei Kräften (Abb. 10b). Die dominierenden Merkmale sind von Abb. 10a übernommen, ebenso die Algorithmen des Lösungsverfahrens der genannten Gleichgewichtsbedingungen. Aber die geforderte Mindestbedingung $\frac{F_1}{F_3} = \frac{1}{3}$ ist noch nicht erfüllt, sie beträgt nur $\frac{F_1}{F_3} = \frac{1}{2}$. Erst durch eine Ortsverschiebung des Vektors F_3 wird das Merkmal $\frac{F_1}{F_3} = \frac{1}{3}$ ausgewiesen (Abb. 10c). Wichtig bleibt als Zwischenergebnis festzustellen, dass bei den ersten drei Begriffen der Folge nur das physikalische Geschehen der Statik eine Rolle spielt. Der Wirkraum und die Art der angreifenden Kräfte sind noch keine definierenden Merkmale des Begriffes 10c. In Abb. 10d ist schließlich das physikalische Modell B des gesuchten mechanischen Kraftverstärkers dargestellt. Im Abstand $a = l$ vom Momentenpunkt A sind die Handkraft F_H und bei $a = \frac{l}{3}$ anstelle von F_3 die Gewichtskraft F_G angebracht. F_2 ist eine Auflagerkraft geworden und erfüllt die Bedingung der dritten Kraft. Alle drei Kräfte greifen an einem Balken mit rechteckigem Querschnitt an. Er stellt den abstrakten Wirkraum bzw. die Wirkfläche des physikalischen Modells B dar. Das Modell B wird auch das physikalische Modell eines einarmigen Hebels genannt.

Mit den Gleichgewichtsbedingungen $\sum F_{iy} = 0$ und $\sum M_{iA} = 0$ ergibt sich das eingangs geforderte Kraftverhältnis $\frac{F_H}{F_G} \leq \frac{1}{3}$. Es ist das markanteste Merkmal des physikalischen Modells B. In Abb. 10 wird symbolisch der Nachweis geführt, dass das abgeleitete Modell B ein statisches Kräftesystem mit drei Kräften ist. Abb. 11 ergänzt das Schlussverfahren der Abb. 10 durch Angabe der Konsequenz.

Die Determination wird weitergeführt. In Abb. 12 sind zunächst die Bilder des „physikalischen Modells A" und des „physikalischen Modells B" nebeneinander gestellt. Positiv beeinflusst durch den bildlichen Vergleich wird daraus das „physikalische Modell C" gedanklich abgeleitet und dargestellt. Der Wirkraum des physikalischen Modells B wird geändert: Der Begriff „Koffer" hat den Begriff „Balken" ersetzt. Logisch gesehen wird der Begriff „physikalisches Modell A" durch Merkmale des „physikalischen Modell B" ergänzt

An dieser Stelle schließt sich jetzt ein Kreis. In Abb. 3 wurde ohne nähere Definition der dort eingesetzten Begriffe das Ziel der Entwicklungsarbeit in allgemeiner Form genannt. Durch eine systematische und logische Gedankenarbeit hat der Entwicklungsingenieur das ge-

steckte Ziel erreicht, in dem er die individuellen Merkmale dieses Zieles festgelegt hat: dokumentiert durch das „physikalische Modell C" in Abb. 12.

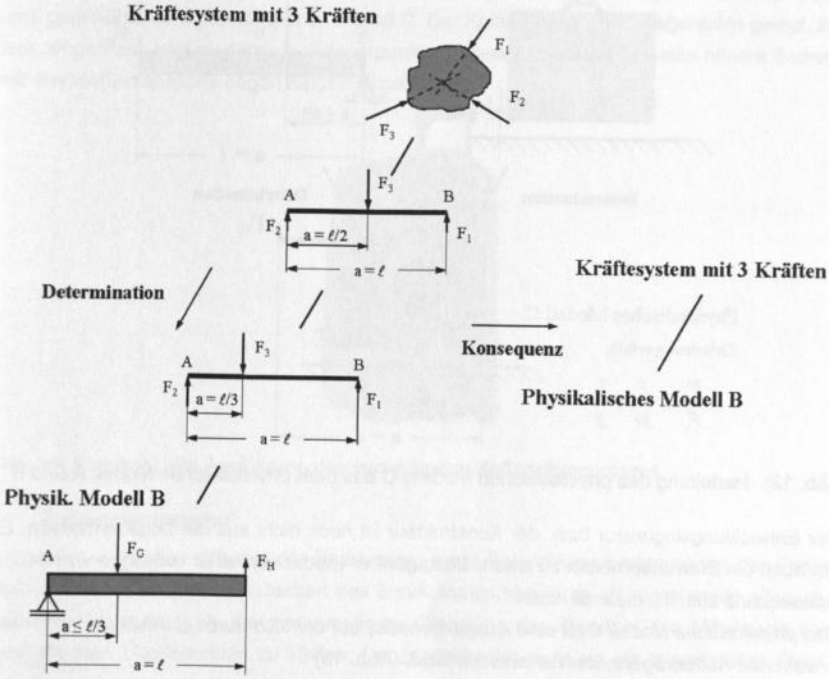


Abb. 11: Bestätigung der vorweggenommenen Konsequenz durch Determination

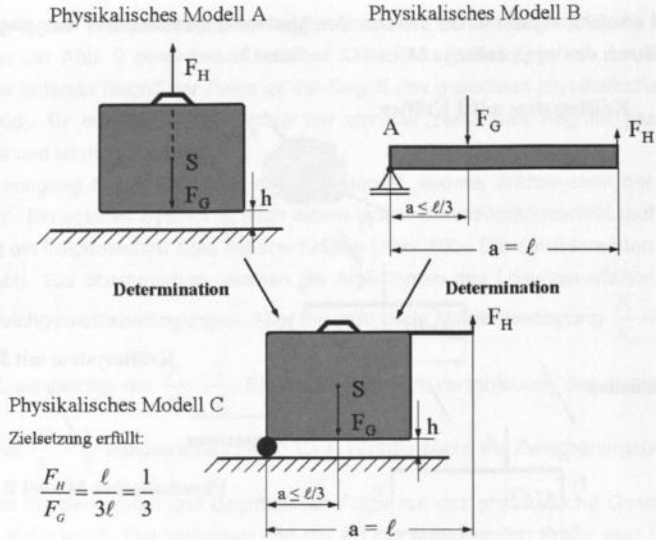


Abb. 12: Herleitung des physikalischen Modells C aus dem physikalischen Modell A und B

Der Entwicklungsingenieur bzw. der Konstrukteur ist noch nicht aus der Logik entlassen. Er hat noch ein Entwurfsproblem zu lösen. Dazu geht er wieder von einer vorweggenommenen Konsequenz aus, die diesmal lautet:

Das physikalische Modell C ist eine Ausgangsbasis, auf der sich durch Entwurf ein konkretes erweitertes Kofferträgersystem entwickeln lässt. (Abb. 13)

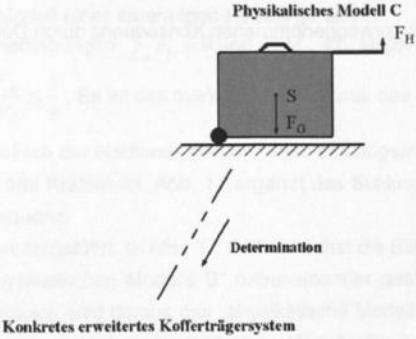


Abb. 13: Zwei Begriffe sind durch Determination logisch zu verknüpfen

Eine realisierte Lösung ist als Foto in Abb. 14 dazugesetzt, ohne auf die differenzierte Entwurfsarbeit näher einzugehen. Das Foto zeigt sogar eine Verbesserung des konkreten Systems gegenüber dem physikalischen Modell C. Der Koffer wird in die Waagerechte gelegt, so dass wegen des jetzt niedrigeren Schwerpunktes (Abstand vom Boden) eine höhere Sicherheit des Koffertransports gegen Kippen gegeben ist.

Abb. 14: Eine konkrete Ausführung des verbesserten Kofferträgersystems

4. Zusammenfassung

Generelles Fazit, das sich aus der Bearbeitung eines Entwicklungsproblems aus der Praxis ergibt, ist, dass eine andere Denkart des Entwicklungsingenieurs als die normale offen gelegt wird. Als normal gilt, die mathematische Gleichung der Physik in den Mittelpunkt von synthetischen Überlegungen zu stellen. Der Ingenieur ist mehr als ein angewandter Physiker. Das „Mehr" wurde versucht, durch Verwendung der Begriffe „physikalisches Modell", „logischer Schluss" und „Entwurf" deutlich zu machen.

Thema wird fortgesetzt:
In einem weiteren Teil wird, nach Fertigstellung seiner Bearbeitung, über den Einsatz der angepassten Methodik bei der Weiterentwicklung des Gaswechsels eines Verbrennungsmotors berichtet.

5. Literatur

[1] Rodenacker, Wolf G.: Methodisches Konstruieren. Konstruktionsbücher, Band 27. Springer Verlag.

[2] Seifert, H.: Erfahrungen mit einem mathematischen Modell zur Simulation von Arbeitsverfahren in Verbrennungskraftmaschinen, MTZ 39/12, S. 567

[3] Freytag Löringhoff, Baron von: Logik ihr System und ihr Verhältnis zur Logistik, Stuttgart: W. Kohlhammer 1966

[4] Seifert, H.: Methodenunterstützte Analyse der Kennlinie eines Brennstoffzellen-Stack. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2005), Heft 3, S. 238-244; Heft 4, S. 336-344

Eine ganzheitliche Konstruktionsmethodik durch Vereinigung der Systemtheorie und der Dialektik

Jörg Feldhusen[1], Ingo Schulz[2]

1. IKT, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

2. Cassalla GmbH i. G., Gerolzhofen

Kurzfassung

Die Situation der Produktentwicklung ist gekennzeichnet durch zahlreiche Methodiken, die eine schnelle, kosteneffiziente Vorgehensweise ermöglichen sollen. Häufig konkurrieren diese Methodiken miteinander, statt sich zu ergänzen. Am IKT wurde daher auf der Grundlage von allgemeinen Technikphilosophien ein generisches Rahmenmodell entwickelt, das die Abbildung einer Metamethodik der Produktentwicklung ermöglicht. Damit wird erstmals die Integration verschiedener, bislang konkurrierender Methodiken erreicht, sodass flexibel für jede Problemsituation die bestgeeignete Methodik für die Produktentwicklung ausgewählt werden kann.

1. Einleitung

Während der vergangenen Jahre wurden zahlreiche Methodiken vorgeschlagen, die Produktentwicklungsprozesse (PEP) schneller, kosteneffizienter und qualitativ hochwertiger machen sollen. Hauptvertreter dieser Methodiken sind sowohl die in Deutschland entwickelte Konstruktionsmethodik (KM) als auch die zurzeit stark diskutierte, aus der ehemaligen UdSSR stammende Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ) [1], [2]. Obwohl alle Methodiken den gleichen Zweck verfolgen, nämlich die erfolgreiche Entwicklung eines Produkts, werden sie von ihren Vertretern häufig als einzigartig und den anderen Methodiken überlegen dargestellt. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass jede Methodik stets nur auf einen Kernbereich fokussiert, nicht aber den gesamten Produktentwicklungsprozess unterstützt. Somit sind sie kein ganzheitliches Werkzeug für den Ingenieur. Daher soll hier ein Weg aufgezeigt werden, wie die Vereinigung unterschiedlicher Produktentwicklungsmethodiken in einer gemeinsamen Metamethodik erfolgen kann. Das Ziel ist es, dem Ingenieur eine Arbeitsumgebung anbieten zu können, in der er für die jeweils vorliegende Problemstellung die bestgeeignete Methode auswählen kann, unabhängig davon, aus welcher Methodik diese stammt.

2. Stand der Technik

In der Vergangenheit wurden verschiedene Anstrengungen unternommen, Methodiken miteinander zu vereinen. So wurde in den 1990er Jahren versucht, die KM und die TRIZ und/oder das Quality Function Deployment (QFD) miteinander in Einklang zu bringen [3], [4], [5], [6]. Bis heute haben diese Bemühungen jedoch keinen langfristigen Erfolg erzielt. Ein Grund hierfür kann in der begrenzten Sicht bei der Verschmelzung der Methodiken vermutet werden, da diese häufig aus der Perspektive der Methodiken selbst erfolgte, ohne

deren grundlegenden Strukturen zu berücksichtigen. Daher wurde kein allgemeiner Standpunkt gefunden, von dem aus die wissenschaftlichen Grundlagen aufgedeckt und damit die Schnittstellen zwischen den Methodiken definiert wurden. Dieses zentrale Problem löst der im Folgenden beschriebene Ansatz.

3. Technikphilosophische Grundlagen der Produktentwicklung

Um Produktentwicklungsmethodiken miteinander zu verschmelzen, können auf der der Methodik übergeordneten Ebene der Technikphilosophie (vgl. Abb. 1) zunächst die grundlegenden Vorgehensweisen der Produktentwicklung identifiziert und miteinander vereint werden. Darauf aufbauend kann dann eine Metamethodik entwickelt werden, die die wesentlichen Bestandteile aller aktuellen Methodiken aufweist.

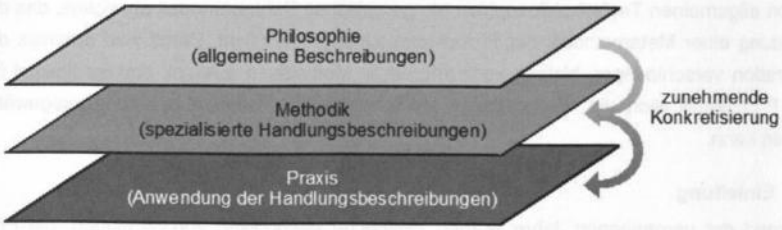


Abb. 1: Beziehung zwischen Philosophien, Methodiken und der Praxis

Durch den Schritt auf die Ebene der Philosophie ist es möglich, unabhängig von Prägungen durch die Ausbildung und Voreingenommenheiten gegenüber „Konkurrenzmethodiken" die grundlegenden Beschreibungselemente von „Technologie" zu identifizieren. Ein vereinheitlichtes technikphilosophisches Konzept zur Technologiebeschreibung bietet damit die einzigartige Chance, eine wirklich ganzheitliche Konstruktionsmethodik zu entwickeln.
Zwei wesentliche wissenschaftliche Grundlagen der Produktentwicklung können identifiziert werden: die Systemtheorie und die Dialektik [7], [8]. Beide Philosophien werden dazu verwendet, „Technologie" im Allgemeinen zu erklären. Daher schlagen die Autoren vor, eine neue, sowohl auf der Systemtheorie als auch auf der Dialektik gründende Konstruktionsmethodik zu entwerfen. Hierdurch wird es möglich, bislang im Gegensatz zueinander stehende Produktentwicklungsmethodiken in einer Metamethodik zu vereinen.

3.1. Systemtheorie

Die Systemtheorie ist eine analytische Philosophie zur Abbildung von Systemen beliebiger Ausprägung, z. B. sozialer, biologischer oder technischer Systeme. Das Ziel dieser interdisziplinären Philosophie ist es, Werkzeuge zur Beschreibung von Systemen bereitzustellen. Dabei kann nach Ropohl zwischen den drei Aspekten Hierarchie, Funktion und Struktur unterschieden werden [7]. Durch Abstraktion versucht die Systemtheorie, die Komplexität der Welt zu reduzieren, erfassbar und durchsichtig zu machen.

3.2. Dialektik

Anders als die Systemtheorie nimmt die Dialektik eine Totalitätsperspektive ein, d. h. sie betrachtet die Komplexität der Welt als Ganzes, statt sie durch Abstraktion zu reduzieren [9]. Darüber hinaus versucht die Dialektik, über Widersprüche die Entwicklung der Welt zu erklären. Diese Widersprüche werden durch die These und deren Negation, der Antithese, formuliert. Durch die Negation der Negation, der Synthese, wird der Widerspruch aufgelöst und eine neue Qualität erreicht. Damit hat sich die Welt weiterentwickelt und ein neuer Widerspruch kann formuliert werden, der zur nächsten Entwicklungsstufe führt [8].

3.3. Methodiken auf der Grundlage der Technikphilosophien

Vertreter der systemtheoretisch orientierten Methodiken sind z. B. die Konstruktionsmethodik, das QFD oder das Axiomatic Design (AD) [1], [10], [11]. Grundsätzlich weisen aber alle Methodiken Bestandteile der Systemtheorie auf, so auch die TRIZ.
Die Dialektik wird besonders durch die TRIZ repräsentiert, wodurch diese unter den Produktentwicklungsmethodiken eine exponierte Position einnimmt. Nur das QFD greift in Form der Konfliktdefinition im Dach des House of Quality (HoQ) ebenfalls den Widerspruch explizit auf. Die Überschneidung von Systemtheorie und Dialektik in den Methodiken deutet bereits darauf hin, dass sie als Grundlage einer gemeinsamen Metamethodik genutzt werden können.

3.4. Das Verhältnis von systemtheoretischen & dialektischen Methodiken

In der Literatur wird die TRIZ von der Konstruktionsmethodik häufig ignoriert, zumindest aber nicht in deren Methodengerüst aufgenommen. Thiel berichtet davon, dass die Vertreter der Konstruktionsmethodik den Widerspruch als Fehler in der Aufgabenstellung ablehnten [12]. Die TRIZ dagegen stellt häufig ihre Überlegenheit für die Produktentwicklung dar, ohne wiederum auf die Vorgehensweisen der KM einzugehen oder sogar Bestandteile von ihr dauerhaft zu adaptieren (vgl.[13], S. 2, „...Konstruktionsmethodik, die allenfalls verbesserte Varianten einer Entwicklung hervorbringt").
Diese unbefriedigende Situation kann durch ein grundlegendes Missverständnis über den Begriff „Widerspruch" erklärt werden. Die Konstruktionsmethodik verneint den Widerspruch, z. B. sind negative Funktionen meist nicht vorgesehen. Die TRIZ dagegen nutzt besonders den Widerspruch als Quelle für Innovationen. Beide Seiten sprechen hierbei allerdings über zwei unterschiedliche Deutungen des Widerspruchs. Während die Konstruktionsmethodik den logischen Widerspruch meint, betrachtet die TRIZ den dialektischen Widerspruch. Wandschneider zufolge ist ein solcher Widerspruch durch zwei Ebenen charakterisiert [14]:

- Pragmatische Ebene: Bezogen auf die Handlung
- Semantische Ebene: Bezogen auf die Bedeutung

Wegen des Auftretens des Widerspruchs auf diesen beiden Ebenen oszilliert die Schlussfolgerung zwischen „wahr" und „falsch". Daher kann auf der pragmatischen Ebene ein Widerspruch auftreten, während auf der semantischen Ebene kein Widerspruch vorhanden ist.

Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, diesen „Scheinwiderspruch" zwischen zwei Objekten durch eine Synthese zu lösen.
Die TRIZ lenkt den Blick genau auf diese unterschiedlichen Blickrichtungen auf das Problem, wohingegen die KM immer nur eine Blickrichtung annimmt und sich somit unnötiger Weise selbst beschränkt. Grundsätzlich scheint die Systemtheorie, und damit die von ihr abgeleiteten Methodiken, einen blinden Fleck bei der Betrachtung von Widersprüchen zu besitzen. Zaburdaeva und Zobel verweisen darauf, dass „auch unbeirrbare Anhänger der ‚klassischen' Kreativitätsmethoden auf Dauer nicht daran vorbeikommen werden, sich mit den Grundelementen des TRIZ-Denkens vertraut zu machen" [15]. Umgekehrt trifft auch auf die „TRIZ-Anhänger" zu, sich mit den „klassischen" Vorgehensweisen der Produktentwicklung auseinander setzen zu müssen.

4. Lösungsweg für eine ganzheitliche Konstruktionsmethodik

Für die Vorgehensweise der Erarbeitung der Metamethodik können die Prinzipien der Technikphilosophien selbst genutzt werden. Das System der Systemtheorie weist auf der Ebene der Methodik und der Praxis der Produktentwicklung offenbar Mängel auf. Dieser Umstand weist darauf hin, dass die Definition des Systems nicht umfassend genug ist und durch Bestandteile seiner Umgebung, d. h. seines Supersystems, ergänzt werden muss. In der Umgebung der Systemtheorie ist u. a. die Dialektik enthalten, so dass geprüft werden kann, ob nicht Teile von ihr die Systemtheorie bereichern können.
Auch die Dialektik hat offenbar Mängel in der Methodik und der Praxis, die gemäß ihrer eigenen Prinzipien durch die Bildung einer Synthese überwunden werden müssen. Diese Synthese kann gebildet werden aus den beiden Gliedern „Systemtheorie" und „Dialektik", die zumindest in der Wahrnehmung der Praxis der Produktentwicklung in scheinbarem Widerspruch zueinander stehen.

4.1. Das generische Rahmenmodell der Produktentwicklung

Um diesen „Widerspruch" zwischen den systemtheoretischen und den dialektischen Methodiken zu lösen, wurde am IKT ein generisches Modell des Produktentwicklungsprozesses entwickelt, das beide Philosophien in einer Synthese miteinander vereint (Abb. 2). Dieses Modell kann zur Abbildung aller Aspekte technischer Systeme genutzt werden.
Das generische Modell besteht aus eindeutig abgegrenzten Systemen, die in einer hierarchischen Beziehung zueinander stehen, ein bestimmtes Verhalten aufweisen und untereinander durch Relationen interagieren. Während diese Bestandteile der Systemtheorie entstammen, fügt die Dialektik die Möglichkeit hinzu, Relationen unterschiedliche Qualitäten zuzuweisen. Diese Relationsqualitäten sind „positiv", „neutral" und „negativ". Indem zwischen zwei beliebigen Systemen eine negative Relation erzeugt wird, werden diese Systeme als These und Antithese definiert, die eine Synthese zur Lösung dieses Konflikts fordern. Diese Synthese ist letztendlich das technische System, welches die widersprüchlichen Aspekte in sich vereint. Darüber hinaus wird dem generischen Modell die „Verschränkung" hinzugefügt, die eine kausale Abhängigkeit zwischen Systemen ausdrückt. Innerhalb einer Verschränkung fordert die Existenz eines Systems immer die Existenz eines weiteren Systems.

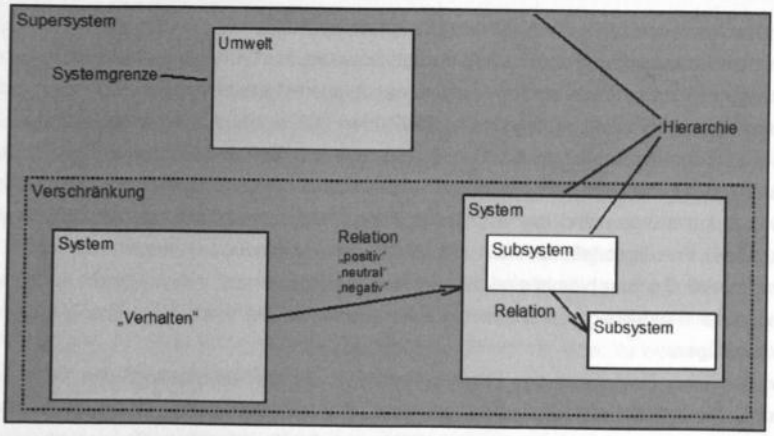


Abb. 2: Generisches Rahmenmodell der Produktentwicklung

4.2. Das allgemeine Produktmodell

Das generische Modell bildet die Grundlage für ein allgemeines Produktmodell, dass ein technisches System über die drei Teilmodelle „Prozess", „Produktdaten" und „Organisation" abbildet (Abb. 3). Das Produktmodell ist hierbei eine vereinfachte Repräsentation des realen Systems „Produkt". Das Organisationsmodell bildet die Ressourcen ab, die für die Produktentwicklung zur Verfügung stehen, z. B. die Abteilungen und Mitarbeiter des Unternehmens sowie das Projektmanagement. Das Produktdatenmodell beinhaltet alle Daten, die das technische System beschreiben und die durch das Anwenden des Prozessmodells erzeugt werden. Das Prozessmodell ist der zentrale Bestandteil des Produktmodells, das den Produktentwicklungsprozess in Form einer Metamethodik abbildet.

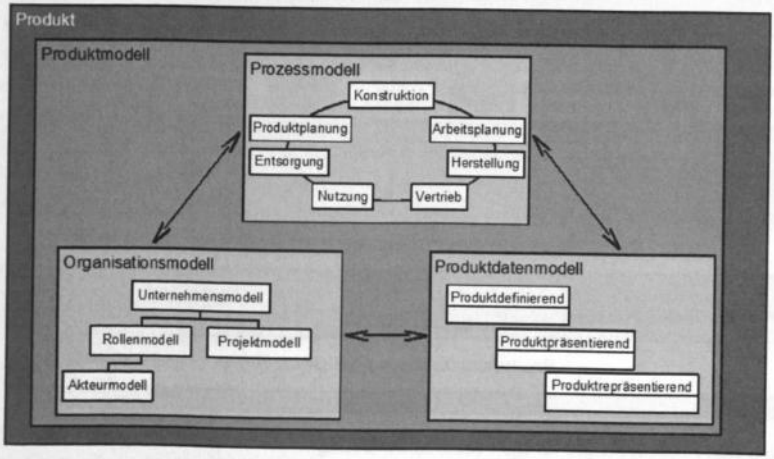


Abb. 3: Das allgemeine Produktmodell

4.3. Das Prozessmodell als Abbildung der Metamethodik

Die in dem Prozessmodell abgebildete Vorgehensweise der Produktentwicklung folgt einem fünfstufigen Prozess, der aus der Analyse verschiedener Entwicklungsmethodiken, insbesondere der Konstruktionsmethodik, der TRIZ, des QFDs und des ADs, abgeleitet wurde (Abb. 4). Dieser Prozess beginnt mit der funktionsorientierten Modularisierung des Produkts im Modulmodell und führt über das Spezifikationsmodell mit der Dokumentation von Bedürfnissen, Anforderungen und der Erstellung eines Zielsystems, über das Funktionsmodell sowie das Prinzipmodell bis zur Definition von fertigungsorientierten Modulen im Entwurfmodell. Darüber hinaus sind die den Prozess begleitenden Arbeitsschritte der Bewertung und der Beurteilung von unterschiedlichen Varianten der erarbeiteten Produktdaten zu berücksichtigen.

Ein wesentlicher Bestandteil des Prozessmodells ist die Verschränkung. Durch sie werden Teile des Prozessmodells miteinander gekoppelt, wie z. B. der Zweck, der als teleologische Funktion die Absicht des Menschen ausdrückt, und die Hauptfunktion, die eine deskriptive Funktion des technischen Systems darstellt [7]. Hierdurch ist es unmittelbar möglich, die abstrakte Zweckbeschreibung während der Produktplanung in eine konkrete Funktion des technischen Systems umzuwandeln.

Ebenso erlaubt die Verschränkung die Definition der Prinziplösung, die aus den beiden Bestandteilen Funktions- und Prinzipmodell besteht. Durch die Verschränkung existiert automatisch ein Prinzip, wenn eine Funktion erzeugt wird und umgekehrt. Nur beide Modelle zusammen sind in der Lage, ein abstraktes technisches System vollständig abzubilden. Das verschränkte Modell der Prinziplösung vereint damit die Funktionsstruktur und Prinziplösung der Konstruktionsmethodik, das Strukturmodell technologischer Grundvorgänge und das Stoff-Feld-Modell der TRIZ [1], [2], [16].

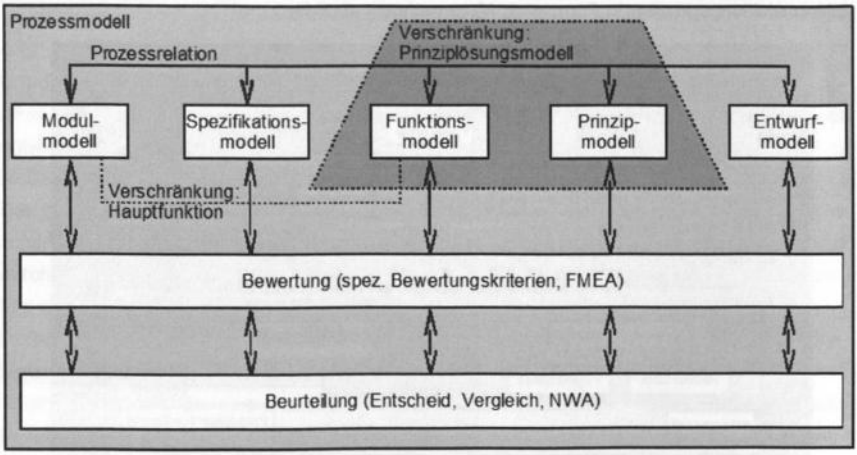


Abb. 4: Das Prozessmodell für die Produktentwicklung

Jeder der Arbeitsschritte dient dazu, eindeutige Daten des Produktdatenmodells zu erzeugen. Hierfür kann aus den Methoden verschiedener Methodiken gewählt werden. Eine Anforderung z. B. kann im Arbeitsschritt „Spezifikation" mit Hilfe der Leitlinie zur Anforderungsermittlung nach Pahl & Beitz [1] oder der 9-Felder-Methode der TRIZ [2] erstellt werden. Beide Methoden erzeugen das gleiche Anforderungsobjekt, so dass dieses innerhalb beider Methoden sichtbar und bearbeitbar ist. Der einzige Unterschied ist, dass mit der Methode der Leitlinie ein Attribut „Hauptmerkmal" festgelegt wird, während dieses bei der 9-Felder-Methode unberücksichtigt bleibt. Stattdessen wird ein Attribut festgelegt, das die Anforderung z. B. der Zukunft eines Supersystems des zu entwickelnden Produkts zuordnet. Unabhängig von ihrer Ursprungsmethode kann die Anforderung mit anderen Methodensichten betrachtet und damit auf Vollständigkeit hin überprüft werden bzw. zu weiteren, bis dahin unentdeckten Anforderungen führen.

Es wird deutlich, dass eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung einer Arbeitsumgebung für den Ingenieur darin besteht, die Daten und ihre komplexen Abhängigkeiten adäquat zu visualisieren. Hierfür wurde am IKT auf der Grundlage des allgemeinen Produktmodells eine Computer Aided Product Development Software (CAPD) entwickelt, die die Komplexität technischer Systeme veranschaulicht und beherrschbar macht [17]. Um dies zu erreichen, nutzt die Software so genannte skalierbare Benutzeroberflächen, die eine dynamisch-interaktive Modellierung der Systeme und ihrer Relationen erlaubt.

5. Zusammenfassung & Ausblick

Mit dem generischen Rahmenmodell der Produktentwicklung konnte ein allgemeines Modell entwickelt werden, dass sowohl die Abbildung systemtheoretischer als auch dialektischer Produktentwicklungsmethodiken erlaubt. Erstmals ist damit die Grundlage geschaffen, bislang konkurrierende Methodiken in einer Metamethodik zu vereinen, sodass für jede Problemstellung die bestgeeignete Methode ausgewählt werden kann. Durch die Gründung auf einem einheitlichen Produktmodell ist gewährleistet, dass Produktdaten, die mit einer Methode z. B. der TRIZ erzeugt wurden, von Methoden der Konstruktionsmethodik weiterverwendet werden können.

In Zukunft soll die am IKT entwickelte Software um weitere Bestandteile wie z. B. Kostenplanung und Projektmanagement, aber auch um kontextsensitives Wissensmanagement erweitert werden [18]. Durch die konsequente Gründung der Software auf den Prinzipien der Systemtheorie und der Dialektik bildet sie eine flexible Plattform für die Bearbeitung allgemeiner technischer Problemstellungen.

6. Literatur

[1] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H., Konstruktionslehre, Springer, Berlin, 2007

[2] Altschuller, G. S., Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme, PI - Planung und Innovation, Cottbus, 1998

[3] Linde, H.; Hill, B., Erfolgreich erfinden, Hoppenstedt Technik Tabellen, Darmstadt, 1993

[4] Malmquist, J.; Axelsson, R.; Johansson, M., A Comparative Analysis of the Theory of Inventive Problem Solving and the Systematic Approach of Pahl & Beitz, Irvine/CA, 1996

[5] de Carvalho, M. A.; Back, N., Cross-Fertilization between TRIZ and the Systematic Approach to Product Planning and Conceptual Design, Altshuller Institute, Worcester/MA, 2000

[6] Bors, M. E., Ergänzung der Konstruktionsmethodik um quality function deployment: ein Beitrag zum qualitätsorientierten Konstruieren, Carl Hanser, München, 1995

[7] Ropohl, G., Allgemeine Technologie, Carl Hanser, München, 1999

[8] Wandschneider, D., Technikphilosophie, C. C. Buchners, Bamberg, 2004

[9] Ropohl, G., Eine systemtheoretische Rekonstruktion der Dialektik, in: Repraesentation mundi: Festschrift zum 70. Geburtstag von Hans Heinz Holz, Hrsg. Klenner, H., Jürgen Dinter Verlag für Philosophie, Köln, 1997

[10] Akao, Y., Quality Function Deployment, Productivity Press, Portland, 1990

[11] Suh, N. P., Axiomatic Design, Oxford University Press, New York, 2001

[12] Thiel, R., Sechs Kerne von TRIZ, ihre Entwicklung und überwundne Defizite, TRIZ-online Magazin, Ausgabe 3, www.triz-online-magazin.de/ ausgabe06_03/ artikel_2.pdf, 2006, aufgerufen am 19.06.2007

[13] Klein, B., TRIZ/TIPS – Methodik des erfinderischen Problemlösens, Oldenbourg Verlag, München, 2002

[14] Wandschneider, D., Grundzüge einer Theorie der Dialektik, Klett-Cotta, Stuttgart, 1995

[15] Zarburdaeva, L.; Zobel, D., TRIZ – Schlüssel zum Erfolg oder Luftblase?, TRIZ-online Magazin, Ausgabe 3, www.triz-online-magazin.de/ ausgabe06_03/artikel_1.pdf, 2006, aufgerufen am 19.06.2007

[16] Wolffgramm, H., Allgemeine Technologie – Teil 1, Franzbecker, Hildesheim, 1994

[17] Feldhusen, J.; Schulz, I., Joining Customers Needs and Product Lifecycle Management by Means of a Computer Supported Product Development Environment, 16th CIRP International Design Seminar, Calgary, 2006

[18] Schulz, I.; Bungert, F.; Feldhusen, J., Kontextsensitives Management von implizitem Wissen in einer rechnergestützten Produktentwicklungsumgebung; In: Informations- und Wissensdrehscheibe Produktdatenmanagement: zweiter Workshop am 23.11.2006, Gito, Berlin, 2007

Prozessintegration eines integrierten CAD – VR – Arbeitsplatzes

Ralph Stelzer, Wolfgang Steger

TU Dresden

Einleitung

Virtuelle Realität (VR) ist in ausgewählten Bereichen der Industrie bereits eine fest etablierte Technologie. Allerdings wird VR bisher vor allem aus Kosten- und Aufwandsgründen zumeist in großen Unternehmen (z.B. des Fahrzeugbaus) eingesetzt. Sowohl durch die allgemeine Preisentwicklung der Hardware als auch durch die Verfügbarkeit neuer Geräte mit einer vereinfachten Nutzung (kostengünstige Powerwalls, autostereoskopische Displays) wird VR nun aber zunehmend auch für kleinere Unternehmen interessant.

Einem breiten Einsatz, der die ausgezeichnete Visualisierungsqualität und das einfache Handling der VR-Modelle ausnutzen könnte, stehen jedoch noch immer der hohe Aufwand bei der Bereitstellung der erforderlichen Daten und vor allem die fehlende Integration in den laufenden Entwicklungsprozess entgegen.

Im Beitrag wird eine Prozessintegration vorgestellt, die einen konventionellen 3D-CAD-Arbeitsplatz um eine VR-Komponente erweitert. Dies erfolgt durch eine bidirektionale Kopplung über das Product-Lifecycle-Management-System (PLM), wodurch außer der Bearbeitung und Visualisierung der Geometrie auch die Bewegungssimulation sowie die Darstellung nichtgeometrischer Informationen aus dem Produktdatenmanagement ermöglicht werden.

1. Vergleich von CAD- und VR-Modellen

Die Herausforderungen, welche bei der Integration von CAD und VR zu bewältigen sind, haben ihre Wurzeln zumeist in den unterschiedlichen Repräsentationen der Produkte in den Teilsystemen. Moderne 3D-CAD-Systeme sind etablierte Werkzeuge zur Geometriemodellierung. Mit ihnen erstellte Volumenmodelle von Einzelteilen sind

- exakt, d.h. die Komponenten des Geometriemodells sind mathematisch exakt definiert und eindeutig reproduzierbar
- parametrisch, d.h. alle Geometrieelemente werden in einem Geometriebaum angeordnet und sind jederzeit über die Beschreibungsparameter änderbar.

Der Aufbau von Produktstrukturen erfolgt als mehrstufige Hierarchie von Einzelteilen und Baugruppen. Dabei werden die Komponenten unter funktionalen Aspekten so angeordnet und ausgerichtet, wie sie später im Produkt in Beziehung stehen. Zur Beschreibung der Relationen zwischen den Komponenten werden Baugruppenverknüpfungen oder –constraints verwendet. Im Ergebnis dieser Modellierung im Baugruppenkontext können im CAD-System beispielsweise Kollisionsprüfungen oder Bewegungsanalysen ausgeführt werden.

Neben diesen bekannten Möglichkeiten der CAD-Systeme gibt es jedoch eine Reihe von Beschränkungen, die die Anwendung der Systeme erschweren:

- Die Verarbeitung von CAD-Modellen stellt extreme Anforderungen an die Rechentechnik und die Software. Das Laden von sehr großen Baugruppen dauert mitunter viele Minuten. Dies ist insbesondere dann sehr nachteilig, wenn in ihrem Umfang noch unbekannte Produktstrukturen aus einem PLM-System geladen werden müssen.
- Sehr große und komplexe Produkte lassen sich im CAD-System selbst mit moderner Hardware überhaupt nicht erstellen. Damit entfällt häufig die Möglichkeit, das Gesamtmodell vollständig zu definieren. Komponenten der höheren Assemblyebenen sind dann nur noch über die PLM-Stückliste miteinander verknüpft. Die Produkte können nicht vollständig modelliert und nur eingeschränkt analysiert werden.
- Die Verarbeitung von Daten unterschiedlicher Herkunftssysteme bereitet trotz bestehender Standards häufig Schwierigkeiten. Vor allem bei der Kombination von CAD-Modellen mit Visualisierungs- bzw. Simulationsmodellen ist die Arbeitsmöglichkeit direkt im CAD-System sehr eingeschränkt.
- Die Bedienung von CAD-Systemen erfordert Spezialwissen, das weitgehend auf den Entwicklungsbereich begrenzt ist.

Die angeführten Nachteile bestehen bei VR-Modellen nicht oder zumindest in weit geringerem Maße. VR-Modelle sind besonders für Visualisierungsanforderungen konzipiert und verwenden daher keine exakten Volumenmodelle sondern tesselierte Flächenmodelle. Diese reduzierten, meist durch Dreiecksfacetten approximierten Geometrien sind CAD-System unabhängig, können sehr schnell geladen und bewegt werden. Derartige Visualisierungsmodelle lassen sich um weitere Modellkomponenten, wie Umgebungsmodelle (z.B. Fahrbahnen, Landschaften) oder Simulationsergebnisse (z.B. Strömungen), ergänzen. Die Genauigkeit der Darstellung lässt sich bei der Erstellung festlegen oder kann nach entsprechender Vorverarbeitung während der Visualisierung bzw. auch vom Betrachterstandort abhängig gesteuert werden (LOD ... level of detail).

Neben dem seit Jahren etablierten Modellformat VRML (Virtual Reality Modeling Language) beginnen sich in jüngster Zeit hybride Formate zu etablieren und dürften an Bedeutung weiter gewinnen. Adobe Acrobat 3D [1] mit exakter B-Rep-Übernahme aus dem CAD-Modell oder JT [2] mit attributierbarer Tesselierung und wahlweise integrierbarem B-Rep-Modell sind zwei namhafte Vertreter.

2. Erstellung und Nutzung von VR-Modellen

Die Nutzung von VR bietet vor allem im Entwicklungsprozess komplexer Produkte neue Möglichkeiten, räumliche Sachverhalte beurteilen zu können und auch besonders anspruchsvolle DMU-Aufgaben auszuführen. Einige Einsatzfälle, bei denen räumliche 3D-Darstellungen durch die realitätsnahe Tiefendarstellung besonders sinnvoll sind, seien beispielhaft genannt:

- Einbau- und Kollisionsuntersuchungen,
- Ergonomieuntersuchungen mit Menschmodellen,
- Verlegung von Schläuchen, Rohren, Kabeln,
- Visualisierung von Maschinenkonfigurationen

Problematisch ist, dass gegenwärtig die VR-Nutzung noch nicht so in den Produktentwicklungsprozess integriert ist, dass jeder Entwickler kurzfristig und mit geringem Aufwand VR nutzen kann. Das hat verschiedene Ursachen, die maßgeblich aus den im vorigen Abschnitt beschriebenen unterschiedlichen Modellstrukturen resultieren. Die Erzeugung der VR- Modelle erfolgt durch Datenkonvertierung aus den CAD-Modellen. Dabei gehen oft Informationen, die bereits im CAD vorhanden sind, verloren. Dies trifft auf Baugruppen-Constraints (z.B. zugehörige Zylinderflächen in Bild 1), Daten aus Bewegungsanalysen und Strukturdaten (Baugruppenhierarchie) zu.

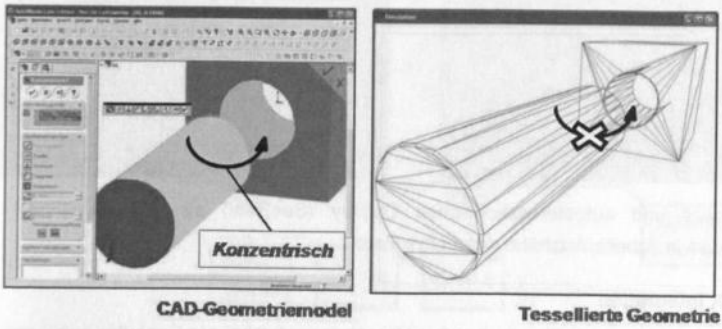


Bild 1: Durch Tesselierung verlorene CAD-Constraints

Auch bereitet das Einbringen von Änderungen in das VR-Modell Schwierigkeiten. Da nicht direkt am VR-Modell geändert werden kann, muss die Änderung im CAD-System erfolgen und anschließend wieder in das VR-System übernommen werden. Dem steht gegenüber, dass häufig das gesamte zu visualisierende Produkt in ein einziges, geschlossenes VR-Modell konvertiert wird. Dies ist technisch für den Standardnutzer zwar die einfachste Möglichkeit, schließt die einfache Substitution von einzelnen Komponenten jedoch aus. Erfolgt die Konvertierung für jedes Teil einzeln, ist die Präsentation in VR wiederum schwierig, da dann die einzelnen Teile nachträglich korrekt positioniert werden müssen.

Ein weiteres Problem ist der immer noch verhältnismäßig hohe technische Aufwand für die VR-Projektionssysteme. VR-Anlagen bieten eine sehr hohe Qualität bei der Darstellung und hervorragende Bewertungsmöglichkeiten für 3D Geometriedaten. Problematisch ist allerdings der Aufwand für die tägliche Nutzung. Eine CAVE stellt für ein Unternehmen eine beträchtliche Investition dar und wird somit für eine Vielzahl von Nutzern konzipiert, um einen hohen Auslastungsgrad zu erreichen. Das hat Wartezeiten für den einzelnen Nutzer zur Folge. Weiterhin ist die räumliche Trennung vom Arbeitsplatz des Konstrukteurs nachteilig. Diese Aussagen treffen in geringerem Umfang für die Nutzung einer Workbench oder Powerwall (Bild 2, linke Seite) zu. Interessante Möglichkeiten für die Nutzung von VR direkt am Arbeitsplatz des Entwicklers bieten autostereoskopische Displays (Bild 2, rechte Seite). Zwar lassen derartige Monitore keine Immersion (d.h. „Eintauchen" des Nutzers in die VR-Szene) zu, doch ist dies häufig auch gar nicht unbedingt erforderlich und die Vorteile stereoskopische Bilder ohne Hilfsmittel betrachten zu können sowie die direkte Verfügbarkeit am

Arbeitsplatz sind klare Vorzüge dieser Technologie. Dies gilt vor allem für kleinere Produkte, denn die Entscheidung für das erforderliche VR-System hängt natürlich sehr von der Größe und Komplexität des Produktes sowie den Forderungen an die Visualisierungsqualität und die Interaktion mit den Modellen ab.

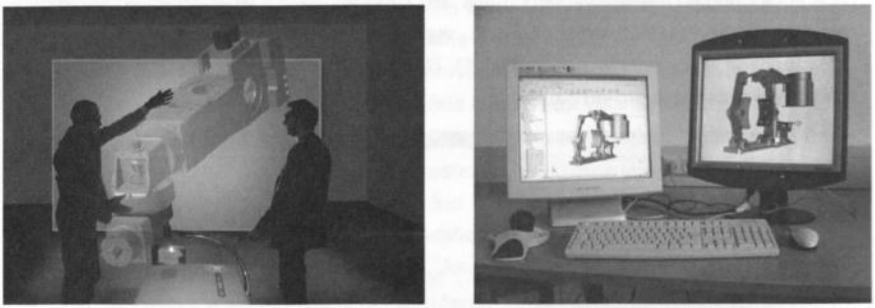


Bild 2: Powerwall und autostereoskopisches Display (SeeReal) als praktikable VR-Hardware in Arbeitsplatznähe des Entwicklers

3. CAD – VR Integration

Zielstellung der Entwicklung war es, die iterative Vorgehensweise bei der Gestaltfindung und Strukturentwicklung von Produkten durch eine PLM-Prozessintegration der beteiligten Sub-Systeme CAD und VR besser zu unterstützen. Jeder Konstrukteur soll VR nutzen können, ohne sich Gedanken über die Datenaufbereitung, das Erstellen von VR-Szenen oder die Aktualität der Modelle machen zu müssen. Dazu muss die Konsistenz der Daten im CAD- und VR-System gewährleistet sein, d.h. sowohl die Produktstruktur als auch die Teilegeometrien in beiden Systemen müssen ständig aktuell gehalten werden. Dies geschieht über das PLM-System, welches neben der Produktstruktur und den nativen CAD-Files nun auch alle für den VR-Einsatz erforderlichen Informationen verwaltet. Bei der Umsetzung am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD der Technischen Universität Dresden wurde auf die Integrationsplattform J2xPLM [3] des Dresdner Unternehmens xPLM zurückgegriffen. Diese enthält bereits alle üblichen CAD-PLM-Integrationsfunktionen zu einer Vielzahl verschiedener CAD- und PLM-Systeme (Bild 3). Erweitert wurde die Plattform um einen VR-Connector, der sowohl die Ansteuerung des VR-Systems erlaubt, als auch die direkte Kommunikation von VR- und CAD-System ermöglicht.

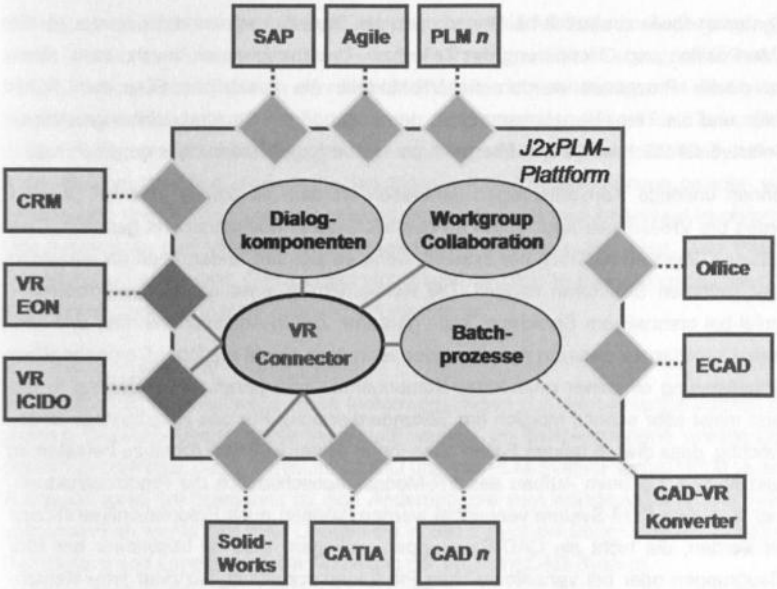


Bild 3: VR-Connector als Bestandteil einer Integrationsplattform (Quelle: xPLM GmbH)

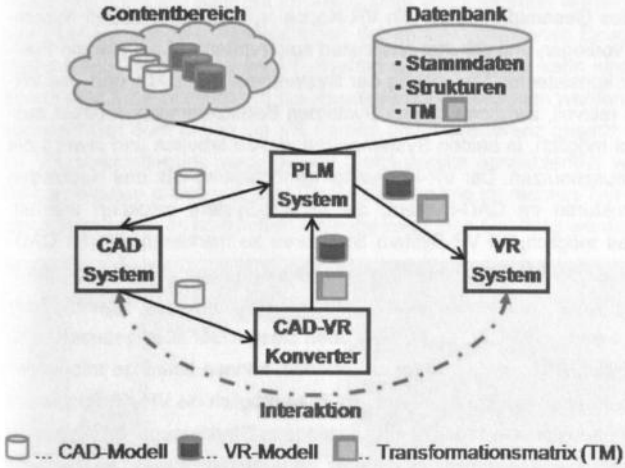


Bild 4: Architektur der CAD-VR-PLM-Integration

Bei jedem Speichervorgang werden die Metadaten sowie die nativen CAD-Files wie gewohnt direkt dem PLM-System übergeben (Bild 4). Zusätzlich übernimmt ein im Hintergrund laufender batch-Konverter die Bereitstellung der VR-Modelle. Dazu werden zum einen alle Einzelteile in ein VR-Modell der Wahl umgewandelt (VRML, JT oder auch ein natives Format

des VR-Systems) sowie zusätzlich bei Baugruppen die Transformationsmatrizen erzeugt, die die korrekte Position und Orientierung der Teile bzw. Unterbaugruppen beschreiben. Nach Abschluss dieses Prozesses werden die VR-Modelle als zusätzliche Files den PLM-Stammdaten und die Transformationsmatrizen den zugehörigen Strukturbeziehungen zugeordnet. Selbstverständlich wird zuvor überprüft, ob es überhaupt Änderungen gegeben hat.

Damit können unnötige Konvertierungen vermieden werden. Ist bereits eine VR-Session aktiv, werden die VR-Modelle auch sofort an das VR-System übermittelt und geladen. Dies ist bei größeren Objekten natürlich nur sinnvoll, wenn es sich um Änderungen an einzelnen Teilen oder kleineren Strukturen handelt. Die Konvertierung eines kompletten Produktes, zum Beispiel bei erstmaligem Speichern, kann geraume Zeit in Anspruch nehmen und wird üblicherweise simultan zu anderen Arbeiten oder auch über Nacht erfolgen. Demgegenüber ist die Aktualisierung einzelner geänderter Komponenten und deren Aktualisierung in der VR-Session meist sehr schnell möglich (im Sekundenbereich). Für den Konstrukteur ist besonders wichtig, dass dies in beiden Fällen ohne ihn in seiner weiteren Arbeit zu belasten im Hintergrund abläuft. Da beim Aufbau des VR-Modells ausschließlich die Produktstrukturinformationen aus dem PLM-System verwendet werden, können auch Produktkonfigurationen bearbeitet werden, die nicht als CAD-Baugruppen vorliegen. Dies ist besonders bei sehr großen Baugruppen oder bei variantenreichen Produkten vorteilhaft, wo zwar jede Komponente vollständig ausgearbeitet ist, nicht aber jede denkbare Kombination. In diesen Fällen ist eine projektspezifische Vereinbarung über globale Positionierungen erforderlich, z.B. auf das Koordinatensystem des Gesamtproduktes. Die VR-Kopplung nutzt dann soweit Assembly-Strukturen, wie diese vorliegen und schaltet ansonsten automatisch auf die globale Positionierung um. Neben der konsistenten Verwaltung der Bestandteile des CAD- und des VR-Modells ist es besonders reizvoll, zwischen beiden Systemen Benutzereingaben direkt auszutauschen. Es wird dann möglich, in beiden Systemen parallel zu arbeiten und jeweils die systemeigenen Vorzüge auszunutzen. Der VR-Konnektor ermöglicht so z.B. das Nachladen und Bearbeiten von Strukturen im CAD-System, die im VR-System selektiert wurden. Umgekehrt ist es jederzeit möglich, im VR-System Strukturen zu markieren, die im CAD-System selektiert wurden. Eigenschaften dieser Strukturen können dann zielgerichtet geändert werden, z.B. Änderung der Transparenz eines Gehäuseteiles, um innenliegende Teile besser sehen zu können, während im CAD-System an eben diesem Gehäuse geändert wird. Um die Aussagefähigkeit des VR-Modelles weiter zu erhöhen, können beliebige Informationen des PLM-Systems zusätzlich visualisiert werden. So ist es möglich die VR-Komponenten in Abhängigkeit ihres Freigabestatus einzufärben, verschiedene Strukturzugehörigkeiten zu markieren oder unterschiedliche Änderungszustände zu visualisieren. Besonders bei sehr großen Baugruppen ist es hilfreich, dass im VR-System auch übergeordnete Baueinheiten (in Bezug zu dem im CAD-System bearbeiteten Modell) geladen werden können. Dabei werden Mehrfachverwendungen berücksichtigt und die Auflösung in eine frei wählbare Strukturebene wird unterstützt. Einbauuntersuchungen von Teilen und Baugruppen auch in verschiedenen Verwendungen sind so sehr leicht möglich.

Ein bekanntes Problem von VR-Systemen ist, dass im CAD berechnete Bewegungssimulationen nicht ohne weiteres visualisiert werden können, weil die Baugruppen-Constraints nur im CAD wirksam sind. Deshalb erfordern kinematische Untersuchungen im VR-System meist zusätzliche Aufwendungen zur Formulierung der Bewegungsabläufe der Teile. Der entwickelte VR-Connector erlaubt dagegen die unmittelbare Nutzung der im CAD-System berechneten Bewegungsdaten, wenn in beiden Systemen gleiche Baugruppen geladen sind. Veränderungen von Position und Orientierung der in einen Bewegungsablauf involvierten Bauteile werden an das VR-System übertragen. Dort wird dann für diese Teile Position und Orientierung neu gesetzt. Damit ergibt sich visuell die gleiche Bewegungsdarstellung wie im CAD, ohne dass besonderer Aufwand erforderlich ist.

4. Beispielszenario

Am Beispiel einer Schaltwelle eines Motorradgetriebes soll die Leistungsfähigkeit des integrierten CAD-VR-Arbeitsplatzes dargestellt werden. Im Beispielszenario werden das CAD-System SolidWorks, das VR-System IC:IDO und das PLM-System mySAP/PLM verwendet.
Ausgangspunkt des Szenarios ist eine Änderung, die vom Konstrukteur an der Schaltwelle vorgenommen wurde. Die linke Darstellung in Bild 5 zeigt die Baugruppe der Schaltwelle mit Radkörpern und Lagern nach der Änderung der Welle im CAD-System.
Nach der Konstruktionsänderung muss geprüft werden, ob die Baugruppe Schaltwelle noch in allen Produkten verbaut werden kann, oder ob dort ebenfalls Änderungen notwendig sind. Diese Prüfung kann sehr gut im VR-System vorgenommen werden. Zunächst werden über das PLM-System alle Verwendungen der im CAD geladenen Baugruppe gesucht und eine gewünschte Verwendung ins VR-System geladen. Dabei kann eine beliebige Anzahl übergeordneter Strukturebenen in die Visualisierung einbezogen werden. Vorm CAD-System aus können nach dem Laden ins VR Farben und Transparenz gesetzt werden, ebenso können im VR beispielsweise verdeckende Gehäuseteile ausgeblendet werden. Zur Prüfung der Einbausituation ergibt sich die VR- Darstellung wie im rechten Teil der Bild 5, die die geänderte Schaltwelle im kompletten Getriebe zeigt. Das Gehäuse wurde teilweise ausgeblendet.

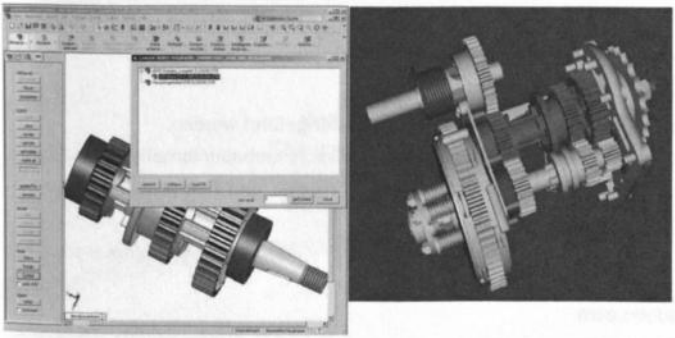


Bild 5: Geänderte Baugruppe im CAD-System und parallel geladener Baugruppenkontext im VR-System

Im Ergebnis der Einbauüberprüfung ergibt sich, dass ein weiteres Teil von der Änderung betroffen ist. Dies könnte der Gehäusedeckel sein, in dem die Welle gelagert ist. Im VR-System kann nun das entsprechende Teil selektiert werden (Markierung in Bild 6, linke Seite) und die Selektion ans CAD-System übergeben werden. Dort wird das entsprechende CAD-Dokument aus dem PLM-System ausgecheckt und geladen (Bild 6, rechte Seite).

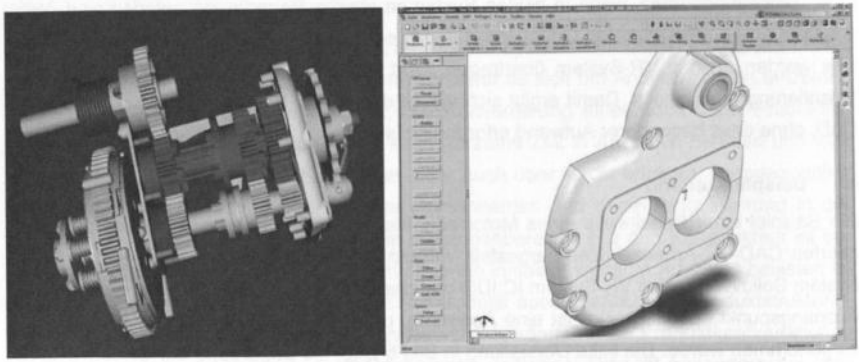


Bild 6: Laden eines CAD- Dokuments nach Selektion im VR- System

Nach der Änderung im CAD-System, die sich auf ein einzelnes Teil oder wenige Teile bezieht, können die geänderten Teile in das VR-System nachgeladen werden, ohne die komplette VR-Szene neu zu erstellen. Damit ist ein sehr zeiteffizienter Änderungs- und Bewertungszyklus von Konstruktionen möglich.

5. Zusammenfassung

Die beschriebene Lösung zeigt, dass die Grundlage eines effizienten VR-Einsatzes ein konsistenter Datenbestand ist, der gleichermaßen für CAD- und VR-System genutzt werden muss. Auf dieser Grundlage lassen sich notwendige Arbeitsschritte bei der Produktentwicklung der CAD- bzw. der VR-Komponente zuordnen. Letztlich kann über eine geeignete Interaktionsschnittstelle zwischen beiden Systemen die

- Geometrie- und Strukturdefinition im CAD mit den
- DMU-Funktionen zur Bewertung im VR

in einen sehr effizienten iterativen Arbeitsablauf zusammengeführt werden.
Die gesamte Lösung ist derzeit bei einem namhaften Maschinenbauunternehmen im Einsatz und wird vorrangig im Review-Prozess von Hauptbaugruppen und Komplettmaschinen eingesetzt.

6. Quellen

[1] http://www.adobe.com
[2] http://www.jtopen.com
[3] http://www.xplm.com

Optimierung der Produktentwicklung, hier am Beispiel von Kaltumformteilen

Siegfried Jende

Peiner Umformtechnik GmbH

Kurzfassung

Die Produktentwicklung in der Kaltumformung ist auf die frühzeitige Zusammenarbeit mit dem Kunden angewiesen. Die Komplexität der Umformvorgänge bedingt zudem den Einsatz von IT-Werkzeugen zur Simulation von Umformverhalten, Lebensdauer und zur Gestaltung der Werkzeuge.

Abstracts

The product development in the cold forging is dependant on early co-operation with the customer. The complexity of the forging process causes besides the use from IT-tools to the simulation of transforming characteristics, life span and for the construction of the tools.

Grundlagen des Umformens

Das Umformen ist eine Produktionstechnik, die seit dem 19 Jahrhundert eingesetzt wird und seit Ende des 2.Weltkrieges einen starken Aufschwung genommen hat.
DIN 8582 definiert Umformen als: Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers unter Beibehaltung von Masse und Werkstoffzusammenhang. Signifikante Kenngrößen sind das Formänderungsverhältnis und der Umformgrad. (Bild 1)
Kaltumformen wird überwiegend bei Fertigungslosen ab 5000 Stück und einem Stückgewicht bis zu 1000g angewendet.
In der industriellen Anwendung kommt die Kaltumformung vor allem dort zum Einsatz, wo Massenteile gefragt sind, also im Automobilbau, im Maschinen- und Flugzeugbau (Verbindungselemente, Verzahnungen, und Konstruktionsteile).

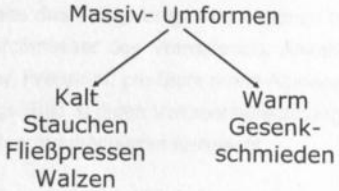


Bild 1: Einteilung nach Verfahren

Der wirtschaftliche Einfluss und die Bedeutung, der unter dem Begriff Massivumformung zusammengefassten Produkte, lassen sich nicht abgrenzen. Um eine Größenordnung zu nennen: Allein der deutsche Schraubenverband vertritt ca. 200 Hersteller mit einem Umsatzvolumen von 3,2 Mrd. Euro bzw. 650.000 Tonnen pro Jahr.

Entwicklungsschritte in der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie ist die Entwicklung eines Moduls ein kontinuierlicher Prozess. Module bezeichnen Zusammensetzungen von Fahrzeugkomponenten z.B. Motor, Antriebsstrang, Chassis und Aggregaten z.B. Klimaanlage, Kühler.

So greift der Konstrukteur z.B. bei der Achskonstruktion für eine bestimmte Baureihe auf Erfahrungen zurück, die mit der Vorgängerbaureihe gemacht wurden und versucht, die technische Lösung hinsichtlich Funktion, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Der Entwicklungsprozess dauert je nach Hersteller und Modell zwischen 14 und 26 Monaten (Bild 2, [1]).

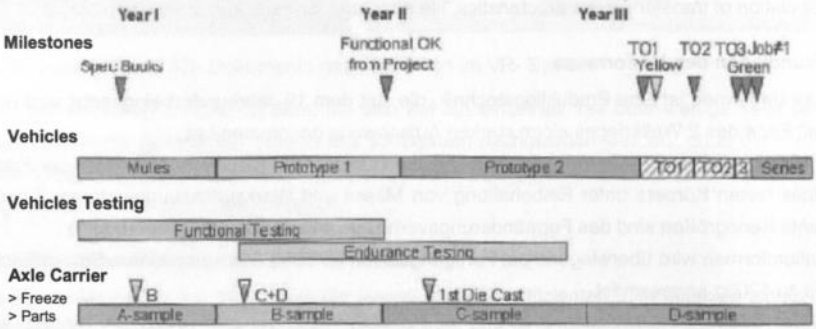


Bild 2. Entwicklungsterminplan

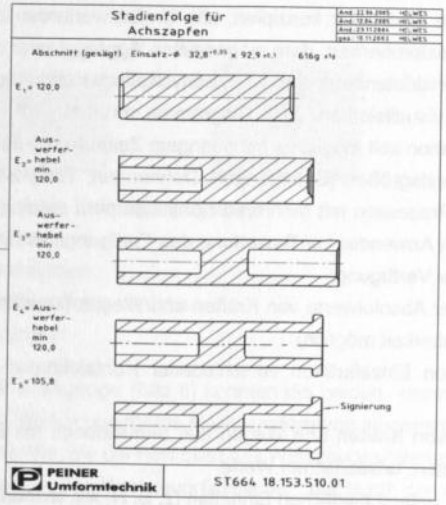


Bild 3: Stadienfolge

Bei einem neuen Automobilprojekt kommt der klassische Zulieferer entweder mit dem Systemlieferanten (TIER1) oder dem Originalgerätehersteller (OEM) direkt in Verbindung. Meist liegt schon ein technischer Entwurf vor, so dass der Zulieferer die vom Entwickler vorgegebene Zeichnung hinsichtlich der Machbarkeit sowie der Arbeitsschritte/-folge bewerten muss. Der Systementwickler ist gehalten, Änderungen an seiner Konstruktion vorzunehmen, wenn sich seine Konstruktionen durch die Prozesse seines Zulieferers nicht wirtschaftlich umsetzen lassen; z.B. verändern der Aufnahme für den Zapfen an einem PKW-Achsträger, wenn der entsprechende Achszapfen nur in bestimmten Toleranzen wirtschaftlich gefertigt werden kann.

Bei der Auslegung des Bauteils, hier Achszapfen, hat der Konstrukteur anhand der Kundenzeichnung zuerst den Pressrohling zu entwerfen. Dazu muss der Konstrukteur bestimmen, auf welcher Mehrstufenpresse das Teil gefertigt wird. Kriterien hierfür sind: benötigte Scherkraft für Festigkeit und Durchmesser des Vormaterials, Anzahl der Pressstufen, Gesamtpresskraft der Maschine bzw. Presskraft pro Stufe sowie Abmessungsbereich der Maschine. Danach wird die Stadienfolge (Bild 3) durch Volumenberechnung unter Berücksichtigung von vorgegebenen Napf- und Stauchverhältnissen festgelegt.

IT- Unterstützung für die Konstruktionstätigkeit

Anhand des zu verformenden Werkstoffes simuliert der Konstrukteur den Stoff-Fluss und den Umformgrad mittels Simulationsprogrammen z.B.

- Simufact.forming; Vertriebspartner: Femutec, Hamburg
- DEFORM F2 bzw. F3; Firma Kistler-Igel GmbH, 71101 Schöneich
- QForm Ingenieurbüro Muntinga, Lüdenscheid.

Simulationsprogramme sind dafür konzipiert, alle Umformverfahren zu unterstützen, unabhängig von der Prozesstemperatur, dem eingesetzten Aggregat oder dem verarbeiteten Material. Über eine Materialdatenbank sind wärmephysikalische und elastisch-plastische Materialkenngrößen sowie visualisierbare ZTU- Diagramme abrufbar.

Bei der Umformsimulation soll möglichst mit geringem Zeitaufwand der Bereich und der Zeitpunkt kritischer Zustandsgrößen (Spannungen, Dehnungen, Temperatur, etc.) erkannt werden. Bei komplexen Prozessen mit mehreren Kontaktkörpern (bedingt durch die Werkzeugumgebung) steht dem Anwender zur Bewertung des Fertigungsprozesses mit einem "Mausklick" im Einzelnen zur Verfügung:

- Darstellung der Absolutwerte von Kräften und Wegen (koordinatensystem- unabhängige Vergleichbarkeit möglich)
- Summieren von Einzelkräften verschiedener Kontaktkörper (Werkzeuge) zu einer Gesamtkraft
- Umrechnung von Kräften und Wegen aus Simulationen mit Symmetriebedingungen auf die gesamten, tatsächlichen Werte
- Darstellung in unterschiedlichen Einheiten (z. B. N, kN, tonnen)
- Transformation der Kraft- und Wegeverläufe auf einen gemeinsamen zeitlichen Endpunkt (wichtig bei der gemeinsamen Darstellung der Stufenkräfte eines mehrstufigen Umformprozesses in einer Transferpresse)
- Integration von Kraft-Weg-Verläufen zur Ermittlung der aufgezehrten Prozessenergie/ Arbeit

Auch das schnelle Erstellen von „Movies" und Bildern ist eine große Hilfe bei der Auswertung von Simulationsergebnissen.

Im Falle des Achszapfens ging es darum festzustellen, ob der Bund des Außendurchmessers voll ausgeformt wird und ob dort im kritischen Bereich eine Werkstofffältelung auftritt (Bild 4).

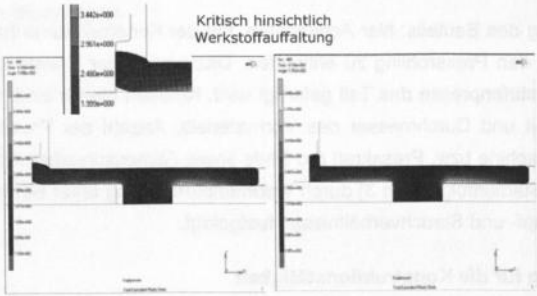


Bild 4: Simulation Materialfluss

In anderen Fällen wird eine Vorhersage über den Werkzeugverschleiß und die Optimierung des Kaltfließpressens getroffen. So wird in Bild 5 das Kaltfließpressen eines Befestigungsbolzens in 4 Schritten auf einer Kaltpresse dargestellt.

Bild 5: Simulation Stadienfolge Befestigungsbolzen
Stufe 1: Anstauchen
Stufe 2: Kopf vorstauchen
Stufe 3: Kopf mit Bund fertig stauchen
Stufe 4: Bund abgraten

Durch Modifizierung der Werkzeuge (Bild 6) konnten die beiden entscheidenden Einflüsse auf die Lebensdauer der Werkzeuge für die Massivumformung eingegrenzt werden:

- zu hohe Prozesskräfte, die die Festigkeit des Werkzeuges/Werkstoffes überschreiten
- Matrizenverschleiß an den Werkzeugrückflächen, der durch den hohen Druck und die Bewegung des Umformgutes entsteht.

Bild 6: Lebensdauerabschätzung mit FEM zur Standzeitoptimierung an einer Fließpressmatrize [2]

Nach der FEM- Berechnung kann die komplette Werkzeugkonstruktion beginnen. Dabei wird auch die Werkzeugzusammenstellung erstellt. Im Falle des Achszapfens wird über 4 Stufen gepresst. Hierzu werden CAD-Programme verwendet; wie zum Beispiel:

- AutoCAD, Firma Autodesk, USA
- Mechanical 2007 (2D), Inventor 11.0 (3D), Firma Autodesk, USA
- Catia v5, Dassault Systems, F
- Pro Engineer, Parametric Technology, USA

In CAD-Programmen werden sämtliche Objekte zwei- oder bei Bedarf dreidimensional aufgebaut. Daraus werden dann Zeichnungen vom Werkstück (in der Regel ein Einzelteil) und Werkzeug abgeleitet. Die Werkzeuge werden aus dem System heraus gleich in Werkzeugstücklisten aufgegliedert. Leider ist die Technik noch nicht soweit, diese Stückliste als Bedarfsliste automatisch ins PPS-System der Fertigungssteuerung zu übernehmen. Besonders zeitsparend bei den gängigen CAD-Systemen sind folgende Merkmale:

- voll **parametrisch**: alle Geometrien sind vollständig bemaßt, eine Änderung eines Bemaßungswertes bewirkt eine entsprechende Änderung der Geometrie.
- **bidirektional assoziativ**: Änderungen eines Modells werden in allen Anwendungen des Modells, wie Baugruppe, Zeichnung oder auch abgeleitetes NC-Modell aktualisiert. Eine Änderung eines Bemaßungswertes in der abgeleiteten Zeichnung bewirkt wiederum die Änderung des zugrundeliegenden 3D-Modells.
- **konstruktionselemente-basiert**: Modelle werden aus wenigen konstruktions- und fertigungstypischen Elementen aufgebaut, wie z. B. Körper werden aufgrund einer Skizze gezogen oder rotiert.

Praktischer Einsatz

Anschließend werden Muster auf Serienmaschinen gefertigt (gem. Forderungen des Qualitätsmanagements in der Automobilindustrie; VDA 6 Teil 1 bzw. TS 16949). Das „Einfahren" wird vom Konstrukteur begleitet, um Werkzeugänderungen oder um kleinere Werkzeugabstimmungen durchzuführen (Bild 7)

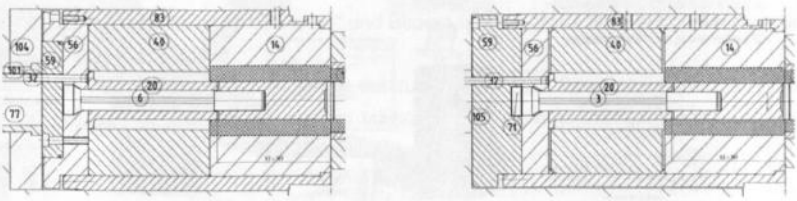


Bild 7: Problembehandlung beim Pressen

Vorher:	Bruch des Deckels (59) beim Napfen
Nachher:	3 Stifte (17) werden direkt durch den Deckel geführt, der gewonnene Einbauraum dient zur Deckelverstärkung.

Nach dem Pressen erfolgt eine Wärmebehandlung, um dem Material die entsprechenden Zähigkeits- und Festigkeitswerte zu geben. Danach wird der PKW Achszapfen in den Bereichen mit der größten Umformung sowohl an der Außenkontur, als auch an der Innenkontur einer 100%-igen Wirbelstromrissprüfung unterzogen.

Weiterbearbeitung

Anschließend erfolgt die Zerspanung, um das Teil in die endgültige Form zu bringen. Der Zerspaner ist eher ein Fertigungstechniker, als ein Konstrukteur. Er muss die gängigen spanenden Verfahren kennen und gute Kenntnisse über die benötigten Werkzeuge und deren Eigenschaften (z. B. Multifunktionswerkzeug, Schnittgeschwindigkeiten, Standzeiten) sowie die modernen Werkzeugmaschinen haben. Die Investitionen in Werkzeugmaschinen entscheiden mit über den Teilepreis, da Konstruktionsteile Kontraktlaufzeiten zwischen 3 und 6 Jahren haben. So kann eine Entscheidung für die Investition in eine Einzweckmaschine, die in der Anschaffung günstiger und in der Taktzeit schneller ist oder für eine Mehrzweckmaschine, die in der Anschaffung teurer und meist, da nicht komplett auf die Bedürfnisse zugeschnitten, auch etwas langsamer taktet, fallen. Die Mehrzweckmaschine hat allerdings den Vorteil, dass sie nach Auslauf auch für andere Teile wieder verwendet werden kann.
Bei der Außenzerspanung wird ein Passsitz erzeugt. Jeder Passsitz wird an 3 Stellen dynamisch ausgemessen.
Das Teil rotiert beim Vermessen von Größt- und Kleinstmaß. Die daraus gebildeten Mittelwerte werden zur Maßkompensation verwendet.

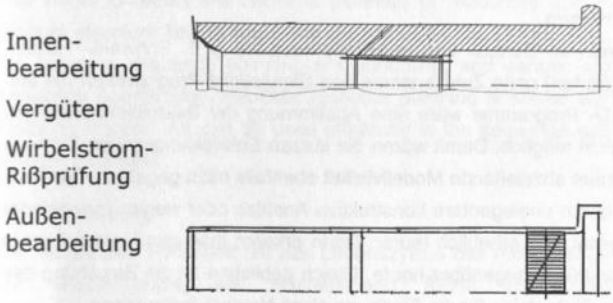


Bild 8: Arbeitsfolge Zerspanung

Die heutige Produktentwicklung ist eingebunden in eine lückenlose Datengängigkeit entlang des Herstellungsprozesses von der Entwicklung bis zum Einsatz des Bauteiles beim Kunden. So wird die geforderte Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit gewährleistet.

Netzwerk des Konstrukteurs

Um der dynamischen Entwicklung von Fertigungsverfahren, Prozessen und Technologien der Massivumformung Rechnung zu tragen, gibt es im 1 - 2 jährigen Rhythmus im deutschsprachigen Raum mehrere wichtige Veranstaltungen, zu denen sich die Fachleute und das interessierte Publikum treffen, um sich auszutauschen. Hier seien die wichtigsten aufgezählt:

- VDI- Gesellschaft Produktionstechnik

Jahrestreffen der Kaltmassivumformer
jährlich Februar/März

- Deutscher Schraubenverband e.V. in Zusammenarbeit mit Materialprüfungsanstalt (MPA) mit der Technischen Universität Darmstadt
  Informations- und Diskussionsveranstaltung Schraubenverbindungen
  alle 3 Jahre im Mai
- VDI Wissensforum IWB GmbH in Zusammenarbeit mit der Infostelle Industrieverband Massivumformung e.V
  Kundentagung „Massivumformung"
  jährlich September
- Institut für Umformtechnik an der Universität Stuttgart
  Internationale Konferenz neuerer Entwicklungen in der Massivumformung
  alle 2 Jahre Mai/ Juni

Zusammenfassung

Die Technik hat sich in den letzten 20 Jahren rasant entwickelt. Bestimmte konstruktive Bauteiländerungen wären durch Verbesserung des Materials z.B. weg vom hydraulischen Einstellstößel hin zum einteiligen Einstellstößel (weil verschleißfest) überhaupt nicht möglich gewesen.
So wären komplexe Formen im Bereich von Hohlfließpressteilen (z.B. Schweiß- Hülsen, Fahrschemelbolzen, Achszapfen) ohne Zuhilfenahme von Simulations-Programmen nie entwickelt worden. Ohne CAD- Programme wäre eine Abstimmung der Bauteillieferanten mit dem OEM in kurzer Zeit nicht möglich. Damit wären die kurzen Entwicklungszeiten für neue Modelle sowie die sich daraus abzuleitende Modellvielfalt ebenfalls nicht gegeben. Die technischen Lösungen wären durch unelegantere konstruktive Ansätze oder wegen mangelnder Werkzeug und Materialausnutzung erheblich teurer. Darin erkennt man den Unterschied in der Konstruktionsarbeit von früher gegenüber heute. Gleich geblieben ist die Begabung des Konstrukteurs, die optimale Stufenfolge für die Fertigung eines Neuteils festzulegen.

Quellen

[1] Krüßmann, M.: Vortrag „Innovationsfeld Antriebsstrang" gehalten anlässlich der internationalen Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung", Juni 2005, Stuttgart

[2] Hänsel, Meidert, Keppler-Ott: Vortrag „Der Werkzeugbau in der Kaltmassivumformung" gehalten anlässlich der internationalen Konferenz „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung", Juni 2005, Stuttgart

Heuristische Methoden für Ressourcengerechte Konstruktionsprozessplanung und Optimierung

Tibor Bercsey, Tamas Rick

Technische und Wirtschaftwissenschaftliche Universität Budapest

Lehrstuhl für Maschinen Konstruktionslehre

Kurzfassung

Der Artikel stellt die Methode der Konstruktionsplanungsprozesse geeignet für die Optimierung der Reihenfolge auf Produktstrukturbasis und die heuristische Planung der Ressourcen vor. Als Grundlage der Reihenfolgenplanung und Modellierung wird die Design Structure Matrix benutzt, und für die Reihenfolgenplanung werden genetische Algorithmen angewandt. Die heuristische Ressourcenplanung wird durch verschiedene Heuristiken gelöst. Die ausgearbeiteten Verfahren können effektiv für die reihenfolgen- und ressourcengerechte Planung der der Planungsprozesse verwendet werden.

Abstracts (optional)

The paper presents the heuristic planning of resources and the method applicable for product structure based sequence optimization. The Design Structure Matrix was used as the basis of sequence planning and modeling, and genetic algorithms were applied for sequence optimization. Heuristic resource planning is solved with different heuristics. The methods worked out can be used efficiently in the sequence and resource optimization of design processes.

1. Einleitung

Der technische Fortschritt hat das Lebenszyklus des Produktes und Systems reduziert und die Globalisierung der Handelsmarkt führte zu komplexen und unsicheren Geschäftsbedingungen.

Für die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeiten kommt deshalb dem Produktentwicklungsprozess als dem Prozess, in dessen Rahmen über Produkteigenschaften und Entwicklungszeiten entschieden wird, eine besondere Bedeutung zu. Der Prozess kennzeichnet das eigentliche Vorgehen im Projekt zur Herstellung des Produkts; er beschreibt also den Planungs- und Realisierungsablauf. Im Prozess werden die für die Zielerreichung notwendigen Aktivitäten — gemeinhin als Arbeitspakete bezeichnet — in definierte Abläufe eingeordnet, wobei die jeweils notwendigen Vorgaben sowie die zu erreichenden Ergebnisse bindend festgelegt sind [1].

2. Prozessmodellierung und Optimierungssystem

Für die Beschreibung der Planungsprozesse wird die Design Structure Matrix verwendet, die eine verbreitete und leicht behandelbare Lösung ist, sogar im Falle von größeren Aufgaben [2].

Die Strukturelemente des Produkts A_i (i=1,2,...,n) ergeben nach Reihenfolge (S.E.) die Matrix auf Abbildung 1., und deren Darstellung auf Blockdiagramm (Abbildung 2). Die Elemente der Diagonale repräsentieren sich selbst, d.h. $a_{ij}=0$ ($i=j$). Die weiteren Elemente der Matrix dienen zur Darstellung der Beziehungen zwischen den Hauptstrukturelementen. Wenn Strukturelement A_i Information an A_j gibt, dann ist $a_{ij}=1$, ansonsten ist $a_{ij}=0$, das bedeutet, dass es keine Beziehung zwischen Elementen A_i und A_j gibt. Wenn für Element der Matrix wahr ist, dass $a_{ij}=1$, und $i<j$, ist dieses Element über die Diagonale und es bedeutet eine Feed Forward Beziehung, falls $i>j$, ist das Element unter der Diagonale, und es bedeutet Feedback, oder Zyklus, oder Iteration.

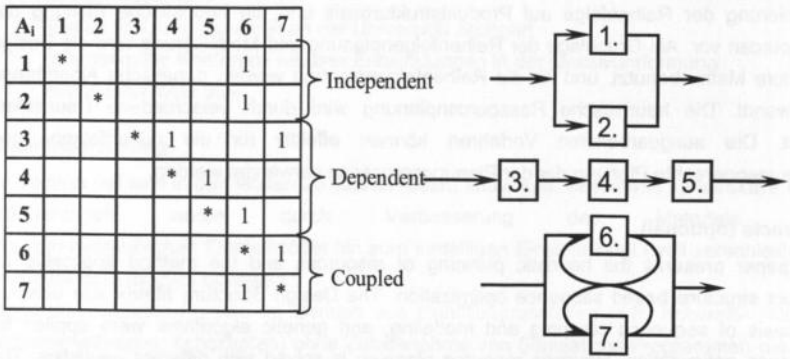


Abb. 1: Graphische Ausführung von DSM

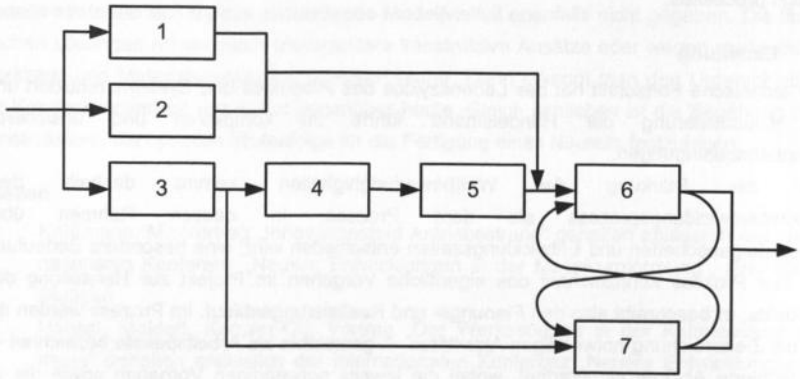


Abb. 2: Ausführung von DSM zum Blockdiagram

Im günstigen Fall können durch Vertauschen von Reihenfolgepositionen Iterationen vermeiden oder verkürzt werden. Diese Reihenfolge Optimierung erfolgt mit Hilfe genetischen Algorithmen.

Genetische Algorithmen (GA) sind eine mathematische Methode, deren Grundidee mit der Evolutionstheorie aus der Natur stammt. Es geht darum, Lösungen zu Problemen zu finden,

die nicht einfach so berechnet werden können, sondern durch Ausprobieren gesucht werden müssen [3]. Die Operatoren des genetischen Algorithmus, und deren Einstellungen müssen in allen Fällen aufgabenspezifisch angepasst werden. Der Algorithmus verwendet die Individuen in unkodierter Form, d.h. ein Individuum beinhaltet die Reihenfolgennummer der Aufgaben einer angegebenen Reihenfolge.

2.1. Selektion [4]

Als Selektionsverfahren wurde die „Tournament" Selektion gewählt, die aus den zufällig hergestellten Individuen (eine Planungsreihenfolge, Aufgabenreihenfolge) zwei auswählt, und dann deren Fitnesswert vergleicht, was in unserem Fall die Durchlaufzeit und Kosten der Planung sind.

2.2. Rekombination und Mutation [4]

Mehrere Rekombinationsmethoden sind bekannt, davon untersuchten wir die Effektivität von One Point Crossover und der von uns entwickelten volle Kreuzung.

Die Funktion des Operators basiert darauf, dass die Kreuzung nicht auf Erfüllungsabschnitten, sondern zufällig, auf mehreren Punkten markierten Stellen angewandt wird. Im Laufe des Prozesses werden auf den markierten Stellen die sich auf dieser Stelle befindliche Gene aus Parent B in das Chromosom von Parent A überschrieben. Darauf folgt der Fehlerberechtigungsschritt, wenn die früher von B übernommenen Werte in Deszendent A gesucht werden, und sie auf die früher in A vorgekommenen Werte überschrieben werden. (Abbildung 3.).

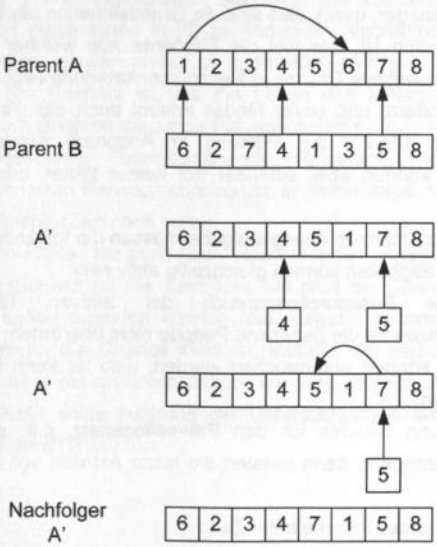


Abb. 3: Volle Kreuzung

Als Mutationsoperator haben wir die One Point Crossover Mutation [Rog96] benutzt, die bei Reihenfolgenplanungsaufgaben am meisten verwendet wird, und die zwei, zufällig ausgewählte Positionen austauscht.
Wir haben die Vergleichbarkeit der Operatoren an Prozessen von verschiedenen Größen, bestehend aus 20, 30, 40, 50 und 60 Aufgaben getestet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in dieser Repräsentationsform die volle Kreuzung effektiver ist, die Suche ist dann stabil und schnell, wenn die Wahrscheinlichkeit der Mutation 0,8 ist, weil der Wert der Kreuzung 0,6 ist. Aufgrund der großen Mutationsrate könnte man auf zufällige Suche schließen, aber die Konvergenzuntersuchungen haben diese Annahme ausgeschlossen.
Das Endergebnis der Optimierung ist eine Planungsaufgabenreihenfolge die auf die Planungszeit und –kosten globales Optimum ergibt. Die zur Verfügung stehenden Ressourcen beeinflussen dies aber in allen Fällen, und bringen meistens die Erhöhung der Planungszeit mit sich. Damit die Planungszeit so wenig wie möglich verlängert wird, haben wir verschiedene heuristische Methoden ausgearbeitet.

3. Ressourcenzuordnung mit heuristischen Methoden [5]

Unter Ressourcenzuordnungsaufgabe verstehen wir die Einteilung der zur Aktivität nötigen, wieder verwendbaren (in erster Linie humanen) Ressourcen. Wir nehmen an, dass wir der Anfangszeitpunkt des gegebenen Projekts, die volle Planungszeit τ (die praktische Zeitgrenze der Planung), die Dauer der Aktivitäten $(\tau_1,\ldots,\tau_n)$, die auf die Ressourcen bezogenen Begrenzungen, weiterhin das Präventionsnetz (in jetzigem Fall die DSM) ist. Die Ressourcen können in sog. Ressorcenkategorien eingeteilt werden (Ingenieur, FEM-Ingenieur, Zeichner, Manager, usw.), dies sind die Grundeinheiten der Ressourceneinteilung. Vorhergehende Information ist, wie viel die Elemente aus welcher Ressourcenkategorie erfordern, und wo die quantitive Grenze je Ressourcenkategorie liegt. Die Grenzen können sich mit der Zeit verändern, und unser Modell erlaubt auch das Fehlen der Begrenzung (beliebige Ressourcen können zur Planung in Anspruch genommen werden). Die Ressourcenkategorien können aber einander auf keiner Weise oder nach keiner Regel ersetzen.
Die Lösungen der Ressourcenzuordnungsaufgabe müssen die folgenden Kriterien erfüllen:

- auch mehrere Tätigkeiten können gleichzeitig aktiv sein;
- der kumulierte Ressourcenanspruch der aktiven Tätigkeiten darf die Ressourcengrenzen für die gegebene Periode nicht übertreten;
- die Tätigkeiten können unterbrochen werden, also es kann Pause zwischen zwei Aktivitäten geben;
- bei der Einteilung beachte ich den Präventionsnetz, d.h. wenn Tätigkeit a_{ij} die Tätigkeit a_{kl} vorangeht, dann passiert die letzte Aktivität von a_{ij} früher als die erste Aktivität von a_{kl};
- alle Tätigkeiten enden innerhalb der Zeit τ.

Das Ziel ist, dass wir die Lösung mit der möglichst kürzesten effektiven Zeit (Ende der letzten Tätigkeit) für die Ressourcenzuordnungsaufgabe finden.

Durch den genetischen Algorithmus können wir aus der Matrix des auch nach der Dauer optimierten Planungsprozesses mit sog. „Ausfalten" ein gerichtete Graf bekommen können. Die Spitzen des Grafs werden Planungsprozesse versehen mit Versionsnummer, wo die Versionsnummer auf die Wiederholung der gegebenen Aufgabe hinweist. Die gelenkten Kanten sollen den Informationsfluss zwischen den oben definierten Aufgaben markieren. Unter den Einflüssen des Ausfaltens verschwinden die Zyklen aus dem Graf.
Die Grundlage der von uns erarbeiteten heuristischen Methode ist die zeitliche Simulation des Planungsprozesses. Während der virtuellen Planung am Ende jeder elementaren Einteilungsphase, können mit Hilfe der sog. Einteilungspolitiken einige, noch nicht zu Ende gewesene Tätigkeiten aktiviert werden so, dass keine der oben zusammengefassten Bedingungen verletzt wird. Wir unterscheiden zwischen zwei Politikfamilien. Wir haben die eine Familie Filterpolitik, die andere Reihenfolgenpolitik genannt:

- Nummer der Abbrüche Filterpolitik: Die Filterpolitik hebt solche Tätigkeiten hervor, die schon mehrmals abgebrochen wurden. Dadurch kann die Zerkleinerung einer zusammenhängenden Planungsaufgabe verhindert werden.
- Abgeschlossenheit Filterpolitik: Sie hebt solche Tätigkeiten hervor, die beinahe (90%) schon fertig sind.
- Wartenlassen Filterpolitik: Sie hebt solche Tätigkeiten hervor, der Quotient deren abgelaufenen Zeit (Wartenlassen + Arbeitszeit) und geplanten Zeit, d.h. deren Wirkungsgrad einen gegebenen Wert erreicht, in diesem Fall während der Untersuchungen 70%.
- Kritischer Weg Reihenfolgenpolitik: Sie stellt die Elemente nach deren freien Verschiebbarkeit durch einen in [6] zu findenden Algorithmus in Reihenfolge. Die Verschiebbarkeiten müssen immer so interpretiert werden, dass sie das maximale Wartenlassen des Element ist, die die Länge des kritischen Weges noch nicht verlängert (die am längsten dauernde Präventionskette).
- Dominante Ressourcen beanspruchende Reihenfolgenpolitik: Sie stellt die Tätigkeiten nach deren Ressourcenanspruch in Reihenfolge, nimmt die Elemente mit relativ großen Ansprüchen nach vorne.
- Vorausblickende Politik: sie stellt nach verschiedenen Überlegungen jeder Tätigkeit eine Wahrscheinlichkeit zu, die ausdrückt, wie groß die Chance darauf ist, dass wir die Tätigkeit später beenden können (die Aufgabe bekommt die beanspruchten Ressourcen). Wenn die Chance klein ist, müssen wir versuchen sie bevorzugen, denn die Tätigkeiten mit größerer Chance mehrere Möglichkeiten haben. Die Dauer des Vorausblickens sollte aufgrund der Untersuchungen auf die durchschnittliche Aufgabengröße gewählt werden.

Wir benutzen für die vorausblickende Politik die folgenden Zusammenhänge:

$$T_0 \in \mathrm{N}_0$$ Aktueller Moment der Simulationsperiode. (1)

$$T \in \mathrm{N}$$ Untersuchungszeitrahmen der Ordnungspolitik. (2)

$$R : [T_0 + 1..T_0 + T] \to \mathrm{N}_0 \bigcup \{+\infty\}$$ Ressourcenbegrenzungen innerhalb des Zeitrahmens für eine konkrete Kraftquelle. Wenn wir über die Simulationsperiode sind, dann $R(t) := 0$. (3)

$$A$$ Menge der in T_0 noch nicht beendeten Tätigkeiten. (4)

$$r : A \to \mathrm{N}_0$$ Ressourcenanspruch der gegebenen Tätigkeit. (5)

$$t : A \to \mathrm{N}$$ Die Restentwicklungszeit der gegebenen Tätigkeit (in T_0). (6)

$$\bar{r} := \frac{\sum_{a \in A} r(a)}{|A|}$$ Durchschnittlicher Ressourcenanspruch. (7)

$$k : A \times [T_0 + 1..T_0 + T] \to \mathrm{N}_0 \bigcup \{+\infty\}$$

$$k(a,t) := \begin{cases} +\infty & , \bar{r} = 0 \\ \left\lfloor \frac{R(t) - r(a)}{\bar{r}} \right\rfloor + 1 & , r(a) < R(t) \\ 0 & , \text{különben} \end{cases}$$ Zahl der die gegebene Tätigkeit vorbeugbaren Tätigkeiten zum gegebenen Zeitpunkt. (8)

$$p_0 : [T_0 + 1..T_0 + T] \to [0,1]$$

$$p_0(a,t) := \begin{cases} 0 & , k(a,t) = 0 \\ \frac{k(a,t)}{|A|} & , 0 < k(a,t) < |A| \\ 1 & , k(a,t) \geq |A| \end{cases}$$ Wahrscheinlichkeit der Aktivität der gegebenen Tätigkeit zum gegebenen Zeitpunkt. (9)

$$\bar{p}_0 : A \to [0,1]$$

$$\bar{p}_0(a) := \frac{\sum_{i=T_0+1}^{T_0+T} p_0(a,i)}{T}$$ Durchschnitt der Wahrscheinlichkeit der Aktivität der gegebenen Tätigkeit. (10)

$$p : A \to [0,1]$$

$$p(a) := 1 - \sum_{i=0}^{\min(t(a),T)-1} \binom{T}{i} \bar{p}_0(a)^i (1 - \bar{p}_0(a))^{T-i}$$ Wahrscheinlichkeit des Endes der gegebenen Tätigkeit aus dem Gesichtspunkt einer Kraftquelle im Zeitrahmen. (11)

$$(A, >_{\Pi p})$$ Endergebnis der Ordnungspolitik. Die zu den verschiedenen Ressourcentypen gehörenden (12)

p-s müssen multipliziert werden, so ergibt sich die endgültige Reihenfolge.

Die Untersuchung der Effektivität der Politiken ist ziemlich kompliziert, weil das Ergebnis immer von der gegebenen Ressourcenumgebung beeinflusst wird. Für die Untersuchungen haben wir solche als Benchmark verwendete Prozesse benutzt, deren Ergebnisse bekannt sind, und es auch über Ressourcenzuordnungsdaten verfügt [7]. Für das Testen haben wir die Aufgaben j3048_10 bestehend aus 30 Aufgaben, und j12048_10 bestehend aus 120 Aufgaben ausgewählt. Wir haben die Politiken sowohl einzeln, als auch in gewissen Kombinationen getestet (Tabelle 1.)

Tabelle. 1: Kombination der Politiken

Einstellungen	1	2	3	3b	4	4b	5	5b	6	7	7b
Ressourcen	0	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel
Wartenlassen Filterpolitik				+		+		+			+
Abgeschlossenheit Filterpolitik				+		+		+			+
Nummer der Abbrüche Filterpolitik				+		+		+			+
Dominante Ressourcen beanspruchende Reihenfolgenpolitik					+	+	+	+			
Kritischer Weg Reihenfolgenpolitik			+	+			+	+		+	+
Vorausblickende Politik									+	+	+

Tabelle 2. beinhaltet die Ergebnisse der Ressourcenzuordnungsaufgabe, wo die Durchlaufzeiten bekommen durch die Anwendung der Heuristiken zu sehen sind.

Tabelle. 2: Ergebnisse durch die Anwendung der Heuristiken

Ressourcenprofil und Aufgabe/Einstellung	1	2	3	3b	4	4b	5	5b	6	7	7b
j3048_10 [Tag]	54	97	102	100	109	108	104	108	96	99	102
j12048_10 [Tag]	102	180	183	183	205	217	195	179	175	204	180

Aufgrund der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass in diesem Fall die vorausblickende Politik die kürzeste Einteilung ergab. Es ist auch einzusehen, dass die Reihenfolgenstellung nach Ressourcenanspruch nicht effektiver als die Reihenfolgestellung nach dem kritischen Weg ist. Die Abgeschlossenheit und die Zahl der Abbrüche Filterpolitik zeigen keine Abweichung bei den untersuchten Prozessen, und bei der gegebenen Ressourcenumgebung.

4. Danksagung

Die Forschung wurde durch die Forschungsprojekte OTKA 68773 und MÖB-DAAD 7 ermöglicht.

5. Literatur

[1] Dondald, G., R.: Die neuen Werkzeuge der Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, Wien, 1998

[2] Steward D. V.: The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems, IEEE Transactions on Engineering Management, 1981. vol.28, pp.71-74.

[3] Vajna, S., Clement S., Jordan A., Bercsey T.: The Autogenetic Design Theory: An evolutionary view of the design process, Journal of Engineering Design, 2005. vol.16(4), pp.423-440.

[4] Rick T., Groma I.: Desgin Structure Based Tasks Scheduling Using Genetic Algorithms, Scientific Bulletin North University of Baia Mare, Serie C., 2005. vol.2, pp.231-239.

[5] Bercsey T., Rick T., Groma I., Gránicz Á.: GA-Based Flexible and Effective Task Scheduling and Resource Allocation, WMSCI 2006 Proceedings, CD & vol.1, pp.119-124.

[6] Reichert O.: Netzplantechnik, Vieweg, 1994.

[7] PSLIB: http://129.187.106.231/psplib/main.html, 2007. 05. 30.

Strukturmechanische Untersuchungen zum Druckverhalten von Drucküberträgungsmedien in geschlossenen Stahlhülsen

Enrico Kloß, Klaus Brökel

Universität Rostock

Kurzfassung

Die im vorliegenden Beitrag behandelten technischen Gebilde sind rotationssymmetrische, luftdicht abgeschlossene Stahlhülsen. Im eingeschlossenen Hohlraum befindet sich ein geeigneter Werkstoff, der einen beliebig aufgebrachten Druck hydrostatisch überträgt.
Gegenstand der Betrachtung ist die systematische Untersuchung der zahlreichen äußeren und inneren Einflüsse, welche verschiedene Auswirkungen auf das Druckverhalten des Drucküberträgungsmediums haben. Dazu gehört die Art und Weise der Kraftaufbringung, genauso wie die Wahl des Druckmediums, welches aufgrund der Hydrostatik entweder ein Fluid oder ein Elastomer sein wird. Das Ziel des Entwicklungsprozesses ist es mit minimalem konstruktivem Aufwand eine gute und dauerhafte radiale Drucküberträgung über die gesamte Stahlhülsen zu realisieren. Die Auswertung der Ergebnisse für die Druckausbreitung in geschlossenen Stahlhülsen wird sowohl durch Simulation, als auch durch Experimente unterstützt.

Abstract

This article deals with axisymmetric, airproof expansion sleeves made of steel. The void of those sleeves is filled with a proper material for transmitting pressure hydrostatically.
Main target is the methodical analysis of the countless external and internal influences, which cause different effects on the compression material's behaviour under pressure, including the methods how to set the filling material under pressure, as well as the choice of the compression material itself. This material is either a fluid or an elastomer, according to the hydrostatic pressure transmission. The development process shall lead to a good and permanent radial pressure distribution combined with a minimum of efforts on the design. The evaluation of the pressure transmission's results is provided by simulation as well as experiments.

1. Einleitung

Zum besseren Verständnis folgt an dieser Stelle eine Erklärung darüber, was unter dem Begriff „Stahlhülse" im Zusammenhang mit diesem Artikel, zu verstehen ist. Diese Stahlhülsen sind als lösungsabstrakte Objekte anzusehen, über die Erfahrungen für komplexere Konstruktionen gewonnen werden. Als Grundlage der Untersuchungen dient eine einfache Konstruktion aus zwei Rohrstücken unterschiedlichen Durchmessers, gleicher Länge und gleicher Wanddicke. Die konzentrisch angeordneten Rohrstücken werden mit

Stirnscheiben abgedichtet und verschweißt. So entsteht die luftdicht abgeschlossene Stahlhülse, welche Gegenstand der Betrachtung ist.

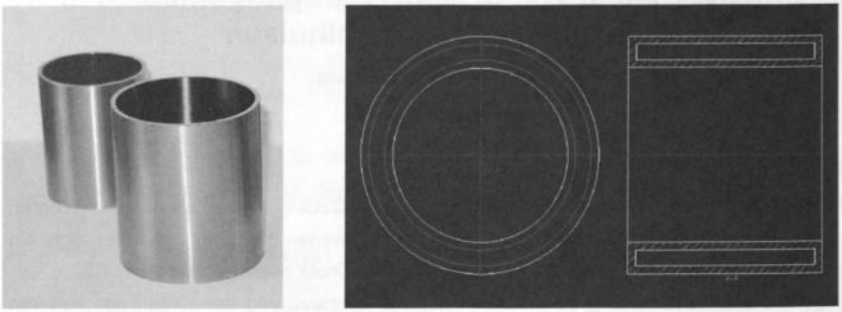
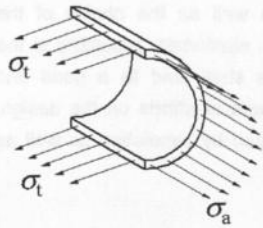


Bild 1: Rohlinge und Skizze der Stahlhülse

Die Aufgabe besteht nun darin den entstandenen Hohlraum mit einem Werkstoff zu füllen, welcher einen auf die Hülse aufgebrachten Druck möglichst permanent gleichmäßig über die gesamte Länge der Hülse überträgt. Es bleibt zu klären welches Drucküberträgungsmedium für diesen Einsatz geeignet ist und auf welche Art und Weise der Druck auf das Medium ausgeübt wird.

2. Stand der Technik

Das Verhältnis des Außendurchmessers zum Innendurchmesser, welches bei den zu verwendenden Rohren kleiner als 1,2 ist, zeichnet diese Rohre als dünnwandige Rohre aus. Mit der bekannten Kesselformel ist es möglich die mechanischen Spannungsverhältnisse in dünnwandigen Rohren, welche durch inneren Überdruck belastet sind, überschlägig zu ermitteln.



$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot s} \qquad \sigma_a = \frac{p \cdot D}{4 \cdot s}$$

Bild 2: Kesselformel (p...Innendruck, D...Innendurchmesser, s...Wanddicke)

Dabei ist die Spannung (einachsig) in Umfangsrichtung doppelt so groß wie die Spannung in axialer Richtung. Die maximale Innendruckbelastung der Stahlhülse muss deshalb bei einem definierten Durchmesser nach der Wandstärke ausgewählt werden. Die Wanddicke von Rohren unter äußerem Überdruck muss mindestens gleich der Wanddicke des Rohres unter

3. Physikalische Grundlagen

Von Flüssigkeiten ist bekannt, dass ihr innerer Druck (Schweredruck + Belastungen) an jedem Punkt im Volumen gleich groß ist. Man spricht hierbei auch vom hydrostatischen Druck. Aus diesem Grund ist eine hydraulische Flüssigkeit die erste Wahl als Füllmaterial. Problematisch ist dabei die Abdichtung des Hohlraums gegen die Umwelt, um ein Austreten des Mediums zu verhindern, denn zum Einfüllen des Druckmittels ist es notwendig von außen auf den Hohlraum zuzugreifen. Auch die jeweilige Art der Kraftaufbringung kann zu Aussparungen in der Hülse und damit zu Öffnungen des Hohlraums führen, durch welche die Flüssigkeit austreten kann und die somit ebenfalls abgedichtet werden müssten.

Als zweite Wahl wäre es möglich ein Elastomer zu verwenden. Elastomere zeichnen sich für diese Anwendung zum einen dadurch aus, dass sie einen Druck nahezu hydrostatisch übertragen [2] und zum anderen bieten derartige Gummiwerkstoffe von sich aus eine Abdichtung des Hohlraums. Doch den Begriff der „nahezu hydrostatischen Drucküberträgung" gilt es genauer zu betrachten.
Richtig ist, dass Elastomere ähnlich Fluiden der Verformung einen sehr geringen Widerstand entgegen setzen (kleiner Elastizitätsmodul...E) Weiterhin sind die Querdehnungen bei Gummiwerkstoffen annähernd gleich groß (Poissonzahl...μ):

Gelatine (80% Wasser)	E = 0,20 N/mm²	μ = 0,5	
Natürliches Gummi	E = 0,86 N/mm²	μ = 0,49	[3]

Eine Querkontraktionszahl von μ = 0,5 indiziert volle Volumenkonstanz, d.h. Inkompressibilität. Somit sind Elastomere als nahezu inkompressibel anzusehen. Aus dem Elastizitätsgesetz lässt sich ableiten, dass bei Querkontraktionszahlen μ>0,49 eine Abweichung von weniger als 4% vom hydrostatischen Spannungszustand besteht. [2]

$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ hydrostatischer Spannungszustand [5]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha_T \Delta T$$ HOOKEsches Gesetz für Dehnung in x-Richtung

Es ergeben sich aber auch Probleme für die Verwendung von Elastomeren, welche sich aus den Werkstoffeigenschaften ableiten lassen. Kunststoffe weisen unter ständiger Druckbelastung ein Kriechverhalten auf. Durch dieses Kriechen kommt es zu Umstrukturierungen der verzweigten Molekülketten. Daraus resultiert eine Spannungsrelaxation, so dass man die Druckaufbringung stets nachkorrigieren müsste. Man erhält also keine gute dauerhafte Drucküberträgung. Ein zusätzliches Problem stellen eventuelle Additive in den Gummiwerkstoffen dar, da diese bei den Betriebstemperaturen und den längeren Betriebszeiten zum Ausdampfen neigen. Das Ergebnis ist eine Versprödung des Elastomers und die damit einhergehenden Einbußen bei den relevanten und essentiellen Werkstoffeigenschaften (E, μ). [4]

Eine dritte in Frage kommende Werkstoffgruppe sind die Gele, welche sowohl aus einer festen (schwammartigen, dreidimensionalen) und einer flüssigen Phase bestehen. Die Fluideigenschaften eines Gels liegen somit zwischen der einer idealen Flüssigkeit und der

eines idealen Feststoffkörpers. Die Drucküberragung in Gelen gleicht der in Flüssigkeiten und dennoch lassen sich gelgefüllte Hohlräume einfacher gegen Leckage abdichten. Leider wurden auf dem technischen Sektor bezüglich der geplanten Anwendung noch keine Erfahrungen mit diesen Werkstoffen gemacht und sie werden somit nicht weiter betrachtet.

Die Wahl des Drucküberragungsmediums fiel nach diesen Betrachtungen auf eine hydraulische Flüssigkeit. Bei der Befüllung des Hohlraums müssen Lufteinschlüsse vermieden werden. Die kompressiblen Gasbläschen verfälschen anderenfalls die Gesamtergebnisse erheblich. Zu diesem Zweck werden die Versuchshülsen mit einer niedrigviskosen Bremsflüssigkeit (ISO 4925:2005) befüllt. Die niedrige Viskosität stellt natürlich wiederum hohe Anforderungen an die Dichtungen.

Dennoch bleibt auch die Alternative in Form der Elastomere in der weiteren Entwicklung nicht unberücksichtigt. Wie gleichmäßig Elastomere in dünnen Schichten Druck übertragen können, wird derzeit in kleineren Versuchsreihen getestet, da hier die Finiten Elemente Methoden aufgrund des hydroelastischen Materialverhaltens nur unzureichende Resultate liefern können. Die Ergebnisse aus diesen Experimenten werden zu einer abschließenden Betrachtung und zur endgültigen Entscheidung über das Drucküberragungsmedium herangezogen sobald sie vorliegen.

4. Kraftaufbringung

Nachdem eine Auswahl bezüglich des Drucküberragungsmediums getroffen wurde, ist in einem weiteren Schritt das Problem zu lösen, wie die hydraulische Flüssigkeit mechanisch belastet werden kann. Das Prinzip der Kraftaufbringung muss konstruktiv unaufwendig sein. Dennoch muss der erforderliche Druck mit einer solchen einfachen Methode sicher aufgebracht werden.

Die Grundidee ist es auf den Hohlraum in der Stahlhülse zuzugreifen und ihn partiell zu verringern, um somit Druck auf das Medium wirken zu lassen. Diverse Möglichkeiten wurden diskutiert und analysiert. Die gesammelten Ideen reichen von Schrauben in den Hohlraum einzuführen, über stirnseitige Druckringe bis hin zu fingerfallenähnlichen Konstruktionen. Der Nachteil all dieser gefundenen Lösungsansätze ist der direkte Eingriff auf die im Hohlraum befindliche Flüssigkeit. Dadurch generiert man weitere Undichtheiten, welche erneut abgedichtet werden müssen.

Eine neuartige interessante Idee ist es radial auf das Außenrohr der Stahlhülse punktuellen Druck aufzubringen. Um eine möglichst große lokale Durchbiegung des Außenrohres und damit eine signifikante Verringerung des Hohlraumvolumens zu erhalten, sind verschiedene Nuten vorstellbar mit denen man Schwächungen in der Oberfläche erzeugt.

5. Simulationsergebnisse

Die Möglichkeiten Nuten in die Oberfläche des Außenrohres einzufräsen sind vielfältig. Unterschieden werden muss dabei zwischen den verschiedenen Fräsköpfen und der möglichen Anordnungen der Nuten. Damit nicht unnötig viele Prototypen gefertigt werden müssen, kann man sich für die notwendigen Voruntersuchungen die Methoden der finiten Elemente (FEM) zunutze machen. Gerechnet wurden hauptsächlich diese beiden Grundtypen der Nutformen.

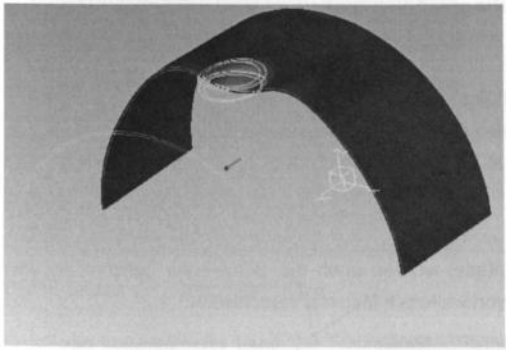


Bild 3: Form A – Rundnut (verformt)

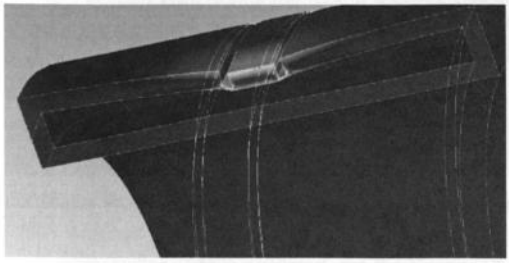


Bild 4: Form B – Ringnuten (verformt)

Im Fall der Form A wurde an einem Halbmodell des Außenrohres gerechnet, während bei Form B mit einem Viertelmodell der Gesamthülse simuliert wurde. Für die bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die gleichen Materialkennwerte für die Hülsen verwendet und äquivalente Lasten, Randbedingungen und Abmaße angenommen. Der Innenradius r der Rundnut bei Form A ist gleich der Breite des von den Ringnuten definierten Steges bei Form B. In beiden Fällen wurde die Belastung als eine unidirektionale Kraft mit einer Kreisform (Radius r) als Druckfläche gewählt. Als Fräskopf wurde eine Kugelkopffräse vorausgesetzt und somit ist die Geometrie der Nuten halbrund modelliert. Die Tiefe der Nuten ist in beiden Fällen gleich gewählt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Durchbiegung der Simulation nach in beiden Fällen annähernd gleich groß ist. Aber mit der Form A sind günstigere Spannungsverhältnisse zu erzielen als bei Form B. Die Unterschiede bewegen sich in einem Bereich von 25-30%.

Nach dieser Analyse ist die Form A zu favorisieren. Hierbei muss man jedoch beachten, dass die Fertigung dieser Form auch aufwendiger ist. Damit die Rundnut an allen Stellen auf der Zylinderoberfläche gleich tief ist, benötigt man eine 3D-Drehfräse.

Für spätere Versuche wird derzeit an einem derartigen Prototyp gearbeitet. Die bedeutend einfacher zu fertigende Form B ist bereits gefertigt und für erste Versuche bereit.

6. Versuchshülse

Für die Fertigung einer Versuchshülse wurden Präzisionsstahlrohre mit besonderer Maßgenauigkeit, gemäß DIN EN 10305-1 (Kaltgefertigte Präzisionsstahlrohre mit besonderer Maßgenauigkeit - nahtlos) verwendet. In das Außenrohr wurden die erforderlichen Ringnuten mit einem gedreht.

Beim verwendeten Material handelt es sich um Stahl in der Ausführung Nirosta 1.4301 (*X5CrNi18-10*). Aus dem gleichen Material wurden auch die Stirnbleche geschnitten und mittels Laserschweißen ohne Zugabe von weiterem Material verschweißt.

Bild 5: Fertig gedrehte Rohrstücke mit Rezessen

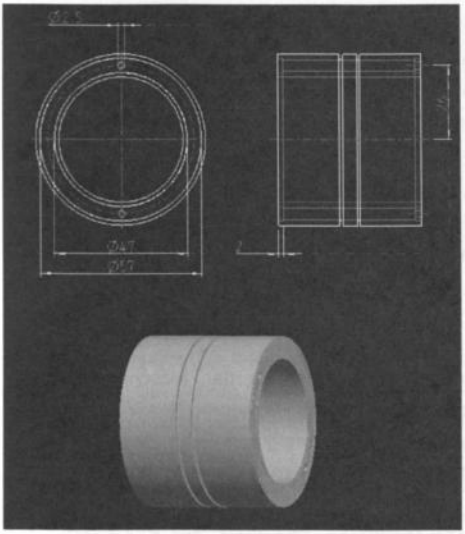


Bild 6: Skizze der kompletten Hülse

Damit die konzentrische Lage der Rohrstücke gewährleistet werden konnte, wurden diese mit Rezessen versehen. Zur Befüllung mit der Bremsflüssigkeit und zur Entlüftung beim Befüllen wurden zwei Bohrungen durch eine der Stirnseiten eingeplant. In diese Bohrungen wurden mittels eines Gewindeformers spanlos Gewinde der Größe M3 eingepresst. Somit war es möglich diese Löcher über Schrauben und Kupferdichtungsringe luftdicht abzudichten.

In derzeit laufenden Versuchsreihen wird die komplette Hülse auf eine Welle aufgesetzt. Die Welle befindet sich an den Enden fest gelagert in horizontaler Ausrichtung. Die Toleranzen der Maße für den Außendurchmesser des Wellenabsatzes und den Innendurchmesser der Hülse ergeben eine sehr kleine Spielpassung. Auf den Mantel der Hülse werden vier Dehnmessstreifen (DMS) appliziert, die die Spannung in Tangentialrichtung messen sollen. Von den vier DMS sind zwei symmetrisch zwischen Stirnseite der Hülse und der ersten Ringnut angeordnet um einen eventuellen Spannungsunterschied über die Länge der Hülse messen zu können. Die beiden anderen DMS befinden sich 180° um die Rotationsachse der Hülse versetzt auf dem Außenrohr mit ebenfalls tangentialer Ausrichtung.
Die Hülse wird für diesen Versuch in einer Zugprüfmaschine sukzessive mit Druck belastet. Als Druckkörper dient ein Vollzylinder mit 5mm Durchmesser, der auf den von den Ringnuten gebildeten Steg wirkt. Während der Druck in der Flüssigkeit ansteigt und sich die Hülse verformt, geht die Spielpassung mit der Welle in eine Presspassung über. Die Analyse dieses Versuchs ist zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung noch nicht abgeschlossen, wird aber zum Zeitpunkt des Kolloquiums als Diskussionsbasis dienen.

7. Weiterführende Untersuchungen

Die strukturmechanischen Untersuchungen zum Druckverhalten sind derzeit noch nicht abgeschlossen. Wie in den einzelnen Abschnitten beschrieben, stehen noch viele Ergebnisse der Analysen aus. Speziell die Versuche mit den Elastomeren versprechen jedoch interessante und aufschlussreiche Ergebnisse für die nähere Zukunft.

An einem Prototyp mit der Nutform A wird momentan gearbeitet. Der Druckversuch wird für diese Hülse mit den gleichen Spezifikationen durchgeführt. Durch die günstigeren Spannungsverhältnisse, kann man bei dieser Variante möglicherweise die Geometrie der Nut noch optimieren.

8. Literatur

[1] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau; 21. neubearbeitete und erweiterte Auflage; Springer Berlin Heidelberg New York

[2] Schwarz, M.; Schürmann, H.: Die gezielte Ringverstärkung von Bauteilen – ein werkstoffgerechtes Einsatzgebiet für Faser-Kunststoff-Verbunde?; 11. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V. 2005

[3] Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, H.-M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1995

[4] Heine, B.: Einführung in die Polymertechnik; expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 1998

[5] Osswald, T.; Menges, G.: Materials Science of Polymers for Engineers; Car Hanser Verlag, München 1995

Bedeutung der Werkstoffwahl für die Konstruktion von explosionsgeschützten mechanischen Geräten

Ramona Träger[1], Normen Schwarz[1], Michael Beyer[2], Karl-H. Grote[1], Frank Engelmann[1]

1. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

2. Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig

Kurzfassung

In explosionsgefährdeten Bereichen der chemischen und petrochemischen Industrie eingesetzte mechanische (nicht-elektrische) Geräte der Gerätegruppe II besitzen ein hohes Anforderungsprofil. Ein Aspekt dieses Profils ist die Werkstoffwahl. Einzelne Werkstoffe sind in speziellen explosionsgefährdeten Bereichen nicht einzusetzen. Auch Werkstoffpaarungen sind bestimmte Einsatzgrenzen auferlegt. Unter bestimmten Umständen gehen von Werkstoffpaarungen potenzielle Explosionsgefahren aus.

In der Konstruktion von explosionsgeschützten mechanischen Geräten sind viele Anforderungen mit den Merkmalen der Funktion, des Wirkprinzips, der Auslegung, der Sicherheit (primär), der Fertigung, der Kontrolle, der Montage, des Transportes, des Gebrauchs, der Instandhaltung sowie der Kosten und des Termins problemorientiert zu behandeln. Dabei ist es für eine methodisch-systematische Arbeitsweise zweckmäßig, mit Hilfsmitteln zu arbeiten. In diesem Beitrag sollen die gesammelten Erkenntnisse zu dem Einsatz von Werkstoffen in einer kurzen Form aus vergangener und aktueller Forschung sowie der Praxis und gesetzlichen Regelungen vorgestellt werden. Im Resümee wird ein Hilfsmittel in Form eines offenen Anforderungsprofils an Werkstoffe der Geräte (Bauteile) für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen als Checkliste für die Werkstoffwahl vorgestellt, die es gestattet, Lösungsmöglichkeiten schneller und besser zu finden. Anhand eines Beispiels erfolgt die Erläuterung.

1. Bedeutung der Werkstoffwahl

Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen müssen die Anforderungen der Europäischen Richtlinie 94/9/EG [1] erfüllen. Ob die Anforderungen erfüllt werden, ergibt sich aus der Zündgefahrenbewertung. Inhalt dieser Zündgefahrenbewertung ist die Identifizierung und Bewertung potenzieller Zündquellen. Die möglichen 13 Zündquellen sind in den einschlägigen harmonisierten Normen DIN EN 1127-1 [2] und DIN EN 13463-1 [3] sowie in der BGR 104 [4] aufgelistet.

Die Einstufung der Zündquellen nach der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens sollte folgendermaßen sein: a) Zündquellen, mit denen betriebsmäßig zu rechnen ist (Normalbetrieb), b) Zündquellen, die nur bei Betriebsstörungen auftreten können (zu erwartende Störungen) und c) Zündquellen, die nur bei seltenen Betriebsstörungen auftreten können [1]. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Zündquellen, lässt die Bewertung entsprechend den Forderungen der Gerätekategorie zu. Ist die Feststellung nicht der gewünschten gleich, sind ent-

sprechende Maßnahmen einzuleiten, z. B. eine Zündschutzart anzuwenden. Bei allen Betrachtungen und einzuleitenden Maßnahmen ist darauf zu achten, dass für alle Aspekte der Sicherheit von mechanischen Geräten im Explosionsschutz die grundlegende Anforderung besteht, die Auslegung der Geräte auf Lebensdauer unter Beachtung des Prinzips des „Sicheren Bestehens" (des „safe-life-Verhaltens") [5] erfolgen zu lassen. Ist eine Umsetzung nicht durchführbar, sind Maßnahmen wie die Festlegung von Intervallen zur Wartung, zur Instandhaltung und zum Austausch von verschleißbehafteten Bauteilen oder Geräten zu veranlassen, sodass der sichere Zustand entsprechend der Gerätekategorie aufrechterhalten wird.

Zu dem Umfang und der Vorgehensweise zur Risikobewertung von mechanischen Geräten für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen kann auf den Normentwurf prEN 15198 [6] verwiesen werden. Dieses baut auf dem Grundkonzept in vier Schritten auf: a) Beschreibung des Produkts (Betriebsverhalten, Lebensdauer, Aufbau); b) Erkennen von Zündgefahren; c) Zündrisikoabschätzung; d) Zündrisikobeurteilung und wurde im Normentwurf DIN EN 13463-1 [7] umgesetzt.

Die typischen Zündgefahren mechanischer Geräten sind heiße Oberflächen, mechanische Funken und elektrostatische Aufladung (Abb. 1).

Unter **mechanisch erzeugten Funken** versteht man heiße, meist leuchtende Partikel, die durch die Einwirkung (immer nur kurzzeitig, z. B. durch Schlagen, Reiben oder Schleifen) einer begrenzten mechanischen Energie auf feste Materialien entstanden sind [8]. Das wesentliche dieser Funken ist, dass diese durch den Luftsauerstoff oxidieren können und somit die freigesetzte Energie des Partikels anwächst. Teilchen aus oxidierbaren Stoffen z. B. Eisen und Stahl sind in der Lage brennbare Gase und Dämpfe sowie bestimmte Staub/Luft-Gemische zu entzünden [9]. Die grundsätzlichen Unterscheidungskriterien der mechanisch erzeugten Funken bestehen hinsichtlich ihrer Entstehung in der Länge der Kontaktzeit und der Relativgeschwindigkeit zwischen den Werkstoffpartnern [10]. Die Umsetzung der kinetischen Energie erfolgt in Wärme (Einleitung in die Bauteile, Wärmeleitung, Abgabe an die Umgebung), in Verformungs- und Trennarbeit. Eine Bildung von Funken lässt sich durch die Größen Kontaktfläche, Kontaktdruck, Relativgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit, Härten der Reibpartner, Oxidationsfähigkeit, Schmelzpunkt, Wärmetransport im Bereich der Kontaktflächen und Dauer des Energieeintrages beschreiben [11]. Die Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Schlagfunken hängt von der Höhe der kinetischen Schlagenergie, von der Mindestzündenergie und der Zusammensetzung des Brenngas/Luft-Gemisches, von der Härte und der Oxidationsfähigkeit des Werkstoffes ab [10], außerdem vom Auftreffwinkel des Schlagstückes. Erweitert werden können diese Einflussgrößen durch die Geometrie des Schlagpartners, die Schlagkinematik, die Oberflächenrauigkeit sowie durch die Wärmeleitfähigkeit und die molare Wärmekapazität des Brenngas/Luft-Gemisches [10].

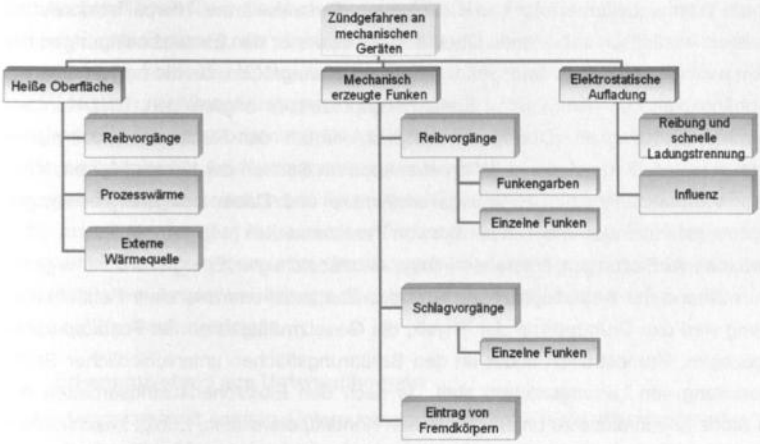


Abb. 1: Zündgefahren mechanischer Geräte

Die freigesetzte Energie ist durch die Kenngrößen der Materialfestigkeit und Oberflächenhärte, die Partikelanzahl und –größe, die Partikeltemperatur am Ende des Trennvorgangs und die Partikelgeschwindigkeit bestimmt. Zur Beschreibung der induzierten Leistung an der Berührungsstelle sind der Anpressdruck p_A in N/mm^2, die Relativgeschwindigkeit v in m/s und der Reibungskoeffizient μ als Kenngrößen heranzuziehen. In der Regel gilt für Eisenfunken beim Schlagen und Schleifen, dass bei sehr kleinen Relativgeschwindigkeiten von kleiner als 1 m/s kein Abtrennen zündfähiger Partikel zu erwarten ist. Eine Ausnahme bilden reibungspyrophore[i] Legierungen. Zündfähige Funken bilden in der angegebenen Reihenfolge abnehmend Cereisenmischmetall, Aluminium und Magnesium in Verbindung mit Rost sowie Zirkonium und Titan. Mit Abstand folgen dann Eisen und seine Legierungen.

Eisen-Funken zünden leicht Gas/Luft-Gemische mit extrem niedriger Zündenergie kleiner als 0,1 mJ (z. B. C_2H_2 oder H_2). Selbst funkenarmes Material[ii] bietet keine Sicherheit. Hier wird als Maßnahme empfohlen, die Kontaktfläche, z. B. mit Wasser, nass zu halten. Hingegen zünden Eisen-Funken relativ selten Staub/Luft-Gemische, können jedoch Glimmnester erzeugen, wenn sie in eine Staubschicht fallen.

In vielen Einsatzfällen, z. B. bei explosionsgeschützten Gabelstaplern, lassen sich mechanisch erzeugte Funken durch Verwendung von funkenarmen Werkstoffen vermeiden. Dies kann u. a. durch eine Messingummantelung von Gabelzinken erreicht werden [12]. Nachteilig wirken sich die geringere Festigkeit und Härte der funkenarmen Werkstoffe aus, weil daraus ein höherer Verschleiß beim Betrieb resultiert.

Heiße Oberflächen entstehen an und in mechanischen Geräten während des Normalbetriebs, bei zu erwartenden und seltenen Störungen, indem eine Wärmeeinleitung in Bauteile infolge von Schlag-, Reib- bzw. Schleifprozessen, aber auch Wärmestrahlungen von internen

oder externen Wärmequellen erfolgt sowie infolge von Prozesswärme. Hierbei ist darauf zu achten, dass die tatsächlich auftretende Oberflächentemperatur den Einsatzbedingungen der auftretenden explosionsfähigen Atmosphäre entspricht. Kenngrößen, die die heißen Oberflächen in Abhängigkeit des ablaufenden Erwärmungsprozesses begünstigen, sind Kontaktdruck, Relativgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit, Härten der Reibpartner, chemische Materialeigenschaften, Schmelzpunkt, Wärmetransport im Bereich der Kontaktflächen, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Strömungsverhältnisse und Dauer des Energieeintrages sowie Umgebungstemperatur und Temperatur von Prozessmedien [11].

Elektrostatische Aufladungen entstehen infolge unbeabsichtigter Energiezufuhr in irgendeiner Form während der Betriebsprozesse oder des Zustandekommens einer Fehlfunktion. Zur Erklärung wird das Grundprinzip der Physik, die Gesetzmäßigkeiten der Festkörperphysik herangezogen. Grundsätzlich findet an den Berührungsflächen unterschiedlicher Stoffe eine Umverteilung von Ladungsträgern statt. Je nach den Elektronenaustrittsarbeiten der beteiligten Stoffe führen diese zu unterschiedlichen Kontaktpotenzialen. Erfolgt anschließend eine schnelle mechanische Trennung im Vergleich zur Beweglichkeit der Ladungsträger können sich die Ladungen auf den Oberflächen nicht wieder ausgleichen. Diese Trennung von positiven und negativen Ladungsträgern wird als „Aufladung" bezeichnet. In der Praxis muss mit einer Aufladung gerechnet werden, wenn zwei Oberflächen voneinander getrennt werden, wovon mindestens eine elektrisch isolierend ist. Alternativ kann die Aufladung durch Influenz erzeugt werden, wenn sich ein elektrischer Leiter isoliert in einem elektrischen Feld befindet [8]. Influenz ist kein Werkstoffproblem. Diese Erzeugungsform muss aber grundsätzlich beachtet werden, wenn sich Kapazitäten, z. B. elektrisch leitfähige Flüssigkeiten, in einem elektrischen Feld befinden, sind diese an das Erdpotenzial anzuschließen. Werden hochisolierende, nicht aufladbare Materialien eingesetzt, dürfen sie den Ableitpfad von elektrisch leitfähigen oder ableitfähigen Materialien zur Erde nicht unterbrechen.

Bei industriellen Prozessen wie Schleifen, Reiben, Mahlen, Mischen, Sieben, pneumatisches Fördern, Rollen von Fahrzeugen, Gehen von Personen sind elektrostatische Aufladungen zu erwarten. Kritische Größe der elektrostatischen Aufladung ist die Menge der angesammelten Ladungen (Messung durch Aufladestrom, Entladestrom) auf isolierten Oberflächen von Produkten oder Anlagenteilen. Hierbei ist der totale Erdableitwiderstand unter Berücksichtigung der Zusammensetzung aus den unterschiedlichen spezifischen Materialwiderständen der Anlage und der Produkte sowie aus der geometrischen Anordnung zu bestimmen. Kennwerte auch in Verbindung mit dem Prozess müssen betrachtet werden. Hierzu gehören der spezifische Widerstand (ableitfähig), der Oberflächenwiderstand, der gesamte Erdableitwiderstand, die Art der Entladung, die freigesetzte Energie, die Zündfähigkeit der Entladung und die Durchschlagsfestigkeit [8].

„Die Explosionsgefährdung hängt von den Stoffen ab, die von den Geräten, ... be- oder verarbeitet, verwendet oder freigesetzt werden, und den Werkstoffen aus denen die Geräte, ... hergestellt sind." [9] Die Werkstoffeigenschaften der Geräte bestimmen im Wesentlichen die Zündgefahren, die am Gerät zum Tragen kommen.

Der Werkstoff beeinflusst die Merkmale der Funktion, des Wirkprinzips, der Auslegung, der Sicherheit, der Fertigung, der Kontrolle, der Montage, des Transportes, des Gebrauchs, der Instandhaltung sowie der Kosten und des Termins [5]. Aus diesem Grund bietet es sich an, den Werkstoff unter Beachtung der „Leitlinien des Gestaltens" [5] zu bestimmen. Im Bereich des Explosionsschutzes bekommt der Aspekt der Sicherheit eine primäre Rolle.
In den nachfolgenden Ausführungen sollen diese Aspekte und sich daraus ergebende Anforderungen herausgearbeitet und in Form einer Checkliste des Anforderungsprofils für Werkstoffe erstellt werden. Am Beispiel einer Pumpe soll die entsprechende Zusammenstellung der Werkstoffanforderungen unter der Verwendung der vorgestellten Liste aufgezeigt werden. Mit diesem Auswahlwerkzeug soll eine schnellere, effektive sowie zielgerichtete Festlegung von Werkstoffen erfolgen.

2. Erkenntnisstand aus Untersuchungen

In der Vergangenheit wurden Untersuchungen zu dem Werkstoffverhalten als Zündquelle durch heiße Oberflächen bzw. durch mechanisch erzeugte Funken für explosionsfähige Brennstoff/Luft-Gemische vorgenommen. Hierbei stellten sich grundlegende Zusammenhänge der Mechanismen mit den Kenngrößen heraus, die bereits im Abschnitt 1 vorgestellt wurden. Aus den Untersuchungsergebnissen konnten in begrenztem Maß Aussagen zu bestimmten Werkstoffen und Werkstoffpaarungen getroffen werden. Hierzu existieren rund 200 Literaturstellen, deren Ergebnisse sich jedoch nicht zu allgemein gültigen Kriterien zusammenfassen lassen. Besonders hervorgehoben werden soll die Tatsache, dass keine hinreichende theoretische Beschreibung der Abläufe an der Kontaktstelle und der Vorgänge bei der Verbrennung der herausgelösten Partikel existieren, die eine gezielte Vorhersage der Zündkriterien erlaubt [13].
Aufgrund dieser Tatsache wurde das EU-Projekt MECHEX gestartet, um die Eigenschaften der durch Schlagen, Schleifen und Reiben erzeugten Funken und heißen Oberflächen zu untersuchen [13]. Das Gesamtziel, welches mit dem MECHEX-Projekt und angrenzenden Untersuchungen verfolgt wird, ist es, allgemeine Bewertungskriterien für die Zündgefahren an mechanischen Geräten vorzuschlagen.
Hintergrund für neuere Untersuchungen durch die BAM an der am häufigsten im Maschinenbau und in der Verfahrenstechnik eingesetzten Werkstoffgruppe der Baustähle war es, statistisch gesicherte Werte für die Zündwahrscheinlichkeit von mechanisch erzeugten Funken (Stahl-Schlagfunken) in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie und der Mindestzündenergie der verwendeten Brenngas/Luft-Gemische zu ermitteln [10]. Aus den Ergebnissen wurden Grenzwerte für zulässige Schlagenergien hergeleitet, die in den Normentwurf DIN EN 13463-1 aufgenommen wurden [7].

3. Überblick über standardisierte Anforderungen und Festlegungen zu Werkstoffen

Die Grundlagen und Erkenntnisse aus der Forschung zu dem Einsatz von Werkstoffen bzw. Werkstoffpaarungen sind in die entsprechenden gesetzlichen Regelungen und Normen eingegangen [13]. In diesen sind erste Anforderungen an die Werkstoffe integriert.

Tabelle 1: Normen mit Anforderungen und Bestimmungen für Werkstoffe für explosionsgeschützte mechanische Geräte

Kurzzeichen : Stand	Benennung
DIN EN 1127-1:1997 [2] Entwurf DIN EN 1127-1:2005 [9]	Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik.
DIN EN 13463-1:2002 [3] Entwurf DIN EN 13463-1:2007 [7]	Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen.
DIN EN 13463-3:2005	Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 3: Schutz durch druckfeste Kapselung „d".
DIN EN 14460:2007	Explosionsfeste Geräte.
DIN EN 13463-5:2004	Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 5: Schutz durch konstruktive Sicherheit „c".
DIN EN 13463-6:2005	Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 6: Schutz durch Zündquellenüberwachung „b".
DIN EN 13463-8:2004	Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 8: Schutz durch Flüssigkeitskapselung „k".
DIN EN 1755:2000	Sicherheit von Flurförderzeugen – Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen mit brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben.
DIN EN 14986:2007	Konstruktion von Ventilatoren für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen.

Mit der Tabelle 1 soll ein Überblick über die wesentlichen bestehenden Normen zu explosionsgeschützten mechanischen Geräten gegeben werden. Weitere Normen zu dem Einsatz von Geräten in explosionsgefährdeten Bereichen sind unter [14] nachzuschlagen. In den angegebenen Normen werden weiterführende bzw. zu beachtende Normen angegeben. Ferner sind auch die grundlegenden Anforderungen aus den allgemeinen Gerätenormen zu berücksichtigen.

4. Kriterien der Werkstoffauswahl im mechanischen Explosionsschutz

Zur Aufstellung der Kriterien zur Werkstoffwahl wird als günstig betrachtet, eine erweiterbare und damit anpassungsfähige Liste mit allgemein gültigen Anforderungen ergänzt durch Verweise auf festzulegende Parameter/Kenngrößen bzw. auch Verweise auf entsprechende Normen aufzustellen. Der Entwurf einer solchen Liste ist in Tabelle 2 dargestellt. Diese soll erstmalig zur Diskussion gestellt werden.

Die allgemein gültigen Anforderungen decken die Anforderungen der drei hauptsächlich auftretenden Zündgefahren (mechanisch erzeugte Funken, heiße Oberfläche, elektrostatische

Aufladung) an mechanischen Geräten auch bezüglich der Werkstoffe ab. Diese Liste kann genutzt werden, um für einen vorliegenden speziellen Fall das erforderliche Anforderungsprofil der Eigenschaften des festzulegenden Werkstoffes zu erstellen. Passend zu diesem Profil kann dann ein Werkstoff aus Materiallisten bestimmt werden. Angestrebt ist, dass durch diese Liste je nach den erforderlichen Notwendigkeiten eine Bestimmung und damit eine Auswahl eines Werkstoffes für jedes Bauteil des mechanischen Gerätes vorgenommen werden kann und auch entsprechende Kühl-/Schmierstoffe damit zu bestimmen sind. Auch wird die Richtung der Werkstoffwahl nicht von Anfang an eingegrenzt. Aus den gesammelten Daten der Werkstoffanforderungen wird ersichtlich, ob z. B. auch ein Kunststoff als Werkstoff in Frage kommen kann. Bei Kunststoffen ist in der Regel mit elektrostatischen Aufladungen zu rechnen.

Die Anwendung der Liste soll durch das Vorgehensschema in Abb. 2 veranschaulicht werden. Für ein gewähltes Beispiel einer explosionsgeschützten Pumpe soll im nachfolgenden Abschnitt 5 die Ausführung praktiziert und vorgestellt werden.

Tabelle 2: Listenentwurf von Kriterien zur Werkstoffspezifikation

Lfd.-Nr.	Kriterien	Beachten der Lfd.-Nr.	Verweis
1.	Bestimmungsgemäße Verwendung		
1.1.	Einsatzbedingungen		Entwurf DIN EN 13463-1:2007 Abs. 1
1.1.1.	Umgebung		Entwurf DIN EN 13463-1:2007 Abs. 1
1.1.1.1.	Luftfeuchtigkeit	3.3.	
1.1.1.2.	Umgebungstemperatur	3.	Entwurf DIN EN 13463-1:2007 Abs. 6.2.7 (Auslegungstemperatur)
1.1.1.3.	Druck		
1.1.1.4.	Brennbare Stoffe		max. Oberflächentemperatur Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 6.2
1.1.1.4.1.	Zündenergie		
1.1.1.4.2.	Zündtemperatur		
1.1.2.	Prozesse (z. B. Mahlen, Mischen, pneumatisches Fördern)		
1.1.2.1.	Medien		
1.1.2.2.	Temperatur		
1.1.2.3.	Druck		
1.2.	Technische Daten		
1.2.1.	Relativgeschwindigkeit		
1.2.2.	Belastungen (Kräfte, Momente)		
1.2.3.	Leistung		
1.2.4.	Lebensdauer		
2.	Einsatz		
2.1.	Gehäuse	3.; 3.1.1.1	DIN EN 13463-5 Abs. 4.3; DIN EN 13463-3 Abs. 12 u. 19
2.2.	Dichtung (ungeschmiert, geschmiert)	3.	DIN EN 13463-5 Abs. 4.4
2.3.	Verkleben	3; 3.3.0.4	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 7.5; DIN EN 13463-3 Abs. 6
2.4.	Bauteile	3.	
2.4.1.	Ruhende Bauteile	3.	
2.4.2.	Bewegte Bauteile (rotierend, schwingend, linearbewegt)	3.; 3.1.1.3; 3.4.	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 6.4.2.1 bzw. 6.4.2.2 sowie 6.4.4.; DIN EN 13463-5 Abs. 5
2.5.	Flüssige Stoffe		
2.5.1.	Schmierstoffe	3.6.1.	DIN EN 13463-5 Abs. 4.5 u. 6.2

Tabelle 2: Listenentwurf von Kriterien zur Werkstoffspezifikation (Fortsetzung)

Lfd.-Nr.	Kriterien	Beachten der Lfd.-Nr.	Verweis
2.5.2.	Schutzflüssigkeit	3.6.1.	Entwurf DIN EN 13463-8 Abs. 6
3.	Mechanische, chemische, thermische, elektrostatische und optische Eigenschaften		
3.1.	Mechanische Eigenschaften	1.; 2.	
3.1.1.	Festigkeiten		
3.1.1.1.	Explosionsfestigkeit		DIN EN 1127-1 Abs. 6.5.2.; DIN EN 14460:2006; DIN EN 13463-3 Abs. 15 u. 16
3.1.1.1.1.	Explosionsdruckstossfest		DIN EN 1127-1 Abs. 6.5.2.; DIN EN 14460:2006;
3.1.1.1.2.	Explosionsdruckfest		DIN EN 1127-1 Abs. 6.5.2.; DIN EN 14460:2006; DIN EN 13463-3 Abs. 15 u. 16
3.1.1.2.	Schlagfestigkeit		Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 8.3.1, 8.3.2 u. 8.4.7
3.1.1.3.	Dauerfestigkeit	1.2.2.; 2.4.2.; 3.1.2.; 3.1.4.; 3.1.5.	
3.1.2.	Elastizitätsmodul		
3.1.3.	Härte		
3.1.4.	Reibungskoeffizient		
3.1.5.	Verschleißverhalten		
3.2.	Chemische Eigenschaften	1.; 2.	
3.2.1.	Korrosionsverhalten		DIN EN 13463-5 Abs. 5 u. 6.3
3.2.2.	Alterung		DIN EN 13463-5 Abs. 5 u. 6.3
3.2.3.	Beständigkeiten (Chemikalien, Öle, Fette, Säuren, Basen)		Entwurf DIN EN 13463-1:2007 Abs. 8.4.6
3.2.4.	explosionsfähige Atmosphäre		DIN EN 13463-1, DIN EN 13463-5 Abs. 4-10
3.3.	Thermische Eigenschaften	1.; 2.	
3.3.1.	Schmelztemperatur	1.	
3.3.2.	Wärmekapazität	1.	
3.3.3.	Wärmeleitfähigkeit	1.	
3.3.4.	Temperaturbeständigkeit	1.	
3.3.5.	Wärmebeständigkeit	1.	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 8.4.4
3.3.6.	Kältebeständigkeit	1.	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 8.4.5
3.3.7.	Thermoschockprüfung	1.	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 8.4.9
3.3.8.	Brennbarkeit		DIN EN 13463-5 Abs. 7.2.2

Tabelle 2: Listenentwurf von Kriterien zur Werkstoffspezifikation (Fortsetzung)

Lfd.-Nr.	Kriterien	Beachten der Lfd.-Nr.	Verweis
3.4.	Elektrostatische Eigenschaften	1.; 2.	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 6.7; BGR 132
3.4.1.	Oberflächenwiderstand		Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 6.7.5 u. Abs. 8.4.8
3.4.2.	spezifischer Widerstand		Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 6.7
3.4.3.	Durchschlagsfestigkeit		Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 6.7
3.5.	Optische Eigenschaften	1.; 2.	
3.5.1.	Lichtdurchlässig	3.1.1.2.	Entwurf DIN EN 13463-1 Abs. 7.6
3.6.	Sonstiges	1.; 2.	
3.6.1.	Viskosität		
4.	Gestaltung		
4.1.	Oberflächenrauigkeit		

5. Beispiel einer Werkstoffauswahl

Die Aufgabe besteht in der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes für das Gehäuse einer Pumpe, die für die Verwendung im explosionsgefährdeten Bereich vorgesehen ist.

Unter Nutzung des Vorgehensschemas Abb. 2 muss zuerst die bestimmungsgemäße Verwendung der Pumpe geklärt werden, d. h., es sind die technischen Leistungsdaten zu erfassen und die Einsatzbedingungen zu klären. Die Kreiselpumpe DN100 PN25 mit Radialrädern soll in Zone 1 zum Einsatz kommen. Es gelten somit die Anforderungen der Gerätegruppe II Kategorie 2G, z. B. mit IIB T4. Mit der Pumpe sollen brennbare Flüssigkeiten mit einer Temperatur von ca. 22 °C befördert werden. Die Fördermenge soll zwischen minimal 1 m^3/h bis maximal 300 m^3/h betragen. Der maximal erzeugte Betriebsdruck auf der Druckseite beträgt 25 bar bei einer maximalen Antriebsleistung von 70 kW. Die Auslegung erfolgt für die Standard-Umgebungstemperaturen von -20 °C bis +40 °C und atmosphärischen Druck zwischen 0,8 und 1,1 bar.

Im zweiten Arbeitsschritt basierend auf der Vorgehensweise Abb. 2 sind die Aufgaben und Funktionen des Gerätes und die daraus sich ergebenden Belastungen und Beanspruchungen zu klären. Die Aufgaben und Funktionen des Gehäuses sind die Bauteile wie Radialrad, Welle, Lager, Dichtungen und die daraus abzuleitenden Kräfte aufzunehmen, die brennbare Flüssigkeit einzusaugen, zu verdichten und in die Rohrleitung einzudrücken. Aufgrund der Relativgeschwindigkeiten zwischen Radialrad und Gehäuse ist darauf zu achten, dass kein Kontakt entsteht. Wärmeentwicklungen von Lagerungen müssen in ihrer Wirkung auf das Gehäuse berücksichtigt werden. Strömende Medien sind in der Regel teilweise mit kleinen Fremdkörpern aufgrund von Abrieb im System versetzt und verursachen am Gehäuse Abrieb (Verschleiß). Aufgrund von Lufteinschlüssen bzw. auch gelösten Metall-Ionen kann es zum korrosiven Angriff der inneren Gehäuseflächen kommen. Von außen muss das Gehäuse den

Umgebungsbedingungen widerstehen. Da allgemein die Pumpe in explosionsgefährdeten Bereichen mit der Kennung 2G IIB T4 einzusetzen ist, können Gas/Luft- und Dampf/Luft-Gemische z. B. mit Methan, Diesel oder Diethylether auftreten. Der Gehäusewerkstoff darf nicht auf alle zulässigen Medien reagieren.

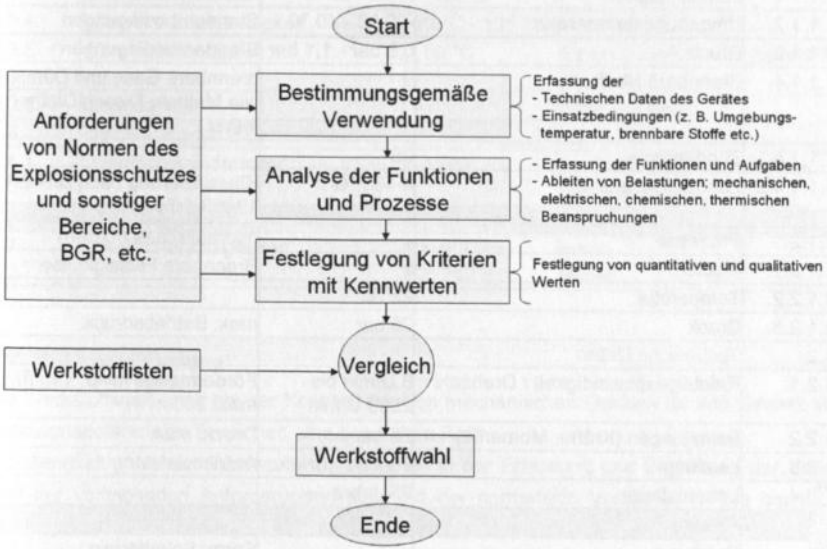


Abb. 2: Vorgehensschema zur Nutzung der Kriterienliste zur Werkstoffspezifikation

Auf Basis dieser Analysen können nun die Kennwerte der Materialeigenschaften unter dem zugrunde legen der Tabelle 2 erfasst werden. In Tabelle 3 sind auszugsweise diese Kennwerte wiedergegeben.

Werden diese Kennwerte mit den Eigenschaften der Werkstoffgruppen Eisen-Metalle, Nichteisen-Metalle, Kunststoffe, Keramik etc. verglichen, kommen sowohl die Eisen-Metalle und Nichteisen-Metalle in Betracht. Gängige Gehäusewerkstoffe aus der Praxis sind Stahlguss, Grauguss, Edelstahlguss, Sphäroguss. Hier könnte die Wahl auf einen Graugusswerkstoff z. B. Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-350 DIN EN 1563 fallen.

Tabelle 3: Auszug aus Eigenschaftsliste eines Werkstoffs für eine Pumpe

Lfd.-Nr.	Kriterien	Werte	Bemerkungen
1.	Bestimmungsgemäße Verwendung		
1.1.	Einsatzbedingungen		
1.1.1.	Umgebung		Einbau in einer Anlage
1.1.1.1.	Luftfeuchtigkeit	20 % - 90 %	relative
1.1.1.2.	Umgebungstemperatur	-20 °C - 40 °C	Standardbedingungen
1.1.1.3.	Druck	0,8 bar - 1,1 bar	Standardbedingungen
1.1.1.4.	Brennbare Stoffe		brennbare Gase und Dämpfe wie Methan, Diesel, Diethylether
1.1.1.4.1.	Zündenergie	IIB	
1.1.1.4.2.	Zündtemperatur	> 135 °C	Klassifizierung nach DIN EN 13463-1 T4
1.1.2.	Prozesse		hydraulisches Fördern
1.1.2.1.	Medien		Brennbare Flüssigkeiten
1.1.2.2.	Temperatur	22 °C	
1.1.2.3.	Druck	25 bar	max. Betriebsdruck
1.2.	Technische Daten		
1.2.1.	Relativgeschwindigkeit / Drehzahl	8 U/min bis 2500 U/min	Fördermenge mind. 1 m^3/h, max. 300 m^3/h
1.2.2.	Belastungen (Kräfte, Momente)	25 bar	Druck, max.
1.2.3.	Leistung	70 kW	Antriebsleistung
1.2.4.	Lebensdauer	25 Jahre	
2.	Einsatz		
2.1.	Gehäuse		Form: Spiralförmig
3.	Mechanische, chemische, thermische, elektrostatische und optische Eigenschaften		
3.1.	Mechanische Eigenschaften		
3.1.1.	Festigkeiten	Zugfestigkeit, Streckgrenze, E-Modul, entsprechend 3.1.1.3. festzulegen	
3.1.1.2.	Schlagfestigkeit	Stoßenergie E = 4 J (Gruppe II, Grad der mechanischen Gefährdung: gering) Entwurf DIN EN 13463-1	
3.1.1.3.	Dauerfestigkeit	Beanspruchung auf Druck, Stoss, Lebensdauer nach 1.2.4.	
3.1.3.	Härte		Festlegung unter Beachtung 3.1.5.
3.1.5.	Verschleißverhalten		
3.2.	Chemische Eigenschaften		
3.2.1.	Korrosionsverhalten		Erosions-, Kavitationskorrosion
3.2.3.	Beständigkeiten (Chemikalien, Öle, Fette, Säuren, Basen)	brennbare Flüssigkeiten	

Tabelle 3: Auszug aus Eigenschaftsliste eines Werkstoffs für eine Pumpe (Fortsetzung)

Lfd.-Nr.	Kriterien	Werte	Bemerkungen
3.2.4.	explosionsfähige Atmosphäre		siehe 1.1.1.4.
3.3.	Thermische Eigenschaften		
3.3.1.	Schmelztemperatur	> 135 °C	
3.3.4.	Temperaturbeständigkeit	-20 °C - 135 °C	beachten: 3.3.5., 1.1.1.4.2.
3.3.5.	Wärmebeständigkeit	> 80 °C	für nicht metallische Werkstoffe
3.3.8.	Brennbarkeit		nicht brennbar
3.4.	Elektrostatische Eigenschaften		
3.4.1.	Oberflächenwiderstand	< 1 GΩ	bei (23±2) °C und (50±5) % Rel. Luftfeuchte
4.	Gestaltung		
4.1.	Oberflächenrauigkeiten	Rz: 6,3 µm Rz: 160 µm	innen außen

6. Zusammenfassung

Die Werkstoffwahl spielt bei der Konstruktion von mechanischen Geräten für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen eine besondere Rolle.

Schwierigkeiten bei der Werkstoffwahl bestehen in der Erfassung und Beachtung der Vielzahl der vorliegenden Anforderungen aufgrund der normativen Vorgaben für die bestimmungsgemäße Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. Mit der aufgestellten offenen Kriterienliste zur Bestimmung der Werkstoffanforderungen wurde versucht, diesen gerecht zu werden. Vorteilhaft ist, dass mit dieser Methode die Gesamtheit der Anforderungen erfasst wird. Nachteilig ist jedoch die große Anzahl an Einzelanforderungen.

7. Literatur

[1] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, Amtsblatt Nr. L 100 vom 19.04.1994, S. 1-29

[2] DIN EN 1127-1:1997. Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik.

[3] DIN EN 13463-1:2002. Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen.

[4] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften Fachausschuss "Chemie" (Hrsg.): BGR 104 Explosionsschutz-Regeln. Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung. 12/2002

[5] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz. Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Auflage. Berlin: Springer-Verlag. 2007. – ISBN-10 3-540-34060-2, ISBN-13 978-3-540-34060-7

[6] Normentwurf prEN 15198:2007. Methodik zur Risikobewertung für nicht-elektrische Geräte und Komponenten zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.

[7] Normentwurf DIN EN 13463-1:2007. Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen.

[8] Steen, Henrikus (Hrsg.): Handbuch des Explosionsschutzes. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000. – ISBN 3-527-29848-7

[9] Normentwurf DIN EN 1127-1:2005. Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik

[10] Grunewald, Thomas; Grätz, Rainer; BAM [Hrsg.]: Ermittlung der Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Schlagfunken in explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemischen. Untersuchungen der Werkstoffkombination Stahl/Stahl. Forschungsbericht 279. Berlin, 2007. – ISSN 0938-5533, ISBN 978-3-9811655-1-7

[11] Ott, Toni Ch.: Betrachtungen zur Zündfähigkeit mechanisch erzeugter Zündquellen. Braunschweig: TU Carolo-Wilhemina, Institut für Oberflächentechnik, Diplomarbeit, 2005

[12] Grunewald, Thomas; Schalau, Bernd: Funkenbildung bei explosionsgeschützten Gabelstaplern. Die Gefahr der Entstehung mechanisch erzeugter Funken bei der Verwendung von Bauteilen aus Edelstahl. In: TÜ Bd. 43 (2002) Nr. 1/2 – Januar/Februar

[13] Lakic, D.; Beyer, M.; Hawksworth, S.; Rogers, R.; Raveau, D.; Proust, C.: Mechanisch erzeugte Zündgefahren in explosionsfähigen Atmosphären – Ergebnisse des MECHEX-Projektes. In: 10. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik. Berlin: 17./18. Juni 2004

[14] Mitteilung der Kommission im Rahmen der Durchführung der Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. (Veröffentlichung der Titel und der Bezugsdaten der harmonisierten Normen im Sinne der Richtlinie). In: Amtsblatt der Europäischen Union. 2006/C306/02, DE, 15.12.2006

[15] http://polonius.bibliothek.uni-ulm.de:8080/Meyers2/seite/werk/meyers/band/13/seite/0487/meyers_b13_s0487.html#Pyrophore (Stand vom 21.06.07)

---

[i] „Pyrophore (griech., Luftzünder, Selbstzünder), Körper, welche an der Luft so begierig Sauerstoff aufnehmen, dass sie durch die bei dieser Oxydation entwickelte Wärme ins Glühen geraten. Derartige P. sind z. B. mehrere bei möglichst niederer Temperatur aus ihren Oxyden durch Wasserstoff reduzierte Metalle, wie Nickel, Kobalt, Eisen, ferner Manganoxydul, Uranoxydul und manche Schwefelverbindungen, wie das Schwefelkalium, welches man im pyrophorischen Zustand durch Verkohlen von Alaun mit Zucker oder von schwefelsaurem Kali mit Mehl erhält. Das Erglühen dieser Präparate beruht auf der außerordentlich feinen Verteilung derselben, infolge deren sie dem Sauerstoff eine sehr große Angriffsfläche darbieten. Reduziert man die genannten Metalle bei höherer Temperatur, so dass sie dichter werden, so sind sie nicht mehr pyrophorisch." [15]

[ii] „Funkenarme Werkstoffe sind Kupfer, Zink, Zinn, Blei, einige Messing- und Bronzelegierungen, welche Nichteisenmetalle mit hoher Wärmeleitfähigkeit und schwer zu oxidieren sind. Bei diesen Werkstoffen lassen sich nur dann Funken erzeugen, wenn sie in Kombination mit Werkstoffen mit extrem großer Härte eingesetzt werden." [7]

Algorithmenbasierte Produktentwicklung für integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung

Martin Wäldele, Armin Fügenschuh, Herbert Birkhofer, Alexander Martin

Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung

Der Produktentwicklungsprozess ist geprägt durch das Erfahrungswissen und die Intuition des Entwicklers selbst. Eine durchgängige Rechnerunterstützung des Konstrukteurs ist besonders in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses nur in einigen elementaren Arbeitsschritten etabliert [1]. Unser algorithmenbasierte Ansatz geht von einer verbalen Aufgabenstellung aus Kundensicht aus. Schrittweise wird diese üblicherweise unscharfe und unvollständig formulierte Entwicklungsaufgabe soweit konkretisiert und in Produkteigenschaften transformiert, dass letztlich die optimale Topologie mit mathematischen Optimierungsverfahren ermittelt werden kann. Dieses Vorgehen führt auf schwer zu lösende mathematische Probleme, die eine Herausforderung für die Forschung darstellen. Demonstriert wird dieser Ansatz an Hand einer Entwicklungsaufgabe, bei der eine Bauteiltopologie gesucht ist, die aus mehreren zusammenhängenden Kanälen besteht. Die Kanäle sind durch ihre jeweiligen Querschnittsflächen definiert und müssen so zueinander angeordnet werden, dass sie eine Reihe von geforderten äußeren Eigenschaften optimal erfüllen.

1. Einleitung

Im Sonderforschungsbereich 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung" (SFB 666) werden Methoden, Verfahren und Anlagen entwickelt, mit deren Hilfe verzweigte Strukturen in integraler Blechbauweise entwickelt, gefertigt und bewertet werden können. Die Fertigung integraler verzweigter Blechstrukturen lässt ein erhebliches Potential für innovative Produkte erwarten. Allerdings bedingt die Vielzahl möglicher Topologien, Geometrien und Abwicklungen schon bei mäßig komplexen Hohlkammerprofilen eine unübersehbare Variantenvielfalt. Die Entwicklung eines neuen Produkts beginnt meist mit der Aufgabenklärung, die eine Anforderungsliste zum Ergebnis hat. Die Schwierigkeit besteht nun darin, ein Produkt zu entwickeln, welches genau diese Anforderungen durch äußere Eigenschaften, d.h. nach außen gerichtete und wahrnehmbare Eigenschaften, erfüllt. Die vagen Kundenaussagen müssen so aufbereitet werden, dass diese als Optimierungsparameter in mathematisch-algorithmische Optimierungsverfahren für die nachfolgende topologische und geometrische Gestaltung von Profilen mit verzweigten Blechstrukturen genutzt werden können. In enger Kooperation zwischen Mathematikern und Produktentwicklern entstehen hierzu neue Verfahren der algorithmenbasierten Produktentwicklung. Kernelement des SFB 666 sind die neuen Umformverfahren des Spaltprofilierens und des Spaltbiegens. Beim Spaltprofilieren wird ein ebenes Blech bei Raumtemperatur durch ein spezifi-

sches Werkzeugsystem, bestehend aus einer stumpfwinkligen Spaltwalze und unterstützenden Hilfswalzen, bei Raumtemperatur gedrückt oder gezogen und in der Blechebene gespalten [2]. Das ortsfeste Werkzeugsystem formt in diskreten Stufen das translatorisch bewegte Werkstück bis zu einem Bauteil der gewünschten Endgeometrie um. Die Verzweigung entsteht in der Längskante der Blechplatine bzw. des Blechcoils durch ein Auseinanderfließen des Werkstoffs. Für verzweigte Kaltprofile sind bislang entweder Materialdopplungen zu erzeugen oder es muss auf differentielle Bauweisen mit gefügten Profilen ausgewichen werden. Bei den durch das Spaltprofilieren erzeugten integralen Blechprofilen hingegen werden die Verzweigungen aus dem Material selbst geformt, so dass durch mehrfache Verzweigungsschritte mit anschließenden Walzprofilier- und kontinuierlichen Fügeverfahren integrale Profile mit mehreren Hohlkammern gefertigt werden können.

2. Von Anforderungen zu Eigenschaften als Optimierungsparameter

Die Transformation der Kundenanforderungen in für die mathematische Optimierung nutzbare Produkteigenschaften ist ein wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens. Die Grundlage für dieses Vorgehen liegt in der systematischen Betrachtung der Produkteigenschaften und der Trennung von inneren und äußeren Eigenschaften der zu entwickelnden Profile [3]. Ausgangspunkt des neuen algorithmenbasierten Produktentwicklungsansatzes ist die vage und oft verbal formulierte Kundenanfrage. Die Kundenanfrage wird zunächst durch einen Anforderungskonfigurator gezielt erfasst, vervollständigt und präzisiert [4]. Auf Basis eines Begriffsystems mit standardisierten Begriffen zur Beschreibung von Blechprofilen werden Beziehungen zwischen diesen Anforderungen und den korrespondierenden Produkteigenschaften, in den meisten Fällen so genannte äußere Eigenschaften, gebildet. Die Schwierigkeit in der Produktentwicklung besteht nun darin, diese Anforderungen gezielt und umfassend durch Eigenschaften des Produktes zu erfüllen. Wird eine geringe Durchbiegung oder eine Korrosionsbeständigkeit des Profils gefordert, kann diese vom Konstrukteur nicht direkt, sondern nur indirekt durch die gezielte Festlegung von inneren Eigenschaften wie Form, Abmessungen und Werkstoff z.B. in Skizzen, technischen Zeichnungen und Stücklisten realisiert werden.

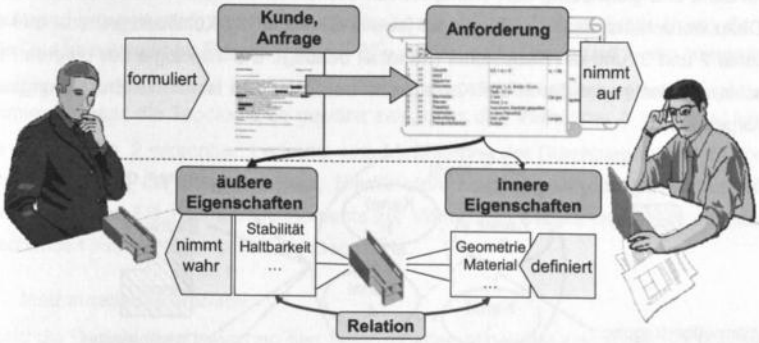


Abb. 1: Transformation der Kundenanfrage in Produkteigenschaften

2.1. Beziehungen zwischen den Eigenschaften

Die bewusste Trennung von inneren und äußeren Eigenschaften bildet die Basis der weiteren Untersuchungen. Die äußeren Eigenschaften des Profils repräsentieren die Kundensicht, während die inneren Eigenschaften die eigentlichen Optimierungsparameter darstellen. Um eine algorithmisierbare Transformation von äußeren zu inneren Eigenschaften zu erreichen, müssen die Beziehungen zwischen den Eigenschaften auf der Grundlage von Modellen, Regeln und Erfahrungswissen erfasst, analysiert und eindeutig abgebildet werden.

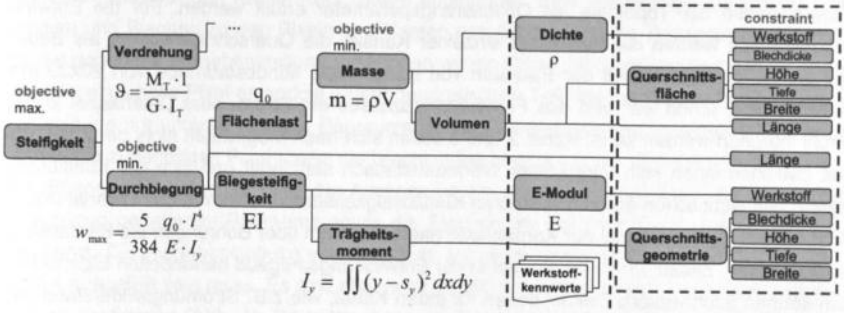


Abb. 2: Eigenschaftsnetzwerk von den äußeren zu den inneren Eigenschaften

Um diese Eigenschaftszusammenhänge systematisch aufzubereiten und zu visualisieren, werden die Abhängigkeiten und Relationen der Eigenschaften in Eigenschaftsnetzwerken abgebildet (Abb. 2) [5]. Das Netzwerk stellt die Eigenschaftszusammenhänge für die äußere Eigenschaft der Steifigkeit eines Profils dar. Erst wenn die aufgestellten Relationen in die Optimierungsroutinen integriert werden können, sind die Zusammenhänge für mathematische Optimierungsverfahren nutzbar [6]. Ziel einer exemplarischen Entwicklungsaufgabe ist es, ein integrales Blechprofil zu entwickeln, welches als Führungsschiene eines Kreisförder-

systems dient und gleichzeitig den Transport von Stoffen innerhalb der Blechstruktur sicherstellt. Dazu werden insgesamt 4 Kanäle für jeweils Öl (Kanal 1), Kühlflüssigkeitszu- und ablauf (Kanal 2 und 3) und ein Kabelkanal (Kanal 4) benötigt. Die Topologie des unteren Führungsschienenkanals wird durch die Kardankette bestimmt und ist für die Entwicklungsaufgabe vorgegeben.

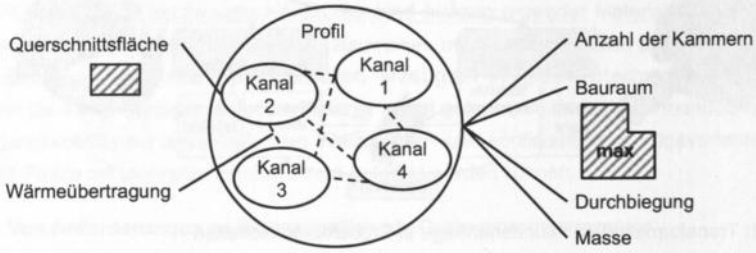


Abb. 3: Beziehungen des Bauteils „Profil" mit mehreren Kanälen

Ziel der Optimierung ist es, die Durchbiegung des Bauteils zu minimieren. Der Bauraum des gesamten Profils wird mittels eines Polygonzuges (z.B. 0,0; 120,0; 120,80 usw.) parametrisiert und grenzt den Lösungsraum als mathematische Nebenbedingung weiter ein. Zusätzlich zu den Bedingungen an das Gesamtbauteil „Profil" werden weitere Nebenbedingungen und Zielfunktionen für jeden einzelnen Kanal hinzufügt und auch Beeinflussungen der Kanäle untereinander betrachtet (Abb. 3). Diese Bedingungen müssen später in Form von inneren Eigenschaften der Topologie als Optimierungsparameter erfüllt werden. Für die Entwicklungsaufgabe werden die Bauräume einzelner Kanäle, die Querschnittsflächen, als Bedingungen eingeführt. So soll der Bauraum von Kanal 4 die Mindestabmaße von 20x20 mm haben, damit schon während des Fertigungsprozesses ein Strom- oder Datenkabel in das Profil integriert werden kann. Kanal 2 und 3 sollen sich nach Möglichkeit nicht berühren, damit zwischen ihnen kein ungewollter Wärmeaustausch stattfindet und sich der Kühlflüssigkeitszulauf nicht schon an dem wärmeren Kühlflüssigkeitsablauf erwärmt. Der Ölkanal (Kanal 1) muss am Führungskanal der Kardankette angrenzen, um über Bohrungen die Kardankette zu schmieren. Zusätzlich zu denen hier in der Entwicklungsaufgabe behandelten Eigenschaften können auch weitere Zielfunktionen für jeden Kanal, wie z.B. Strömungswiderstand des einzelnen Kanals, definiert werden. Diese Beziehungen können auch an Hand von physikalischen Formeln definiert und in Beziehungsnetzwerken für jeden Kanal abgelegt werden.

2.2. Die Durchbiegung als mathematisch formulierte Zielfunktion

Da die Länge des zu entwickelnden Profils klein gegenüber der Höhe und Breite des Querschnitts ist, kann die Durchbiegung mittels der Euler-Bernulli Stabtheorie ermittelt werden. Die Krümmungskurve $u(x)$ eines langen, dünnen Stabes genügt demnach der gewöhnlichen Differentialgleichung $E \cdot I \cdot \frac{d^4 u}{dx^4} = w(x)$. Dabei ist E der E-Modul, der durch das Material vorgegeben ist, I das Flächenträgheitsmoment bezüglichen der zentralen Achse des Bauteils

und $w(x)$ eine Lastverteilungsfunktion. Für einen Balken, der an beiden Enden einfach unterstützend gelagert wird, erhält man aus der Lösung dieser Differentialgleichung die maximale Durchbiegung unter Eigenlast $u_{\max} = \frac{5wl^4}{384EI}$, wobei l die Länge und w die homogen verteilte Eigenlast des Bauteils ist. Um nun wie gefordert die Durchbiegung unter Eigenlast zu minimieren, muss die Topologie so gewählt sein, dass das Verhältnis $\frac{w}{I}$ möglichst klein ist. Wie auch in Abb. 2 erkennbar, bedeutet eine Minimierung der Durchbiegung als Zielfunktion eine Maximierung der Biegesteifigkeit. Hierfür steht hauptsächlich die „Stellschraube" der Maximierung des Flächenträgheitsmoments zur Verfügung. Dieses ergibt sich aus der entsprechenden inneren Eigenschaft der Geometrie.

3. Mathematische Modelle

Sobald die Beziehungen zwischen den Eigenschaften abgeleitet sind, kann mit Hilfe mathematischer Optimierungstechniken eine Topologie errechnet werden, welche die geforderten Bauteileigenschaften aufweist und zudem bezüglich der gegebenen Zielkriterien optimal ist. Dazu verwenden wir Methoden der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung. Die verwendeten Modelle stellen wir im Folgenden dar. Für Details zu den Lösungsmethoden verweisen wir auf [7].

3.1. Diskretisierung des Baumraums

Der durch einen Polygonzug gegebene Querschnitt des Bauraums wird durch ein Pixelgitter mit quadratischen Pixeln diskretisiert. Die Kanäle müssen nun dieser Diskretisierung folgen. Das Blech wird auf den Kanten des Gitters angeordnet. Eine vollständige Zuordnung von Kanälen und Blechen zu den Pixeln und Kanten des Gitters wird als Topologie bezeichnet. Für die gegebene Aufgabenstellung verwenden wir ein Gitter mit 6 horizontalen und 11 vertikalen Pixeln. Jedes Pixel entspricht einem quadratischen Teil des Bauraums mit 20 x 20mm Kantenlänge. Im unteren Teil des Bauraums ist die Führungsschiene untergebracht. Daher können die zugehörigen Pixel sowie die Blechkanten bereits vor der Optimierung fixiert werden. Ebenso fixiert sind die Pixel der Aussparung am oberen, rechten Rand des durch den Polygonzug gegebenen Bauraums sowie die Blechstücke auf dem Rand dieses Teils des Bauraums. Die Aufgabenstellung verlangt, dass der gesamte übrige Bauraum durch die vier Kanäle ausgefüllt sein muss. Es sind also noch 15.200 mm^2 bzw. 38 Pixel durch die Optimierung zu bestimmen (Abb. 4). Da jedes dieser 38 Pixel prinzipiell einem der 4 Kanäle zugewiesen werden kann, ist 4^{38} eine theoretische Oberschranke für die Anzahl der möglichen Lösungen. Aufgrund der Lösungsvielfalt können nicht diese etwa 10^{23} verschiedenen Lösungen der Reihe nach generiert werden, um auf diese Weise die Optimallösung zu finden. Das Problem verlangt nach einer systematischen Lösungssuche, welche durch moderne mathematische Techniken der Diskreten Optimierung unterstützt wird.

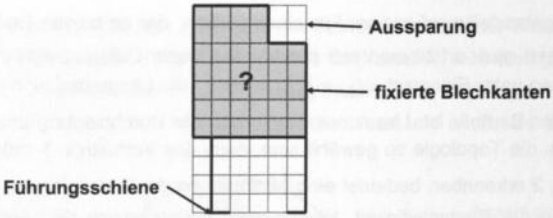


Abb. 4: Der zu optimierende Teil des Bauraums (grau)

Die Menge V sei die Menge der Pixel. Jedes Pixel hat in einem regelmäßigen rechteckigen Gitter vier Nachbarpixel. Für jedes Paar von benachbarten Pixeln $i,j \in V$ führen wir eine Kante $\{i,j\}$ ein. Die Menge aller Kanten sei mit E bezeichnet. Die Menge der Kanäle bezeichnen wir mit C. Zu jedem Kanal $t \in C$ ist laut Aufgabenstellung die minimale und maximale Querschnittsfläche $c^t_{\min}, c^t_{\max}$ gegeben. Im Einzelnen sind dies: $c^1_{\min} = 5$, $c^1_{\max} = 10$, $c^2_{\min} = c^3_{\min} = 10$, $c^2_{\max} = c^3_{\max} = 20$, $c^4_{\min} = 1$, $c^4_{\max} = 3$. Jedem Pixel wird durch die Topologieoptimierung ein Typ $t \in T := C \cup \{0\}$ zugeordnet, wobei der Wert 0 für die Außenwelt steht, und alle andere Werte für den jeweiligen Kanal.

3.2. Das Grundmodell

Die Entscheidung, welcher Typ t einem Pixel i letztlich zugeordnet wird, ist durch die binäre Variable $\delta^t_i \in \{0,1\}$ abgebildet. Für die Kanten $\{i,j\}$ gibt es entsprechend eine Entscheidungsvariable $\mu_{i,j} \in \{0,1\}$, die angibt, ob auf der Kante Blech ist oder nicht. Das Grundmodell hat dann folgende Gestalt:

$$\min \quad \sum_{\{i,j\} \in E} \mu_{i,j} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t \in T} \delta^t_i = 1 \qquad \forall i \in V \tag{2}$$

$$c^t_{\min} \le \sum_{i \in V} \delta^t_i \le c^t_{\max} \qquad \forall t \in C \tag{3}$$

$$\delta^t_i + \delta^t_j + \mu_{i,j} \le 2, \; \left|\delta^t_i - \delta^t_j\right| \le \mu_{i,j} \qquad \forall t \in T, \{i,j\} \in E \tag{4}$$

$$\mu_{i,j} \in \{0,1\} \qquad \forall \{i,j\} \in E \tag{5}$$

$$\delta^t_i \in \{0,1\} \qquad \forall t \in T, i \in V \tag{6}$$

Dieses Grundmodell ist geeignet, die Topologie minimalen Gewichts eines Kanalträgers mit gegebenen Querschnittsflächen der einzelnen Kanäle zu ermitteln. Durch die Zielfunktion (1) wird eine Topologie mit einer minimalen Anzahl von Blechen angestrebt, welche gleichbedeutend eine Topologie minimalen Gewichts ist. Die Nebenbedingungen (2) stellen sicher, dass jedes Pixel genau einem Typ zugeordnet ist. Die Nebenbedingungen (3) verlangen, dass die Anzahl Pixel, die zu einem Kanal gehören, der vom Entwickler geforderten Quer-

schnittfläche des jeweiligen Kanals entsprechen. Zwei benachbarte Pixel sind genau dann durch Blech voneinander zu trennen, wenn sie unterschiedlichen Typen zugeordnet sind (4). Nebenbedingungen (5) und (6) verlangen schließlich die Ganzzahligkeit der Entscheidungsvariablen.

3.3. Minimierung der Durchbiegung

Das Flächenträgheitsmoment ist gegeben durch $I = \iint_B (s_y - y)^2 dxdy$, wobei s_y die vertikale Koordinate des Massenschwerpunkts des Balkens ist. Mit B ist die Geometrie des Profilquerschnitts bezeichnet. Um kompatibel mit dem obigen diskreten, gemischt-ganzzahligen linearen Modell zu sein, muss die Flächenträgheits-Formel linearisiert und diskretisiert werden. Es ergibt sich $I \approx \sum_{\{i,j\} \in E} (I_{i,j} + (s_y - y_{i,j})^2 \cdot \mu_{i,j}$, wobei $y_{i,j}$ die vertikale Koordinate des Massenschwerpunkts des Blechs auf Kante $\{i,j\}$ ist und $I_{i,j}$ das Flächenträgheitsmoment dieser Kante $\{i,j\}$, welches exakt bestimmt werden kann: Ist $\{i,j\}$ eine horizontale Kante, so ist $I_{i,j} = \frac{hb^3}{12}$, für eine vertikale Kante ist $I_{i,j} = \frac{bh^3}{12}$, wobei b die Dicke des Blechs und h die Breite bzw. Höhe eines (quadratischen) Pixels bezeichnen.
Der Massenschwerpunkt (s_x, s_y) kann dabei vom Entwickler beliebig innerhalb des Bauraums platziert werden. Damit die Topologie hernach auch diesen Schwerpunkt aufweist, wird durch die Bedingungen

$$-\varepsilon \leq \sum_{\{i,j\} \in E} (s_x - x_{i,j}) \cdot \mu_{i,j} \leq \varepsilon, \quad -\varepsilon \leq \sum_{\{i,j\} \in E} (s_y - y_{i,j}) \cdot \mu_{i,j} \leq \varepsilon \tag{7}$$

sichergestellt, dass dieser Schwerpunkt eingehalten wird. Die Wert ε legt dabei den maximalen Diskretisierungsfehler fest.

3.4. Zusammenhangsbedingungen

Des Weiteren ist es notwendig, den Zusammenhang der Kanäle explizit zu fordern. Das bedeutet, dass nicht ein Teil eines Kanals in einem Bereich des Bauraums und der Rest des gleichen Kanals in einem anderen Teil des Bauraums erscheinen darf, ohne dass die beiden Teile untereinander verbunden sind. Der Zusammenhang kann auf zwei unterschiedliche Arten formuliert werden. Die eine Art, Flussformulierung genannt, wurde bereits in Fügenschuh et al. [8] vorgestellt. Im Folgenden gehen wir daher auf die andere Art, Schnittformulierung genannt, ein.
Seien $i,j \in V$, $i \neq j$, zwei nicht-benachbarte Pixel. Ein Knotenschnitt $N(i,j) \subset V$ ist eine Teilmenge der Knoten, mit der Eigenschaft, dass i auf der einen und j auf der anderen Seite des Schnitts liegt, der Schnitt also i von j trennt. Wenn Pixel i zu Kanal t und Pixel j ebenfalls Kanal t zugeordnet ist, dann muss aus jedem Knotenschnitt $N(i,j)$ mindestens ein Pixel ebenfalls t zugeordnet sein:

$$\delta_i^t + \delta_j^t \leq 1 + \sum_{k \in N(i,j)} \delta_k^t. \tag{7}$$

3.5. Weitere Nebenbedingungen und Rechenergebnisse

Die weiteren durch die Aufgabenstellung geforderten Nebenbedingungen lassen sich ebenfalls als lineare Nebenbedingungen formulieren.

Kanal 2 und Kanal 3 müssen die gleiche Querschnittsfläche aufweisen:

$$\sum_{i \in V} \delta_i^2 = \sum_{i \in V} \delta_i^3 . \tag{8}$$

Kanal 1 muss an die Führungsschiene angrenzen:

$$\delta_{(2,5)}^1 + \delta_{(3,5)}^1 + \delta_{(4,5)}^1 + \delta_{(5,5)}^1 + \delta_{(6,5)}^1 \geq 1. \tag{9}$$

Kanal 2 und Kanal 3 dürfen sich nicht berühren:

$$\forall \{i,j\} \in E : \delta_i^2 + \delta_j^3 \leq 1. \tag{10}$$

Die Optimallösung ist rechts oben in Abbildung 5 dargestellt. Während des Lösungsprozesses, in dem ein Branch-and-Cut Verfahren zur Lösung des ganzzahligen linearen Programms zum Einsatz kommt, werden zwischendurch auch sub-optimale zulässige Lösungen generiert. In dieser Lösung sind zwar alle Nebenbedingungen erfüllt, jedoch wird zu viel Blech eingesetzt, und die Durchbiegung ist noch nicht kleinstmöglich. Im Vergleich dazu ist unten links in Abbildung 5 eine unzulässige Lösung dargestellt. Es werden hier folgende Nebenbedingungen nicht erfüllt: Kanal 2 und 3 berühren sich und Kanal 1 liegt nicht an der Führungsschiene.

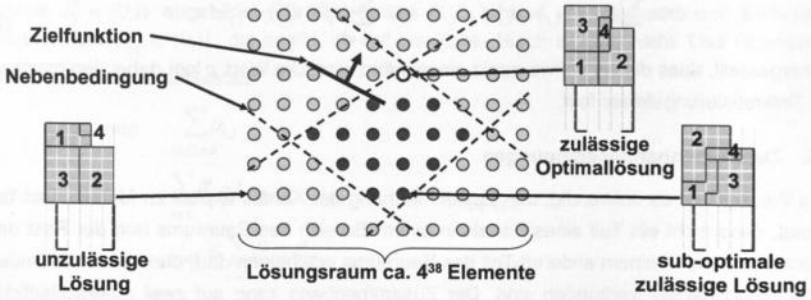


Abb. 5: Lösungsraum mit zulässigen und unzulässigen Lösungen

4. Diskussion und Ausblick

Wir haben gezeigt, dass sich im Kontext der Fertigungsverfahren des SFB666 der Produktentwicklungsprozess hinsichtlich des Auffindens einer optimalen Topologie weitgehend automatisieren lässt. Die so ermittelten Topologien sind noch keine fertigen Designs, liefern dem Entwickler aber wertvolle Anregungen, wie eine Topologie, die alle geforderten äußeren Eigenschaften erfüllt, aussehen könnte. Die Topologie-Optimierung ist daher in weitere Rechenschritte eingebettet. In einem anschließenden zweiten Optimierungsschritt wird nun die Geometrie der Wandstärke entsprechen den Randbedingungen des Spaltprofilierprozesses optimiert. Abschließend werden in einem dritten Schritt Restriktionen der Fertigung berücksichtigt.

In unserer zukünftigen Forschung streben wir eine Integration weiterer Optimierungsziele in das mathematische Modell an.

5. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Teilprojekte A1 und A2 des Sonderforschungsbereichs 666 erzielt. Wir danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

6. Literatur

[1] Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren, Aachen, Shaker, 1998.

[2] P. Groche, G. von Breitenbach, M. Jöckel, A. Zettler. New tooling concepts for the future roll forming applications. Proceedings of the ICIT Conference, Bled, Yugoslavia, 2003.

[3] Hubka, V., Eder, E.,: Design Science, Springer Berlin, 1996.

[4] Y. Chahadi, M. Wäldele, H. Birkhofer: Von der Kundenanfrage zur standardisierten Produkteigenschaft. P. Groche (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 666: Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2007.

[5] Wäldele, M., Vucic, D., Birkhofer, H.,: A new manufacturing process as the seed for an algorithm-based product design in the early phases, NordDesign2006, Reykjavik Iceland, 2006.

[6] Birkhofer, H., Martin, A., Ulbrich, S., Wäldele, M., Fügenschuh, A., et.al.: Topology- and shape-optimization of branched sheet metal products, in: H. Kopfer (Hrsg.), Operations Research Proceedings, Springer Berlin, 2005.

[7] A. Fügenschuh, M. Fügenschuh. Integer Linear Programming Models for Topology Optimization in Sheet Metal Design. Preprint, 2007.

[8] A. Fügenschuh, W. Hess, A. Martin, S. Ulbrich. Diskrete und kontinuierliche Modelle zur Topologie- und Geometrie-Optimierung von Blechprofilen. P. Groche (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 666: Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2007.

Auslegungsmodell für komplexe Versagenskriterien im klassischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess

Henrik Schnegas

Hochschule Wismar, University of Technology, Business and Design

Kurzfassung

Traditionell werden im klassischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess technischer Produkte nur die Versagensarten Verformung, Gewaltbruch und mit einer gewissen Einschränkung die Ermüdung bei der Auslegung bzw. Nachweisrechnung berücksichtigt. Versagensarten wie Verschleiß oder Korrosion werden hingegen lediglich im Rahmen der Gestaltung konstruktiv betrachtet, was dazu führt, dass die meisten verschleiß- und korrosionsbedingten Ausfälle erst während der Nutzungsphase erkannt, analysiert und dann in den folgenden Produktentwicklungen bei der Gestaltung berücksichtigt werden. Lediglich im Rohrleitungsbau existieren Korrosions- bzw. Verschleißzuschläge, die zur Vermeidung von Schäden auf die traditionell ermittelten Wandstärken aufgeschlagen werden. Im vorliegenden Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit der neben dem Gewalt- und Ermüdungsbruch auch Verschleißerscheinungen bereits im herkömmlichen Auslegungsalgorithmus rechnerisch berücksichtigt werden können. Zur Anwendungen kommen dabei Erkenntnisse der Tribologie und der Zuverlässigkeitstheorie.

1. Vom Versagen technischer Produkte

Das Ziel eines jeden Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses ist die Schaffung eines sicheren, zuverlässigen und funktionsgerechten Produktes. Zur Schaffung technischer Sicherheit wird klassisch eine vorhandene Beanspruchung in dem betrachteten Bauteil mittels Formelwerk des einachsigen Spannungszustandes bzw. der Vergleichsspannungshypothesen ermittelt und mit den zum Versagen führenden bzw. den die Funktion mindernden Grenzspannungen verglichen. Mit Blick auf Zug, Druck, Biegung, Torsion, Abscherung und Flächenpressung und einer statischen oder dynamischen Beanspruchung gelten als Grenzwerte der Funktionsminderung die unzulässige plastische Verformung und als Grenzwert des Ausfalls der Gewalt- und Ermüdungsbruch. Keine rechnerische, sondern nur konstruktiv-gestalterische Berücksichtigung finden Versagenskriterien wie Verschleiß, Korrosion und andere flächenabtragende Erscheinungen.

Während bereits die bekannten Versagenskriterien vielen Konstrukteuren ein Kopfzerbrechen bereiten, sind gerade im Zeitalter der Kunststoffe und der nachwachsenden Rohstoffe, die auch immer häufiger im klassischen Maschinenbau Einzug halten, neue Versagensformen zu berücksichtigen. Neben den genannten Versagenskriterien müssen aus der Sicht des Autors zusätzlich *thermische Schädigungen* oder auch *biologische Schädigungen* z.B. durch Bakterien und deren biochemischen Produkte berücksichtigt werden. In *Abbildung*

1 ist ein Gesamtüberblick der durch den Konstrukteur ganzheitlich zu berücksichtigenden Versagenskriterien gegeben.

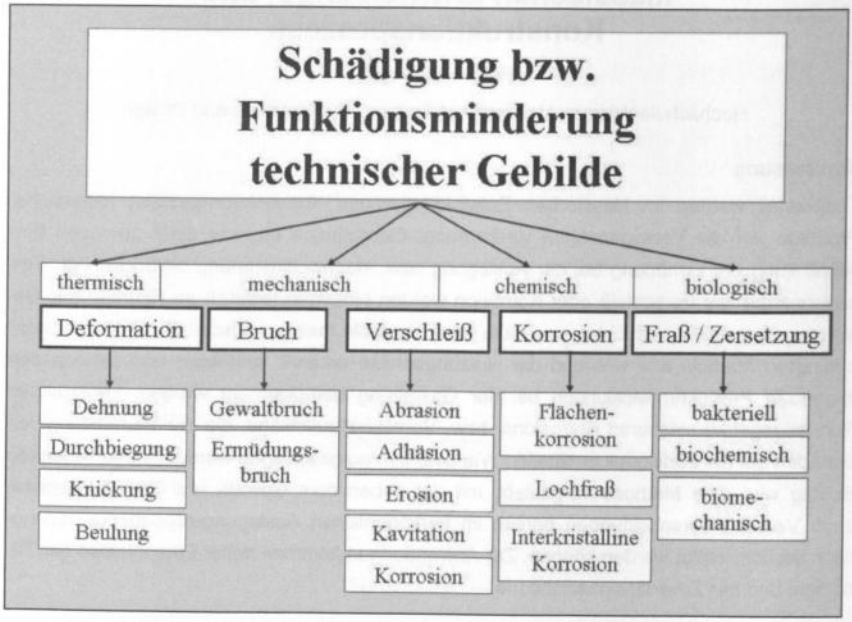


Abb. 1: Versagenskriterien

In den folgenden Ausführungen sollen vordergründig kombinatorische Modelle für den Ausfall durch Bruch in Überlagerung mit dem Verschleiß betrachtet werden. Gesucht ist ein Rechenalgorithmus, mit dem ein Konstrukteur den zu erwartenden Verschleiß bereits in der Auslegungsphase in seinen Auslegungsformeln berücksichtigen kann.
Das Ziel ist ein verschleiß- und gleichzeitig bruchsicheres Produkt.

2. Verschleiß im Maschinen- und Anlagenbau

Verschleiß ist ein dynamischer Prozess, bei dem 2 oder mehr Komponenten mit einer Relativbewegung zueinander in Kontakt sind und in Abhängigkeit der kraftmäßigen Intensität ihrer Berührung, der vorliegenden Werkstoffpaarung und der bewegungsrelevanten Eckdaten einen zeitlich ansteigenden Volumenverlust an der Oberfläche aufweisen.
Abbildung 2 zeigt eine erweiterte Übersicht der Verschleißarten, die bei tribotechnischen Systemen für Konstrukteure interessant sind.

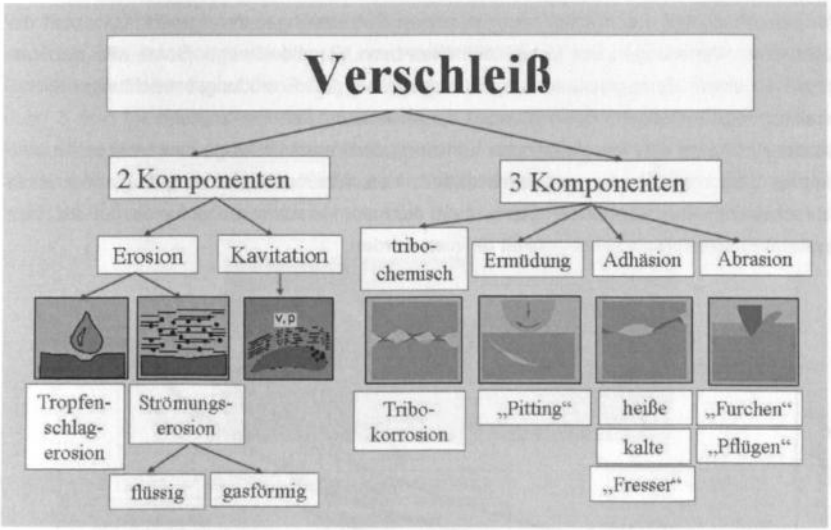


Abb. 2: Verschleißarten

Betrachten wir für die nachfolgenden Beispiele insbesonders den Verschleiß, bei dem ein Grundkörper, ein Gegenkörper und ein Zwischenmedium in einer definierten Umgebung als tribotechnisches System vorliegen, so können aus der Verschleißliteratur für einen Horizont konstanter Verschleißbeanspruchung die Verschleißhöhen als Funktion des Verschleißweges bzw. der Kontaktzeit festgestellt werden, wobei die in *Abbildung 3* skizzierten Funktionsbilder bekannt sind. Grundsätzlich treten eine degressive Einlaufphase, eine Phase des linearen bzw. konstanten und eine Phase des progressiven Verschleißhöhenanstieges, die sogenannte Hochlage auf. Letztere ist die Phase, in der in der Regel der Funktionsausfall bzw. die Funktionsminderung bei einer Verschleißhöhe $h_{vers.}$ eintritt. Die versagensrelevante Hochlage $h_{vers.}$ sollte nach Möglichkeit mit Blick auf die Produktsicherheit während der Anwendung nicht erreicht werden. Schwierig ist jedoch die Berücksichtigung dieser Hochlage bereits in der Auslegungsphase des Produktes.

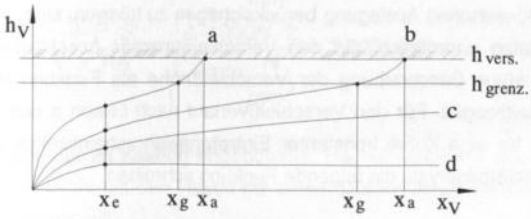


Abb. 3: Verschleißdiagramme

Was den Verschleiß noch schwieriger in seinen Betrachtungen erscheinen lässt, sind die statistischen Verteilungen der Verschleißhöhen bzw. Verschleißwege. Somit wird der Verschleiß zu einem Versagenskriterium, für das wie bei den Ermüdungsbetrachtungen wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtungen zur Anwendung kommen müssen.
Aus der *Abbildung 4* ist die statistische Verteilung der Verschleißwege bzw. –zeiten für eine konkrete Verschleißhöhe h_v und eine konstante Verschleißbeanspruchung dargestellt. Nach wahrscheinlichkeitstheoretischer Betrachtung können Verschleißhöhenfunktionen für eine bestimmt Eintretenswahrscheinlichkeit definiert werden.

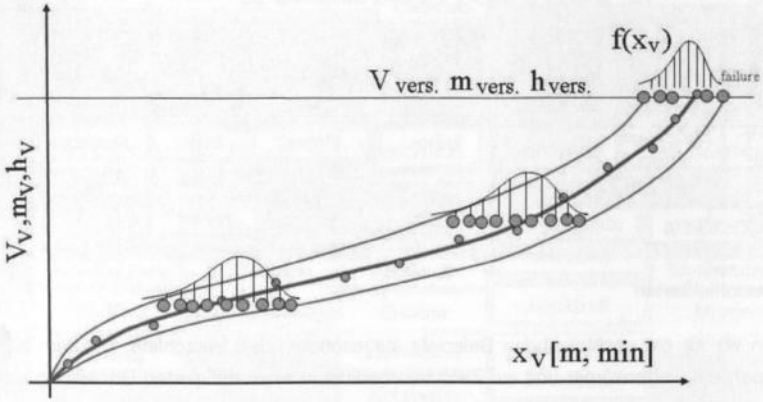


Abb. 4: stochastisches Verschleißdiagramme

Wird eine Verschleißhöhe $h_{vers.}$ erreicht, tritt, wie bereits beschrieben, der Ausfall oder die Funktionsminderung ein. Interessant ist für den betrachtenden Konstrukteur also die Versagenshöhe $h_{vers.}$, die in Analogie zur Streckgrenze bzw. der Bruchfestigkeit als Grenzwert steht.
Interessant ist weiterhin der Zeitpunkt x_v, an dem die Versagenshöhe und damit der Ausfall bzw. die Funktionsminderung eintritt.

3. Modell zur Berücksichtigung von Verschleiß

Um den Verschleiß z.B. bei der klassischen Auslegung berücksichtigen zu können, sind umfangreiche Daten in einem Katalog erforderlich, die den Verschleißprozess beschreiben. Interessant ist z.B. die formelmäßige Beschreibung der Verschleißhöhe als Funktion der Verschleißzeit bzw. des Verschleißweges. Für den Verschleißverlauf nach Graph a oder b aus *Abbildung 3* lässt sich z.B. für eine Kurve konstanter Eintretenswahrscheinlichkeit für den Bereich des linearen Verschleißfortschritts die folgende Funktion schreiben.

$$h_V(x_V) = h_{VE} + v_V \cdot x_V{}^{\alpha} \qquad (1)$$

Der Faktor v_v ist die spezifische Verschleißgeschwindigkeit in Millimeter je Meter Verschleißweg bzw. Millimeter je Minute oder Stunde Kontaktzeit. Der Exponent α ist objektspezifisch. Die Verschleißhöhe h_{vE} ist die vorliegende Verschleißhöhe nach der Einlaufphase. In *Abbildung 5* sind für die Komponenten eines Kolbens eines kleinen Schiffsdiesels spezifische Werte für v_v und α dargestellt. Hiermit lässt sich für eine geforderte Lebensdauer und eine gewünschte Eintretenswahrscheinlichkeit eine Verschleißhöhe h_v berechnen. Dieses ist die Verschleißhöhe, die der klassisch berechneten Dimension zugeschlagen werden muss.

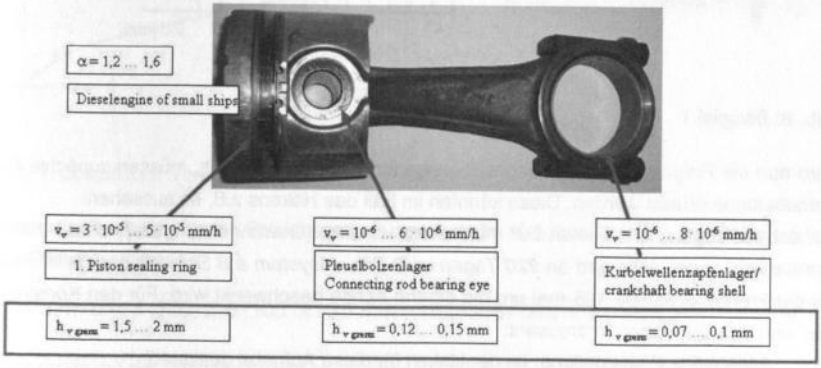


Abb. 5: Beispiele für v_v und α

4. Beispiel einer verschleißbezogenen Dimensionierung

An einer schwer zugänglichen Stelle in einer Montagehalle wird ein drehbeweglicher Haken für ein Versorgungskabel gemäß Abbildung 6 angebracht und belastet. Bei der Dimensionierung wurde aus „Sicherheitsgründen" mit der doppelten Traglast gerechnet. Mit der klassischen Methode ergeben sich in Bezug auf die Streckgrenze bzw. die Zugfestigkeit die folgenden erforderlichen Durchmesser:

$$d_{erf.} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot S}{\pi \cdot \mathrm{Re}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1000N \cdot 2}{\pi \cdot 235 \frac{N}{mm^2}}} = 3{,}2918\ mm \qquad \text{(Streckgrenze)} \qquad (2)$$

$$d_{erf.} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot S}{\pi \cdot \mathrm{Re}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1000N \cdot 2}{\pi \cdot 370 \frac{N}{mm^2}}} = 2{,}623\ mm \qquad \text{(Zugfestigkeit)} \qquad (3)$$

Wegen der im Katalog angebotenen Baureihenstufung (2,8 mm, 3,5 mm, 4 mm, 5 mm,...) fiel die Wahl auf den Haken mit einem Durchmesser &d = 3,5 mm, der im klassischen Sinn als „sicher" gilt.

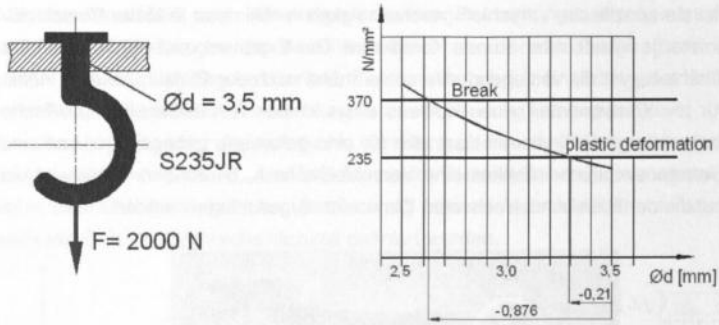


Abb. 6: Beispiel 1

Wird nun die Frage nach der verschleißbezogenen Sicherheit gestellt, müssen zunächst die Betriebsdaten erfasst werden. Diese könnten im Fall des Hakens z.B. so aussehen:
Der schwer zugängliche Haken soll mindestens *4 Jahre* (Gewährleistungszeit) ohne Ausfall überdauern. Jedes Jahr wird an *220 Tagen* im *2-Schichtsystem á 8 Stunden* gearbeitet, wobei der Haken je Stunde *105* mal um die eigene Achse geschwenkt wird. Für den Konstrukteur sind nun die Fragen interessant:

1. Allgemeine Fragestellung: Ist der Haken für diese Aufgabe geeignet?
2. Verschleißrelevante Frage: Ist die erfolgte Materialzugabe von 210 μm gegenüber der Fließgrenze bzw. 876 μm gegenüber der Zugfestigkeit ausreichend?

Für die Beantwortung der Fragen müssen tribotechnische Angaben erfasst sein, die wie folgt aussehen können.

<u>Tribotechnische Werkstoffangaben:</u>
Bei der Montage erfolgt eine Einebnung bzw. der Abrieb der Oberflächenrauheit (h_{vE} = 0,1 mm) . In einem Pin-on-Disk-Test wurden für das vorliegende tribotechnische System die Parameter $v_v = 10^{-6}$ mm/m und α = 1,4 ermittelt.

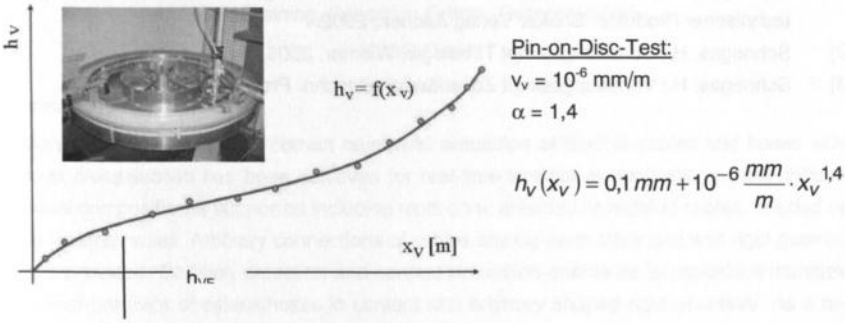


Abb. 7: Spezifische Verschleißkurve

Durch die Betrachtung der Betriebsbedingungen ergibt sich zunächst der geschätzte Verschleißweg x_v mit:

$$x_V = z \cdot \pi \cdot d = 4 \cdot 220 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 105 \cdot \pi \cdot 3,5\,mm = 16255857\,mm = 16255,857m \qquad (4)$$

Zusammen mit der Verschleißfunktion erhalten wir die dazugehörige Verschleißhöhe h_v:

$$h_V(x_V) = 0,1mm + 10^{-6}\,\frac{mm}{m} \cdot x_V^{1,4} = 0,8859\,mm \qquad (5)$$

und damit den Nachweis, dass ein Durchmesser von 3,5 mm nicht ausreichend ist, da die geschätzte Verschleißhöhe h_v größer ist als die Grenzverschleißhöhe hv_{grenz} in Bezug auf den Bruch (siehe Abb. 6). Zu wählen ist aus diesem Grund ein Haken mit einem Durchmesser von 4 mm.

5. Zusammenfassung

Gezeigt werden konnte, dass sich verschleißrelevante Erkenntnisse durch ihre Geometriebezogenheit unmittelbar in den klasssichen Berechnungsalgorithmus integrieren lassen. Gleiches dürfte auch für die Korrosion gelten, die mit ähnlichen Erscheinungsbildern in der Praxis auftritt.

Große Schwierigkeiten dürfte jedoch die Beschaffung von verwschleißrelevanten Daten bereiten, da bisher keine Tabellen der Allgemeinheit zugänglich sind und auch spezifisch ermittelte Daten nicht unbedingt auf andere Systeme übertragbar sind.

Interessant erscheint in diesem Zusammenhang die Möglichkeit der Verschleiß-Simulation z.B. mit dem FEM-Programm Abacus, mit dem auch Verschleißschichten abgebildet werden können.

6. Literatur

[1] Schnegas, H.: Kosten- und zuverlässigkeitsbasierte Auslegung technischer Produkte. Shaker Verlag Aachen, 2002.

[2] Schnegas, H.: Vorlesungsskript Tribologie, Wismar, 2006.

[3] Schnegas, H.: Vorlesungsskript Zuverlässigkeit techn. Produkte, Wismar, 2007.

Simulation and Visualisation of flexible Parts

Ralf Breining, Sebastian Grimm, Gernot Goebels
ICIDO GmbH

Abstract

A highly accurate, physically correct numerical simulation of flexible cables and hoses with circular cross-section has been achieved for real-time interactive applications. Non-uniform material composition is supported including multi-core, shielded or isolated cables, braided or multi-layered hoses. Arbitrary connections of cables among each other and with rigid geometry are provided. Collision detection and contact simulation enable us to reproduce complex nonlinear behavior of cables/hoses in contact with arbitrary shaped rigid geometry. As a result, wiring harnesses with multiple branches can be modeled in a rigid environment and tested in real-time, allowing for digital mock-ups and enhanced product design.

To consider physical cable properties in the digital design phase of a product helps to detect design problems, such as those caused by small bending radii. It also helps to determine production requirements, such as cable lengths and the respectively allowed tolerances. This analysis significantly reduces the costs for physical mock-ups. fleXengine is the only solution for the simulation of cables and hoses combining high precision with interactive update rates on commodity PCs.

Keywords: Virtual reality; Computer-aided design (CAD); Physically based modeling; Numerical algorithms; Applications; Cable and wire simulation..

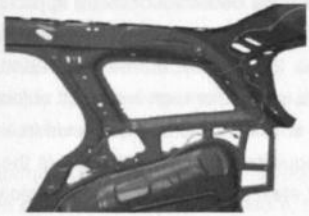


Figure 1: Simulated branching cable in aproduction environment. ©2005 AdamOpel AG / fleXilution.

1. Introduction

When the term virtual reality (VR) was first introduced, it created expectations that could not be met. The hopes were, dynamic immersive environments would soon exist that compared favourably with reality. When the exaggeration in this became clear to the public, the awareness of developments in virtual environments decreased. On the other hand, virtual reality based technology improved. Advances in computer hardware allowed for real-time applications, and thus, for interactivity and immersion on consumer workstations. Plausible physical behavior often superseded purely static environments. Apart from advances in technology,

virtual reality has also found more and more practical and commercial applications during the last decade.

A large area of practical applications of virtual reality can be encountered in the automotive industry, during the design and construction phase. These applications encompass simulations with respect to functional and maintenance analysis.

Traditional product design often involves the production of a series of preliminary models to determine appearance or construction routines and to test functionality. Unfortunately, an excessive need for prototype construction slows down the design process, restrains creativity and produces high costs.

VR techniques can support manufacturing. Digital mock-ups (DMUs) substitute a set of preliminary models. They offer interactive editing and, therefore, a fast working process that enhances product development cycles, improves product quality and reduces costs significantly. As a side-effect, digital mock-ups produce digital model information that can later be used for presentation purposes.

While the simulation of rigid geometry to determine the assembly of a product is already prevalent in practice, the interactive simulation of the physical behavior of compliant parts has not been commercially available by now, although it has been requested by the automotive industry for many years. Cables, hoses and wiring harnesses essentially stand out in automobile production as to their frequent occurrence and complex non-linear elastic behavior. The basic question is cable and wire routing. Primary applications in routing assistance are the determination of required cable lengths and their respective tolerances or the detection of problems like small bending radii as well as the detection of situations when contact or collisions of compliant with rigid parts occur. All of these applications do not only demand a plausible simulation but physical correctness, i.e. the numerical solution of known laws from continuum mechanics is needed. Interactivity, on the other hand, requires fast computation. To combine accuracy with speed is, therefore, an important objective of our work.

As the simulated cables, hoses and wiring harnesses reside in a virtual environment, e. g. in a rigid engine block, another requested simulation feature is the resolution of contact situations between one-dimensional elastic and fully three-dimensional immovable rigid objects. Contact forces, transmitted from the environment to the cable, result in a new shape of the cable that fully prevents interpenetrations. To computationally determine correct contact forces, it is essential to first detect inter-penetration between the virtual objects (collision detection).

The structure of our document is as follows: First we give some idea of the previous work in this area, with a special focus on computer graphics and VR research. Then we will resume the specific contributions of our work. In section 2 we will present an overview of our simulation system, which we will detail in subsequent sections on modeling, simulation, contact detection and resolution. We conclude in section 7 with our results and some thoughts on future research.

1.1 Previous Work

A widely used model for physically plausible elastic bodies in virtual environments is a damped mass-spring system. Mass-spring systems consist of a set of particles, i. e. mass

points without any spatial dimension. These particles usually behave independently according to the laws of free motion, additionally constrained by connecting springs that model inner forces like stretching or bending. Even contact forces and boundary conditions are often modeled as temporal spring connections. This homogeneous treatment of any forces in the system yields an easy implementation and fast computations, the reason for the popularity of the method for interactive environments, e. g. for the simulation of twodimensional cloth. On the other hand, this simplified force model is the drawback of mass-spring systems as to their physical accuracy. Although plausible results are easily achieved, it is difficult to design systems that account for the variety of phenomena described by the laws of elasticity theory. For this purpose, the simple massspring model has been extended in the past [10,11]. Even so, the damped mass-spring method does not distinguish between accuracy of the model itself and its discretization. Thus, we prefer to rely on the well-researched field of numerical computations in continuum mechanics [31,2].

We limit ourselves to elastic, i. e. non-plastic deformations. Cables and wires can then be regarded as elastic objects with one predominant spatial dimension. Considering such objects, one has to account especially for non-linear deformation, as little strain within the one-dimensional object can cause large displacements at its respective ends. This applies to two-dimensional objects like thin plates, membranes and cloth, too [29]. As we assume a small crosssection of the object with respect to its length, we can neglect lateral stress. We, therefore, limit ourselves to consider only stress along the course of the object, i. e. along the elastic line.

There are two discretization methods: (a) Finite differencing of the set of equations that arise for a one-dimensional object and (b) the subdivision of the continuous domain into subdomains, followed by the application of a finite-element method. A natural choice for finite differences and finite elements is to discretize the cables or wires along their elastic line. The finite-element approach is widely acknowledged for its capability to incorporate a variety of phenomena, yet it is somewhat slower than a finite difference scheme [1,23,28,34,36,37,38].

Contact resolution, i. e. determining the new state of an object resulting from contact, is a complex matter as it involves discontinuities [12]. Therefore, the problem has been simplified frequently. Hertz [21], as an early example, reduces the problem to the special question of two three-dimensional isotropic bodies contacting in an area that is small with respect to the surface of the bodies. The computer graphics community has often resorted to heuristic solutions like the application of penalty forces or a simple displacement of all penetrating surface points. Nevertheless, the penalty method does not assure a fully penetration-free solution, nor does a displacement prevent spurious adhesive forces [23,33,37]. On the other hand, these methods have been very successfully combined and expanded and yield fast plausible results that are valid for many VR applications [4,10,11]. It has also been shown that penalty forces can be seen as a regularization of an analytical solution [30].

A popular analytical formulation of the contact problem is due to Signorini. Duriez et al. [15,16], e. g., present an algorithm for threedimensional linearly elastic bodies based on this formulation. The analytical solution of contact problems has also been one of the main driv-

ing forces in the introduction and study of variational inequalities and complementarity problems [19]. The linear complementarity problem (LCP) as a means to analytically solve linear contact problems has first been introduced to the computer graphics community by Baraff [5,6,7,8]. Since then, LCPs have remained prevalent among other analytical methods [14], although there have been recent publications that argue for the formulation of rigid body contact as a minimization problem [22]. As to our knowledge, non-linear contact problems have not been solved in the context of interactive virtual environments.

1.1. Specific Contributions

We present a commercial application that offers a highly accurate, physically correct numerical simulation of flexible cables and hoses with circular cross-section. Our solution combines a precision of less than 1% relative to the length of the cable/hose with an interactive update rate of more than 20 frames per second on today's consumer workstations.

With the fleXengine, composite cables/wires are modeled by their material properties, like mass density, Young's module and Poisson's ratio. The numerical simulation based on this cable/hose model consists of the solution of a system of simultaneous equations per simulated frame. We derived a scheme that stably calculates the penetration and adhesion free state of cables/hoses under contact with a rigid environment in real-time. In this way complex physical phenomena are reproduced, e. g. the bifurcation of a single contact point into two distinct contact points, when the cable/hose touches a rigid half-space. Though our current implementation is not always applicable in cases of physical ambiguity, the robustness of the scheme has been shown for a variety of realistic contact situations in interactive design environments. Thus, we can demonstrate that an accurate analytical solution to a non-linear contact problem is viable and practical in an interactive application.

To guarantee the accuracy, the cables, wiring harnesses and hoses have been evaluated intensively together with several automotive companies. The results of experimental validation show that shapes of wiring harnesses and hoses computed by our approach coincide at high accuracy with the experimentally measured shapes and are more accurate than other methods.

2. Overview

The following section describes the overall process to simulate a single cable per frame, all software components involved, and how they interact. Our simulation system can be deployed in any CA-x or DMU software and virtual reality application. Roughly, one might distinguish three conceptual components contributing per frame (see figure 2). There is a fourth important component, which is in charge of the visualization of the simulated cable and environment. As this component will always be part of the CA-x or DMU software or any other application and as it does not interfere largely with the simulation, we do not describe it here. The first component manages user interaction. It offers an interface to the user (e. g. to the DMU software) to set material and geometric properties. As such, it holds, in particular, the

boundary conditions for the cable at any given time and, generally, implements the run-time modification of any geometrical characteristics and material properties.

Boundary conditions and all other properties are then passed on to the second conceptual component. This second component implements the simulation and, therefore, is the central part of the framework. It starts from the solution of the previous frame, sets up a system of non-linear equations, which it solves subsequently to result in the updated solution of the current frame. The solution of the previous frame is not necessarily needed. Setting up the equations, the simulation component considers boundary conditions and properties from the interaction component as well as information from the collision detection component, which will be detailed below. By accessing data from collision detection, contact forces can be included in the equations, thus, enabling the component to resolve contact. As a set of non-linear equations is solved, our solution automatically considers arbitrary non-smooth three-dimensional contact geometry. The solution is passed on to visualization.

The third component, collision detection, can detect the signed distance from each discrete point on the cable to the most proximate surface of contact geometry. A negative distance means interpenetration. Collision detection also makes the normal at the nearest surface point of the contact geometry available. In the case of penetration this normal indicates the direction of the resulting contact force.

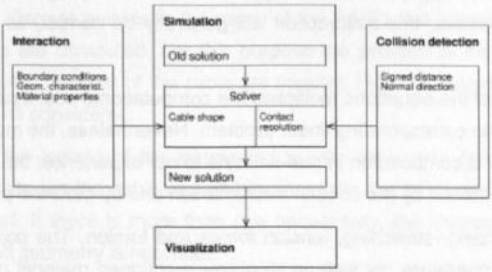


Figure 2: Data flow between the main conceptual componentsof the cable and wire simulation software presented.

3. Modeling cables

As mentioned in the introduction, we make certain assumptions about the cables, wires or hoses, e. g. we assume a small crosssection, thus, only consider stress along the cable and limit ourselves to cables with circular cross-sections. The material distribution must be isotropic, yet within this limitation, nonuniform materials are considered. This includes multi-core, shielded and isolated cables, as well as braided or multi-layered hoses. There are essentially three material properties that have to be declared by the user: mass density, Young's module and Poisson's ratio. For composite materials one combined value must be declared. If the manufacturer of the cable only specifies the single material components, not

the combined properties, the required values would either be computed by an additive formula or in general be determined by measurement.

Geometric characteristics are mainly the length of the cable or hose as well as its inner and outer diameters, describing layer thickness. Boundary conditions are declared by user-defined clips. Clips are specified by their positions and degrees of freedom (DOFs). This allows the cable to rotate around or move along the clip. Branching is mainly defined by respective branching angles, which can be chosen freely. Rigid environment is imported from CAD data. The user also defines gravity and temperature.

4. Numerical simulation

The system of simultaneous non-linear equations per frame is essentially solved by standard methods. To gain enough speed for a computation in real-time, the methods at hand must, of course, be evaluated with respect to framerate. For example, the coherence between the solution of two subsequent frames might be benefited from. Baraff and Witkin [4] give a comprehensive first overview for cloth simulation, which could be applied in a similar manner to cables and wires.

Our current implementation is based on the quasi-static approach. At any frame it determines the equilibrium of the cable, hose or wiring harness. Effects of inertia are neglected. This approach is valid if one is mainly interested in the rest position of the simulated objects or if movements are slow enough, so that the objects assume their rest positions at any frame. In a production environment, this assumption will generally be correct, as it is control that is striven for.

The non-linear part of the equations multiplies the computational cost that is needed to solve them compared to the corresponding linear problem. Nevertheless, the multiplication factor is low, which allows for a computation in real-time. As to our experience, the achieved precision is, therefore, mainly limited by the chosen discretization and by machine precision.

We account for bending, stretching, tension forces and torsion. The computations also regard gravity and temperature, as well as all above mentioned material properties and geometric characteristics. Our simulation routine returns the centerlines, collision areas, forces at arbitrary points and optionally the full cable/hose geometry, hence, providing the primary data for shape and load analysis.

5. Collision detection

The aim of collision detection is to find all intersections between a cable and all geometrical objects in the scene. Since the requirement of our simulation is to work in real-time it is absolutely essential to keep the computation time of the collision detection as small as possible. Since an intersection test is very expensive it is necessary to minimize the number of these tests. In our approach we achieve this by using an axis aligned bounding box (AABB) per rigid body. Afterwards we subdivide the AABBs into voxels. Hence, these computations have to be done only once (e. g. before the DMU software is started). We divide the collision de-

tection system into two separate computational steps, an offline and an online one. The offline step contains all kinds of computations that are not affected whilst working with the simulation. The online step, on the other hand, contains all computations occurring during runtime.

5.1. Offline computation

Assuming that the surface of every rigid body consists of triangles, we build a regular, axis-aligned grid of voxels for each rigid body. The grid is built semi-automatically. The user specifies the number of voxels on the biggest dimension of the AABB, whereas the number of the voxels on the other two dimensions will be computed. Each triangle will then be assigned to all the voxels it touches, so that only the lists of triangles of the intersected voxels have to be taken into account during the online computations.

5.2. Online computation

These computations have to be done at runtime and cannot be precomputed. The collision detection uses the discrete points of the cable-centerline returned by our simulation. For each point, three computations have to be done, whereat after each step the computation can be stopped if it is known that collisions cannot occur.

The three steps proceed as follows:

1. In the first step we test if the discrete point is in the range of the AABB.
2. If the discrete point is in the range of the AABB, the indices of the intersected voxels are computed. For this purpose the position of the discrete point and the outer diameter of the cable are needed. Figure 3 shows three cases which must be considered.
3. After the indices of the intersected voxels have been computed the collision test between the cable and all triangles from the list of each voxel can be performed. If there is more than one penetration, the nearest point to the intersected geometry is returned.

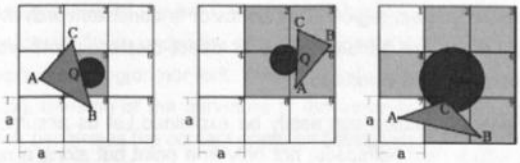


Figure 3: Cases that can occur in the index computation. If thediameter of the cable is smaller than the voxel side (a) and the discrete point is located near the center point of the voxel, only one voxel is intersected (on the left). The discrete point is faraway from the voxel center point. Thus, more than one voxel is intersected (in the middle). The radius of the cable is bigger than the voxel side (a) (on the right).

6. Contact resolution

Once the signed distance to the contact geometry and the surface normal at the nearest point are calculated by collision detection, this data is used to compute the contact force necessary to prevent penetration without introducing spurious adhesive forces. To avoid adhesion is important in order to achieve physical accuracy because contact forces are unilateral [15]. By our implementation we show that a physically accurate solution is feasible in a VR application, also in the case of a non-linear problem.

We are able to demonstrate accuracy of our contact resolution by several test cases, for which the solution is known and has been examined by other authors. We also show that the approach presented does not slow down the computation significantly, so that it can adequately be employed in an interactive environment.

6.1. Accuracy

First we report on some selected test cases. These test cases are computed with our software in three dimensions. Nevertheless, the boundary and contact conditions have been chosen in a way that permits to display the solutions as two-dimensional diagrams by drawing only the centerline of the cable (or hose).

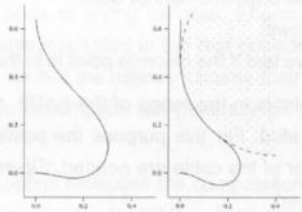


Figure 4: The shape of an elastic line without contact (on theleft) and under contact with a non-linear object (on the right).

Figure 4 shows a cable, on the left without contact and on the right under contact with a rigid cylinder. Boundary conditions were the same in both computations. The contact forces are not distributed continuously along the contact region, but are concentrated in singular points at the boundary of mentioned contact region. This behavior is consistent with the analytical solution [13]. Heuristic solutions like penalty forces or direct displacements would always yield a more even distribution of contact forces.

The singularity of the analytical solution can easily be explained.Let us assume an initially straight cable contacting with a rigid halfspace, not only in a point but along a region. Then assume that there exist continuous contact forces along the contact region, perpendicular to the contact surface, i. e. to the boundary of the half-space. As the cable, and therefore, the elastic line lies within this plane of contact, all bending forces must be located within the plane, too. Bending forces perpendicular to the boundary of the half-space vanish. We have to conclude, there do not exist any forces to balance the contact forces if we do not consider gravity, i. e. there is no equilibrium. We arrive at a contradiction and conclude that there may

only act singular contact forces at the boundary of the contact region. In practice, we have observed that the discretization behaves as a slight regularization of the contact forces, so that our approach can deal with described singularities.

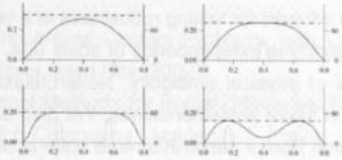


Figure 5: An elastic arch under contact with a half-space (leftand lower axis, solid line, no gravity). Calculated force distribution along the arch (right and lower axis, dotted line). The contact region first concentrates in a singular point (upper right), expands to a region (lower left), and finallyreduces to two isolated points (lower right). There are no contact forces in the interior of the contact region.

A more complex phenomenon, the contact of an elastic arch with a rigid half-space, was e. g. described by Grigolyuk and Shalashalin [20]. They distinguish between three phases. A first contact appears in the (single) point of symmetry of the arch. This contact point expands to a region, when the arch draws nearer to the contact surface. The resulting contact region does "not involve contact forces in the interior of the contact region" [20]. In a third phase the part of the arch interior to the contact region separates from the contact surface. There remain two isolated contact points at equal distance to the axis of symmetry of the arch. This bifurcation is due to the decrease in curvature, when the arch approaches the surface. If the contact point did not fork, curvature would change sign, resulting in penetration (see figure 6).

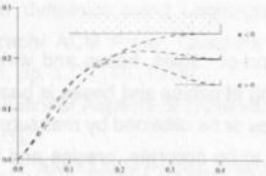


Figure 6: Superposition of the left half of the arch with respect to the situations depicted in the above figure under the assumption that the singular contact point does neither expand to a region nor fork. While the arch approaches the half-space (depicted as wall), the sign of the curvature in the assumed contact point changes. Thus, the arch penetrates the contact plane on both sides of the observed point.

We can observe the described bifurcation of a single contact point in our simulation. Figure 5 depicts the elastic arch without contact and within the three phases outlined by Grigolyuk and Shalashalin.

6.2. VR environment

As we have already stated, contact resolution slows down computation insignificantly, so we can also present a VR application implementing our approach to contact handling (see figure 7). VR examples consider the diameter of the cable, hose or wiring harness. The integration into an interactive application allowed for testing robustness in a variety of practical situations of contact, as well as the algorithms independence of scale (i. e. of cable length). Problematic configurations are those of physical ambiguity. Nevertheless, we believe that we can account for these situations in future implementations. We also did not implement a contact history, so the cable might jump from a penetration-free state at one side of a small object to a penetration-free state at the other side. Very thin contact objects and self-collisions are not considered by our current implementation either.

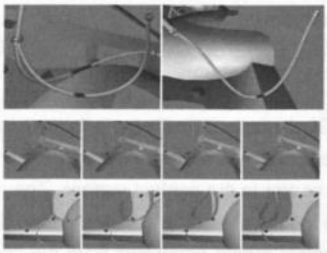


Figure 7: Cable under contact in a virtual environment.Contacting regions are depicted in red color. The exampleshows that our approach can deal with non-smooth contact geometry (above right and below).

7. Conclusion

We have presented the simulation of cables, hoses and wiring harnesses in an interactive environment in real-time. Modeling of cables and hoses is based on their physical properties, which can either be found in tables or be obtained by measurement.

The simulation itself is designed to be accurate, precise and fast by applying a combination of well-chosen algorithms and methods from computational mathematics. Especially, fast contact detection and accurate resolution in real-time are novel and show that a physically based approach to the simulation of contact between cables/hoses and a rigid environment are viable and practical. The accuracy of our contact resolution has been demonstrated by means of an elaborate comparison with other results in literature. Robustness is achieved for a large variety of custom contact situations. Nevertheless, ambiguous physical situations cannot yet be solved. This issue will be addressed in future releases of our software.

The cables, wiring harnesses and hoses have been evaluated together with several automotive companies. The results of experimental validation show that our calculations coincide at high accuracy with the experimentally measured shapes and are more accurate than other methods. We achieve a precision of less than 1% relative to the length of the cable/hose with an update rate of more than 20 frames per second on a P4 3GHz PC.

8. Acknowledgments

Special thanks to the Department of Computer Science (Fachbereich 4) of the University of Koblenz-Landau, Koblenz, Germany.

9. References

[1] AHN, J. Dynamic Frictionless Contact Problems with Linearly Elastic Bodies. PhD thesis, University of Iowa, Iowa City (2002).

[2] AMES, W. F. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 3rd ed. Computer Science and Scienti c Computing. Academic fi Press, Harcourt Brace Jovanovich, Boston (1992).

[3] BARAFF, D., AND WITKIN, A. Partitioned dynamics. Tech. Rep. CMU-RITR-97-33, Robotics Institute, Carnegie Mellon University (Mar 1997).

[4] BARAFF, D., AND WITKIN, A. Large steps in cloth simulation. In Proceedings of SIGGRAPH, ACM Siggraph/ ACM Press, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, pp. 43–54 (1998).

[5] BARAFF, D. Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH) 23, 3, pp. 223–232 (1989).

[6] BARAFF, D. Dynamic simulation of non-penetrating flexible bodies. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH) 26, 2, pp. 137–146 (1992).

[7] BARAFF, D. Issues in computing contact forces for non-penetrating rigid bodies. Algorithmica 10, 2/4, pp. 292–352 (1993).

[8] BARAFF, D. Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies. In Proceedings of SIGGRAPH, ACM Siggraph / ACM Press, Orlando, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, pp. 23–34 (1994).

[9] BARAFF, D. Linear-time dynamics using Lagrange multipliers. In Proceedings of SIGGRAPH, ACM Siggraph/ ACM Press, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM, pp. 137–146 (1996).

[10] BRIDSON, R. E. Computational Aspects of Dynamic Surfaces. PhD thesis, Stanford University, Stanford (2003).

[11] BRIDSON, R., FEDKIW, R, AND ANDERSON, J. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH) 21, 3, pp. 594–603 (2002).

[12] BROGLIATO, B., ed. Impacts in Mechanical Systems: Analysis and Modelling, vol. 551 of Lecture Notes in Physics. Springer, Berlin (2000).

[13] CASTILLO, J., AND BARBER, J. R. Lateral contact of slender prismatic bodies. Royal Society of London Proceedings Series A 543, pp. 2397–2412 (1997).

[14] CLINE, M. B. Rigid Body Simulation with Contact and Constraints. Master's thesis, University of British Columbia (2002).

[15] DURIEZ, C. Contact frottant entre objets déformable dans des simulations temps-réel avec retour haptique. PhD thesis, Université d'Evry, Evry (2004).

[16] DURIEZ, C., ANDRIOT, C., AND KHEDDAR, A. Signorini's contact model for deformable objects in haptic simulations. In Proceedings of IEEE/RSJ Int'l Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, S. 3232–3237 (2004).

[17] EGAN, K. T., BERARD, S., AND TRINKLE, J. C. Modeling nonconvex constraints using linear complementarity. Tech. Rep. 03–13, Department of Computer Science, Rensselaer Polytechnic Institute (Feb 2004).

[18] FACCHINEI, F., AND SOARES, J. 1997. A new merit function for nonlinear complementarity problems and a related algorithm. SIAM Journal on Optimization 7, 1, pp. 225–247.

[19] FUKUSHIMA, M., AND PANG, J.-S. Quasi-variational inequalities, generalized nash equilibria, and multi-leader-follower games. Computational Management Science 2, 1, pp. 21–56 (2005).

[20] GRIGOLYUK, E. I., AND SHALASHALIN, V. I. Problems of Nonlinear Deformation: The Continuation Method Applied To Nonlinear Problems in Solid Mechanics. Kluwer, Dordbrecht (1991). Transl. by M. P. Konyaeva, russ. Title "Problemy Nelineynogo Deformirovaniya", 1988.

[21] HERTZ, H. Ueber die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik 92, pp. 156–171 (1881).

[22] KAUFMAN, D. M., EDMUNDS, T., AND PAI, D. K. Fast frictional dynamics for rigid bodies. Transactions on Graphics (Proceedings of SIG- GRAPH) 24, 3 (2005).

[23] KLIMENKO, S., NIKITIN, I., AND NIKITINA, L. Flexible materials in AvangoTM virtual environment framework. Computer Graphics International, pp. 84–89 (2003).

[24] KLINGENBERG, W. Lineare Algebra und Geometrie, 3rd ed. Springer, Heidelberg (1992). 1st ed. 1984.

[25] KUCHLING, H. Taschenbuch der Physik, 12th ed. Harri Deutsch, Thun (1989).

[26] LENK, R., ed. Physik A–Ma, 2nd ed., vol. 1. F.A.Brockhaus (1989). Eds. of the 1st ed. R. Lenk and W. Gellert.

[27] MEYBERG, K., AND VACHENAUER, P. Höhere Mathematik 2. Springer, Berlin (1991).

[28] MORTON, K. W., AND RICHTMYER, R. D. Difference Methods for Initial-Value Problems, 2nd ed., vol. 4 of Tracts in Pure and Applied Mathematics. Interscience, New York (1957).

[29] MUC, A. Theoretical and numerical aspects of contact problems for shells. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik 35, 6, pp. 890–905 (1984).

[30] PONOMARENKO, A. Lösungsmethoden für Variationsungleichungen. Dissertation, Humboldt-Universität, Berlin (2002).

[31] SOMMERFELD, A. Mechanik der deformierbaren Medien, reprint of the 6th ed., vol. II of Vorlesungen über theoretische Physik. Harri Deutsch, Thun (1978). Ed. and complemented by E. Fues and E. Kröner, 1st ed. 1944.

[32] STEWART, D. E., AND TRINKLE, J. C. An implicit time-stepping scheme for rigid body dynamics with inelastic collisions and coulomb friction. Int'l Journal of Numerical Methods in Engineering 39, 15, S. 2673–2691 (1996).

[33] TERAN, J., SIFAKIS, E., IRVING, R., AND FEDKIW. Robust quasistatic finite elements and flesh simulation. In Proceedings of Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation 2005, K. Anjyo and P. Faloutsos, eds., The Eurographics Association, pp. 181–190 (2005).

[34] TERZOPOULOS, D., PLATT, J., BARR, A., AND FLEISCHER, K. Elastically deformable models. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH) 21, 4, pp. 205–214 (1987).

[35] ULBRICH, M. Nonsmooth Newton-like Methods for Variational Inequalities and Constrained Optimization Problems in Function Spaces. Habitilationsschrift, Technische Universität München (2002).

[36] WEISS, H. Zur Dynamik geometrisch nichtlinearer Balken. PhD thesis, Universität Chemnitz, Chemnitz (1999).

[37] WIENSS, C., GOEBBELS, G., NIKITIN, I., AND MÜLLER, S. Echtzeitdeformation und Kollisionserkennung zur virtuellen Operationssimulation. In Virtuelle und Erweiterte Realität, Shaker, Aachen, T. Kuhlen et al., eds., 2. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR, Gesellschaft für Informatik (2005).

[38] WRIGGERS, P. Computational Contact Mechanics. John Wiley & Sons, Chichester (2002).

[39] ZEIDLER, E., ed. Teubner-Taschenbuch der Mathematik, 2nd ed. Teubner, Stuttgart (2003). Established by I. N. Bronstein and K. A. Semendjajew

Eine integrierte Prozesskette in integralen Blechbauweisen

Reiner Anderl, Zhenyu Wu, Thomas Rollmann
Technische Universität Darmstadt

Kurzfassung

Im SFB 666 (Sonderforschungsbereich 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung") wird eine durchgängige Prozesskette ab der frühen Phase der Produktentwicklung bis zur Fertigung in integralen Blechbauweisen angestrebt. Der vorliegende Beitrag präsentiert die Forschungsaktivität und bisherigen Ergebnisse in der Produktinformationsintegration in SFB 666. Dazu wird zuerst die zu integrierende Prozesskette „virtuelle Produktentstehung" für integrale Blechbauprodukte kurz vorgestellt und dann der Informationsfluß und die Schnittstellen der Prozesskette analysiert. Anschließend wird dann der Integrationsansatz über ein Informationsmodell dargestellt und die Nutzung des Informationsmodells in einer prototypischen Implementierung aufgezeigt. Zum Ende werden kurz ein Ausblick auf weitere Entwicklung und eine Zusammenfassung gegeben.

1. Einleitung

An der Technischen Universität Darmstadt wurde der Sonderforschungsbereich 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung" im Mitte 2005 gegründet, um das enorme Potenzial in integralen Blechbauweisen, die sich auf ein ganz neues Fertigungsverfahren Spaltenprofilieren und -biegen beruht, wissenschaftlich zu erforschen [1]. Die Fertigung integraler verzweigter Blechstrukturen ermöglicht einen neuen Weg zu einer algorithmenbasierten Produktentwicklung, die eine möglichst weitgehenden Algorithmisierung und durchgängige Rechnerunterstützung des gesamten Entwicklungsprozesses anstrebt.

Dazu wird eine Vielzahl neuer rechnerunterstützten Methoden und Verfahren, wie mathematische Topologie- und Formoptimierung, mathematische Optimierung der Abwicklung, CAD-Modellierung für Spaltenprofilieren und -biegen, Umform- und Beanspruchungssimulation, Fertigungsplanung usw. für integrale Blechprodukte entwickelt. Ein wichtiges Ziel im Sonderforschungsbereich 666 ist die Integration der verschiedenen rechnerunterstützten Methoden und Verfahren entlang der Prozesskette „Virtuelle Produktentstehung für integrale Blechprodukte".

2. Prozesskette „Virtuelle Produktentstehung" für integrale Blechprodukte

Die algorithmen-basierten Produktentwickelung integraler Blechprodukte setzt sich zum einen auf die Transformation der Kundenanforderung in mathematisch anwendbare innere Produkteigenschaften, zum andere auf die Einbindung diskreter und kontinuierlicher Optimierungsverfahren auf.

Anhand von Anforderungen und Randbedingungen an das Produkt soll bereits im Vorfeld eine Selektion von potenziell optimalen Geometrien mit Hilfe mathematischer Algorithmen durchgeführt werden. Die Lösungsfindung erfolgt in zwei Schritten, von der Grobtopologie

hin zur Feingeometrie unter Berücksichtigung der exakten funktionellen Modelle und dann von der Feingeometrie zu der optimalen herstellbaren Abwicklung des Bauteils unter der Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen. Der Konstrukteur kann anschließend auf eine bereits definierte, optimierte zweidimensionale Geometrie und Topologie des Blechbauteils zurückgreifen und aufbauend auf diesen Daten - im optimalen Fall automatisiert – ein dreidimensionales CAD-Modell generieren.

Nach der Konstruktion wird die dreidimensionale Geometrie weiter an Umformsimulation geleitet um die Einflüsse der Umformprozesse auf die Produkteigenschaften zu untersuchen. Die anschließende Beanspruchungssimulation bewertet unter Berücksichtigung der Einflüsse aus den Umformprozessen die Schwingfestigkeit des Bauteils in Abhängigkeit der äußeren Belastung und ermöglicht eventuell eine Optimierung der Konstruktion. Nach der Optimierung wird dann die Fertigung mit Hilfe der dreidimensionalen Geometrie des Bauteils geplant.

Die gesamte Prozesskette „Virtuelle Produktentstehung" für integrale Blechbauteile wird in Abb. 1 anschaulich dargestellt.

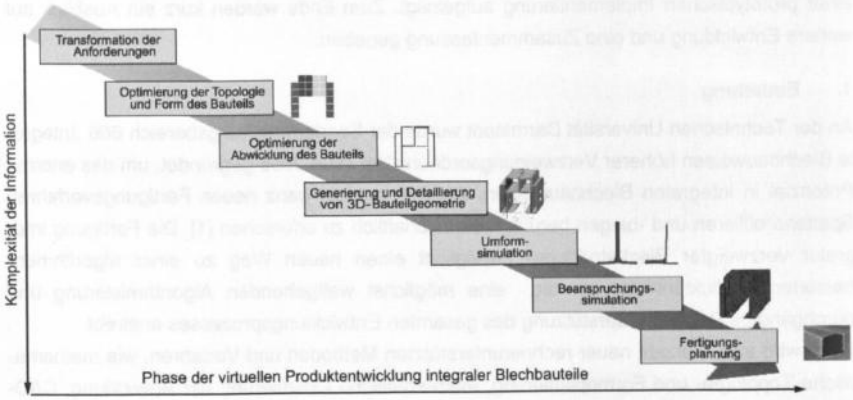


Abb. 1: Prozesskette „Virtuelle Produktentstehung" für integrale Blechbauteile

3. Informationsintegration der Prozesskette

Die Integration der Prozesskette allgemein kann wesentlich über drei Ansätze erfolgen [2]: gekoppelte Prozesskette, integrierte Prozesskette und Prozesskette mit gemeinsamer Datenverwaltung. Während der Ansatz der gekoppelten Prozesskette mit zunehmenden Komplexität der Prozesskette schnell an Grenz stößt und der Ansatz mit gemeinsamer Datenverwaltung keine wirkliche Informationsintegration bietet, stellt der Ansatz als einzige erstrebenswerte Lösung dar.

Die integrierte Prozesskette kann in zwei Wege erfolgen: über standardisierte Schnittstelle wie STEP (Standard for Exchange of Product Model Data) [3] oder über ein integriertes Produktinformationsmodell [4]. Bedingt durch die besonderen Eigenschaften integraler Blechbauteile und die Einschränkungen des standardisierten Produktdatenmodells STEP's [4]

kann die Integration der Prozesskette über die standardisierten Schnittstellen nicht weitgehend unterstützt werden. In Sonderforschungsbereich 666 wird der Ansatz zur Integration der Prozesskette über ein integriertes Informationsmodell für integrale Blechbauteile verfolgt. Aus der Analyse der Prozesskette wurden zunächst die Ergebnisse der jeweiligen Phasen der Prozesskette untersucht und anschließend dann die Produktinformationen zur Beschreibung der jeweiligen Phase ermittelt. Die ermittelten Informationen werden formal in einem UML-Klassendiagramm (Unified Modeling Language) spezifiziert.
Die wesentlichen Ergebnisse der Prozesskette sind die Topologie, die zweidimensionale Geometrie, die Abwicklung, die dreidimensionale Geometrie, die Simulationsergebnisse und die Fertigungspläne.
Die Entwicklung des Informationsmodells erfolgt iterativ wesentlich über zwei Schritte: die Abbildung der jeweiligen Phase in Partialmodelle und die Integration der entstandenen Partialmodelle (Abb. 2: Abbildung) in das integrierte Modell.

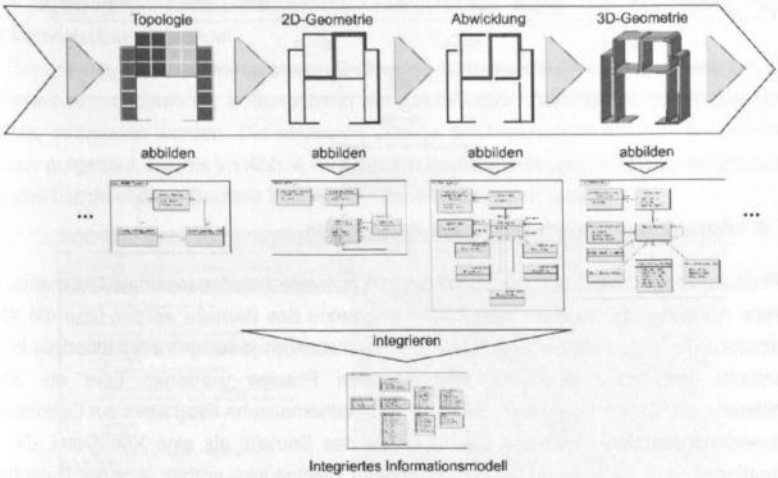


Abb. 2: Abbildung der Produktinformationen

Das Partialmodell Topologie bildet die topologische Anordnung des Querschnittes in diskreten Pixel ab. Als Ergebnis der Topologieoptimierung wird eine Aufteilung des Querschnittes in mehrere Kanäle, die eine oder mehrere Pixel zugeordnet sind. Das Blech wird um die Kanäle herum geordnet [1]. Somit besteht das Partialmodell für Topologie wesentlich aus drei Klassen: Topologie, Kanal und Blechstück. Die Topologie eines Blechbauteils besteht aus mehreren Kanälen und die Kanäle werden von mehreren Blechstücken geschlossen. Die Blechstücke werden jeweils über zwei diskrete zweidimensionale Koordinaten beschrieben und müssen in einer Topologie eindeutig unterschieden werden können genauso wie die Kanäle. Die Informationen lassen sich formal in einem Klassendiagramm aus drei Klassen mit entsprechenden Attributen spezifizieren.

Analog werden die anderen Phasen analysiert und abgebildet. Weitere Details über den Aufbau und den Inhalt des Informationsmodells wurden in [5] beschrieben.

4. Nutzung des Informationsmodells

Zur Verifikation bisherigen Ergebnisse wurde das Informationsmodell in einer objektorientierten Datenbank implementiert und zur Entwicklung, Generierung und Ausarbeitung des dreidimensionalen CAD-Modells eines integralen Blechbauteils prototypisch eingesetzt.
Abb. 3 stellt den Informationsaustausch entlang der Prozesskette anschaulich dar. Die jeweiligen CAx-Systeme tauschen Informationen mit der objektorientierten Datenbank über das XML-Format (eXtensible Markup Language) aus.

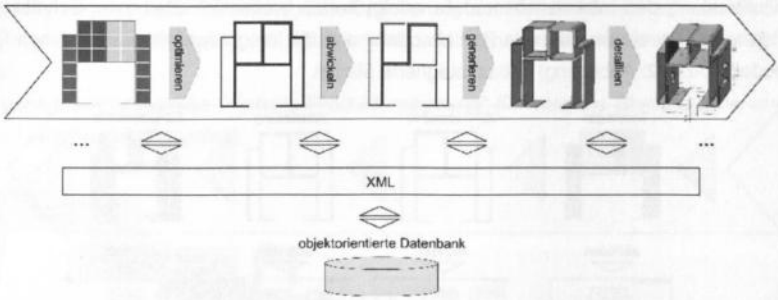


Abb. 3: Informationsaustausch entlang der Prozesskette

Die Produktinformationen über die Topologie, die optimale zweidimensionale Geometrie, die optimale Abwickelung, die dreidimensionale Geometrie des Bauteils werden über die XML-Schnittstelle der objektorientierten Datenbank als Instanzen jeweiliges Partialmodells in der Datenbank gespeichert und den nachfolgenden Phasen wiederum über die XML-Schnittstelle zur Verfügung gestellt. So kann das mathematische Programm zur Optimierung der zweidimensionalen Geometrie die Topologie des Bauteils als eine XML-Datei, die die Informationen über Kanäle und die dazugehörigen Blechstücke enthält, aus der Datenbank auslesen und importieren.
Nach der Optimierung wird die optimale zweidimensionale Geometrie des Bauteils, die zusätzliche Informationen über die Länge und Dicke der jeweiligen Blechstücke enthält, als Instanzen über die XML-Schnittstelle in die Datenbank gespeichert.
Analog erfolgen die anderen restlichen Schnittstellen. Die Generierung und Detaillierung des dreidimensionalen Geometriemodells auf Basis des Informationsmodells wird an dem CAD-Systems Pro/Engineer Wildfire 3.0 erprobt. Bei der Generierung der dreidimensionalen Geometrie wird zuerst aus der zweidimensionalen Geometrie und einer Abwicklung eine Instanz des Partialmodells Geometriemodells in XML-Datei abgeleitet, die aus Geometrie-Features entsteht.
Die konkrete Erzeugung der dreidimensionalen Geometrie in Pro/ Engineer Wildfire 3.0 aus dieser Instanz kann zurzeit über zwei Wege erfolgen. Beide sind prototypische Implementierungen und funktionieren für nicht zu komplexe Geometrie. Der eine geschieht direkt über

UDFs (User-Defined Feature) des CAD-Systems, der anderen über das ACIS-Format SAT. Beim ersten Ansatz werden diese Geometrie-Features über die API (Application Programming Interface) Pro/Toolkit von Pro/Engineer in UDFs umgesetzt, die in der Summe die Endgeometrie des Blechbauteils bilden [6]. Alternative kann zuerst aus der Instanz eine SAT-Datei erzeugt werden und dann die SAT-Datei in das CAD-System importieren.

Die automatische Generierung mit dem Ansatz über die UDFs wird in Abb. 4 demonstriert. Links im Bild wird die Geometrie eines Blechbauteils als Instanz des Geometriepartialmodells in XML-Datei dargestellt. Die konkreten Informationen der XML-Datei resultieren aus den mathematischen Optimierungsprozessen der zweidimensionalen Geometrie und der Abwicklung. Die XML-Elemente wie flange, bend, lfbend und lfsplit beschreiben die einzelnen geometrischen Features zum Aufbau des Blechbauteils, in der konkreten Reihenfolge der Herstellung durch eine Aneinanderreihung von Biege- beziehungsweise Spaltenprofilieren- und -Spaltenbiegenprozessen. In diesen Elementen werden die jeweiligen geometrischen Eigenschaften des Blechbauteils wie Flanschlänge, Biege- oder Spaltwinkel, Radius und Materialstärke abgebildet.

Die Generierung der dreidimensionalen Geometrie läuft algorithmisiert ab, in dem die Geometriefeatures modulweise, entsprechend der Spezifikation des Partialmodells Geometriemodells, verbunden werden. Die einzelnen Zweige der Verzweigungsstellen werden dabei rekursiv aufgebaut. Rechts im Abb. 4 wird die automatisch erzeugte, entsprechende Darstellung des beschriebenen Bauteils im CAD-System Pro/Engineer gezeigt.

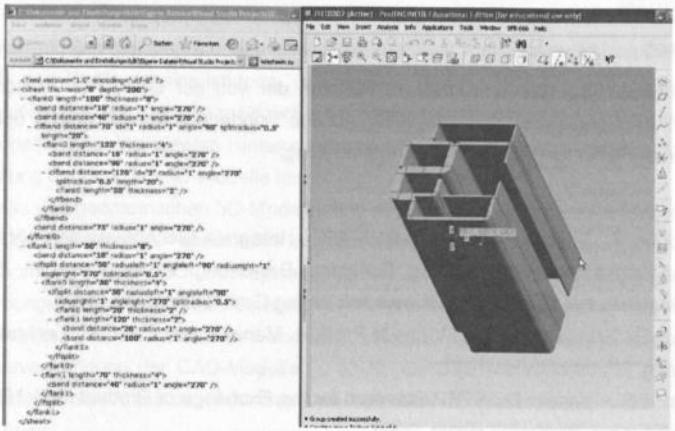


Abb. 4: Generierung eines 3D-Geometriemodells in einem CAD-System

Die Detaillierung des dreidimensionalen Geometriemodells erfolgt direkt in CAD-Systeme. Die Ergebnisse werden dann als Instanzen von Partialmodell Detaillierungsmodells aus dem jeweiligen CAD-System ausgeschrieben. Das Exportieren der Instanzen als XML-Datei kann über API-Programmierung erzielt werden. Einfache Detaillierungsfeatures wie Bohrung, Rundung und Fase wurde bereits prototypisch implementiert.

5. Ausblick und Zusammenfassung

Die bisherige Forschungsarbeit hatte sich auf die Integration der frühen Phasen der Produktentstehung bis zur Generierung und Detaillierung des dreidimensionalen Geometriemodells konzentriert. Folgend wird das Informationsmodell für die Integration der späteren Phasen in der Produktentstehung weiter entwickelt und verifiziert, insbesondere für die Integration der CAD-Modellierung, Umformsimulation und Beanspruchungssimulation. Angestrebt wird eine möglichst weitergehend Integration, die eine Übertragung des Geometriemodells von der Detaillierung und der Simulationsergebnisse aus der Umformsimulation wie z.B. Eigenspannungen und Verfestigungen in die Beanspruchungssimulation ermöglicht.

Ein weiteres Ziel in der nächsten Arbeit ist die Realisierung einer integrierten Entwicklungsumgebung, die die verschiedenen rechnerunterstützten Systeme in sich integriert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Informationsintegration eine grundsätzliche Voraussetzung für die integrierte Prozesskette „Virtuelle Produktentstehung" im SFB 666 ist und das entwickelte Informationsmodell die Integration der Prozesskette weitgehend unterstützt.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Teilprojekte A5 des Sonderforschungsbereichs 666 erzielt. Wir danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

[1] Groche P.: Sonderforschungsbereich 666 – Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung Entwicklung, Fertigung, Bewertung, Tagungsband, 1. Zwischenkolloquium, 06. März 2007, Meisenbach Verlag GmbH, Bamberg, 2007.

[2] Spur G., Krause F.-L.: Das Virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. Hanser Verlag, München/Wien 1997.

[3] Anderl R., Trippner D.: STEP Standard for the Exchange of Product Model Data, Verlag Teubner, Stuttgart-Leipzig, 2000.

[4] Fenves S-J., Foufou S., Bock C., Sriram R-D.: CPM: A Core Model for Product Data, NIST, 2006.

[5] Anderl R., Wu Z., Rollmann Th., Kormann M.: Integrationsmodell für integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung, CAD-CAM Report, Dressler, 2006.

[6] Anderl R., Kormann M., Rollmann Th., Wu Z., Martin A., Ulbrich St., Günther U.: Ein Ansatz zur Algorithmen-getriebenen Konstruktion – Paradigmenwechsel in der Produktentstehung, 5-2007, Konstruktion, Springer Verlag, 2007.

Ein Ansatz zur Erhöhung der Stabilität der CAD-Modelle für die Verbesserung der Modell-Wiederverwendung in der Virtuellen Produktentwicklung

Michael Abramovici, Valentin Meimann

Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik (ITM), Ruhr-Universität Bochum

Keywords

Virtuelle Produktentwicklung (VPE), Modellierungsmethodik, Digitale Modelle, Modell-Wiederverwendung, Modellstabilität

1. Einleitung und Problembeschreibung

Unter dem Begriff *Virtuelle Produktentwicklung (VPE)* versteht man im weitesten Sinne alle rechnerunterstützten Entwicklungsprozesse, einschließlich der Konzipierung, Konstruktion sowie Simulation der Entstehung und des Verhaltens künftiger Produkte [1]. Die rechnerunterstützte Geometriemodellierung, als Ausgangsphase für nachgeschaltete rechnerintegrierte Prozesse, bildet dabei den Kern der VPE.

Bedingt durch die immer kürzeren Produktlebenszyklen und zunehmende Kundenorientierung im industriellen Bereich, werden die bestehenden digitalen Modelle im Laufe der Entwicklung mehrfach modifiziert bzw. für weitere Anpassungskonstruktionen wiederverwendet [2]. Die Nutzung der digitalen Modelle in nachgeschalteten Produktentwicklungsphasen, wie z.B. FEM- und Fertigungssimulationen, und insbesondere für die Entwicklung neuer Produktgenerationen (Abb. 1), stellt zusätzliche Anforderungen an den einheitlichen und strukturierten Modellaufbau. Vor diesem Hintergrund gewinnt die methodische Vorgehensweise bei der Erstellung der digitalen 3D-Modelle immer mehr an Bedeutung.

Der Prozess des geometrischen 3D-Modellierens wird von CAD-Systemen unterstützt, die in der Regel eine parametrisch-assoziative Modellerstellung ermöglichen. Im Gegensatz zu 2D- und nicht parametrischen 3D-CAD-Systemen spielt die Modellierungsvorgehensweise und die Beziehungen zwischen einzelnen Modellelementen eine entscheidende Rolle im Modellierungsprozess. Eine individualisierte und nicht strukturierte 3D-CAD-Modellierung führt bei der Wiederverwendung der CAD-Modelle zu einem enormen vermeidbaren Zeit- und Kostenaufwand, der den Anteil der nicht kreativen Aufgaben im Entwicklungsprozess unnötig in die Höhe treibt.

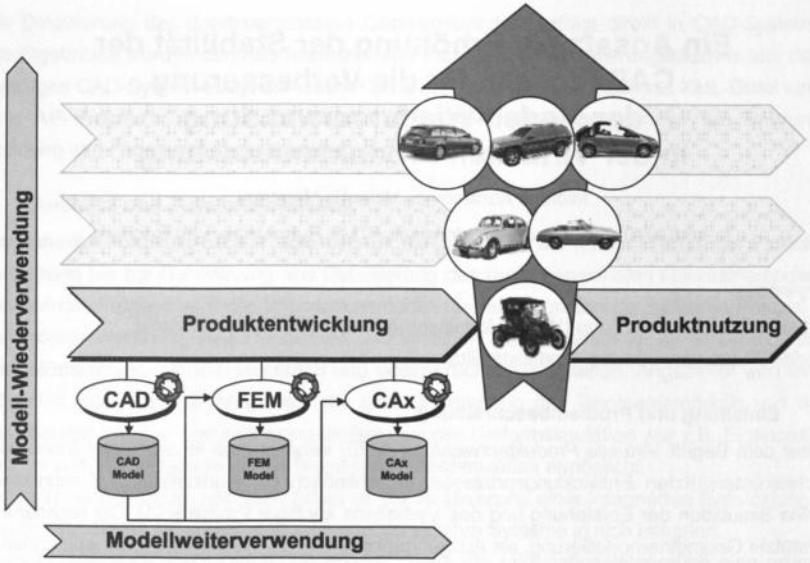


Abb. 1: Problematik der Modellweiter- und Wiederverwendung im Produktlebenszyklus

Der Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik (ITM) der Ruhr-Universität Bochum hat im Rahmen mehrerer Industrieprojekte eine Reihe von Methoden und Richtlinien zur CAD-Modellerzeugung entwickelt mit dem Ziel, die Weiter- und Wiederverwendung der ursprünglichen geometrischen Modelle zu verbessern. Im Folgenden wird einer dieser Modellierungsansätze detailliert vorgestellt.

2. Allgemeine Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Die *Konstruktionsmethodik* enthält konkrete Handlungsweisen für das Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme. Sie nutzt die Erkenntnisse der Konstruktionswissenschaft, der Denkpsychologie sowie industrielle Erfahrungen aus unterschiedlichen Anwendungen [5]. Im Unterschied dazu umfasst die *CAD-Modellierungsmethodik* Empfehlungen zur Beschreibung geometrischer Objekte als digitale Rechnermodelle [6].

Zur Erzeugung rechnerinterner 3D-CAD-Modelle existiert eine Vielzahl allgemeiner, systemneutraler Methoden (z.B. grundkörperorientierte und flächenorientierte Methoden, parametrische Generierungsmethoden) und Techniken (z.B. Konturextrusion, mengentheoretische Verschneidung). Marktführende 3D-CAD-Systeme, wie z.B. CATIA V5, Unigraphics NX4, unterstützen diese Ansätze mit unterschiedlichen Modellierungsfunktionen, mit deren Hilfe 3D-Modelle beliebiger Komplexität erzeugt werden können. Die Funktionsauswahl für jeden Modellierungsschritt muss aber der Bediener eines CAD-Systems selbstständig treffen. Die Kombination einzelner Modellierungsfunktionen ergibt ein CAD-Modell, dessen *Qualität* als

Grad der Erfüllung der gestellten Anforderungen, z.B. im Bezug auf die Modellwiederverwendung, beurteilt werden kann [3], [4].
Ein weiterer wichtiger Aspekt der Qualitätsbewertung eines CAD-Modells ist neben der fehlerfreien Geometrie auch die Eignung des Modells, durch Geometrieanpassungen künftige, noch nicht definierte Anforderungen zu erfüllen. Ein 3D-CAD-Modell, das diese Eigenschaft aufweist, kann als *stabiles Modell* bezeichnet werden. Dabei wird *Modellstabilität* als Fähigkeit eines fehlerfreien CAD-Modells, nach einer oder mehreren Änderungen wieder einen fehlerfreien Zustand einzunehmen, definiert.
Im Bezug auf die *Modellwiederverwendung* stellt die Modellstabilität ein entscheidendes Beurteilungskriterium dar. Im Züge der Produktstandardisierung haben viele Unternehmen ihre Prozesse so umgestellt, dass mehrere Funktionsmodule aus den früheren Produktgenerationen, die den neuen Anforderungen entsprechen, mit nur geringen Modifikationen in die neuen Produkte integriert oder wiederverwendet werden. Im Kontext der 3D-CAD-Modellierung entspricht dieser Ansatz dem Bestreben, möglichst viele Elemente und Bereiche eines Modells zu übernehmen und als Basis für die neuen Modelle zu verwenden [3].

3. Ursachen für instabile CAD-Modelle

Der Einsatz von einem *parametrisch-assoziativen* 3D-CAD-System ermöglicht effizientere Entwicklungsprozesse, stellt aber auch neue Anforderungen an die Denkweise eines CAD-Entwicklers.
Im Unterschied zu den reinen 2D-CAD- und den ersten 3D-CAD-Systemen, wo einzelne Geometrieelemente in keinem direkten Bezug zu einander standen, bilden die *parametrisch-assoziativen* 3D-CAD-Systeme komplexe interne Abhängigkeitsketten, deren Beherrschung während des Modellierungsprozesses von großer Bedeutung ist.
Die verbreitete sequentielle Arbeitsweise in einem 3D-CAD-System, bei der neue Modellelemente auf bereits bestehende referenziert werden, hat hauptsächlich das Modellierungs-Endergebnis im Fokus und vernachlässigt dabei die interne Modell-Repräsentation. Abb. 2 zeigt ein vereinfachtes Beispiel eines einfachen rotationssymmetrischen Bauteils mit einer linearen Abhängigkeitskette. Jedes nachfolgende Geometrieelement ist demnach von allen Elementen in der Kette abhängig. Fällt bei einer Änderung ein Ketteglied weg oder wird es durch ein anderes ersetzt, wird die Kette gestört und alle nachfolgenden Elemente können nicht mehr assoziativ wiederaufgebaut werden.

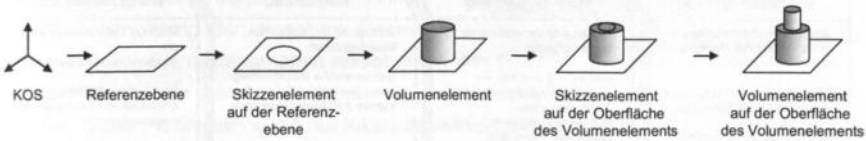


Abb. 2: Interne Abhängigkeitskette bei der sequentiellen Arbeitsweise

In der Praxis weisen 3D-CAD-Modelle häufig eine viel komplexere verzweigte Abhängigkeitsstruktur zwischen einzelnen Elementen auf. Des Weiteren spielt die *Referenzierung* der Geometrieelemente eine wichtige Rolle. Eine Kantenreferenz ist beispielsweise instabiler als eine Flächenreferenz, weil diese mehr interne Bezugselemente besitzt.

Ein ohne Beachtung der o.g. Aspekte erstelltes CAD-Modell ist gegenüber Änderungen sehr empfindlich bzw. *instabil*. Während die Modifikation eines Größen-Parameters in der Regel keine Geometriefehler zur Folge hat, führen die Constraints-Änderungen, wie beispielsweise Ersetzung einer Parallelitäts- durch eine Winkelbeziehung zwischen zwei Geraden, zu nicht konsistenten Geometriemodellen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Modellstabilität von der Anzahl der Modellelemente und der Constraints innerhalb eines CAD-Modells direkt abhängt.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass neben der Anwendung der richtigen Funktionen auch eine methodische Vorgehensweise bei der Modellerstellung erforderlich ist. Diese beinhaltet neben der Auswahl sinnvoller Constraints auch einen strukturierten Modellaufbau bzw. eine daraus resultierende Modellstruktur. Dadurch werden umfangreiche Modelländerungen ohne Geometriefehler auch bei komplexen CAD-Modellen in weiteren Modellnutzungsphasen sichergestellt.

4. Methodische Vorgehensweise zum Aufbau stabiler 3D-CAD-Modelle

Die am ITM entwickelte methodische Lösung für die verbesserte Modell-Wiederverwendung basiert auf der Nutzung von Modell-Vorlagen, für deren Erstellung eine detaillierte Modellanalyse früherer, ähnlicher Modelle erforderlich ist (Abb. 3).

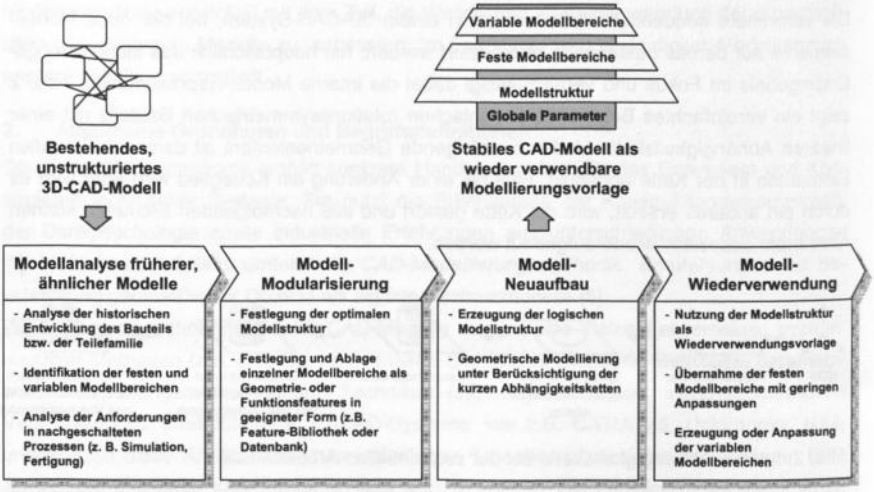


Abb. 3: Methodische Vorgehensweise zur Erzeugung stabiler CAD-Modelle

Dieser Schritt ist eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung einer optimalen Modellstruktur, wobei die Analyse neben der historischen Entwicklung der geometrischen Änderungen an einem Bauteil auch fertigungsspezifische Aspekte und nachgeschaltete firmenspezifische Simulationsprozesse berücksichtigen soll.

Als Ausgangsbasis für die Modellanalyse dient ein in der Regel vorhandenes CAD-Modell bzw. Modellreihe. Das Ziel dieses Schrittes ist es, für die zukünftige Modelle ähnlicher Produkte eine optimale Modellstruktur abzuleiten. Eine spätere Modell-Änderung aufgrund von geänderten Anforderungen oder im Rahmen der Entwicklung neuer Produktgenerationen soll damit einen minimalen Anteil von Routineabläufen beinhalten.

Der festgelegte methodische Modellaufbau erlaubt im weiteren Verlauf eine logische Trennung einzelner Bereiche in Struktur- und Geometrieelemente. Die in der Modellvorlage vordefinierten Bereiche, wie z. B. Flächen- und Volumenbereiche, bilden einen Rahmen, der auf die ähnlichen Produkt-CAD-Modelle übertragen werden kann. In der Abb. 4 ist als Beispiel eine Strukturvorlage, auch oft als *Startmodell* bezeichnet, im System CATIA V5 für ein Motorhaube-Modell dargestellt.

Die Modellierung von festen Modellbereichen, die im Laufe der historischen Entwicklung nur marginalen Modifikationen unterworfen waren, soll nach dem Baukastenprinzip erfolgen, in dem zusammenhängende geometrische Elemente möglichst unabhängig voneinander definiert und zu einem Ergebnis kombiniert werden können. Dies erzwingt eine *Parallelisierung* des Modellierungsprozesses, die zwangsweise zu kürzeren Abhängigkeitsketten führt und als Folge die Modellstabilität erhöht.

Der Einsatz von *wissensbasierten Features* erlaubt des Weiteren eine modellübergreifende Ablage von geometrischen Elementen und Befehlsfolgen als Bibliotheksfeatures, die auch bei der Erstellung von Modellvorlagen für die Modelle anderer Produktreihen verwendet werden können.

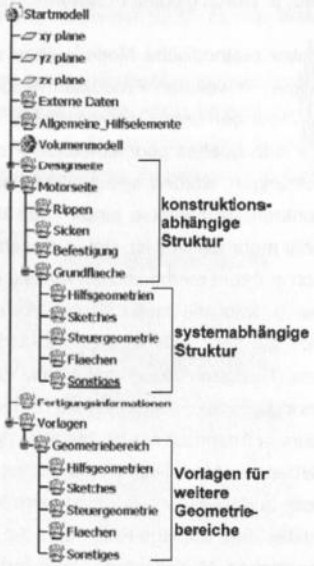


Abb. 4: Strukturelemente des CAD-Modells einer Motorhaube

Die *Parametrisierung* der einzelnen Geometrieelemente sowie Elementengruppen erfolgt durch den Einsatz von lokalen und globalen Parameter. Die *lokalen Parameter* steuern die Geometrien hauptsächlich innerhalb von 2D-Skizzen. Diese Parameter haben nur lokale Auswirkungen und werden im Konstruktionsprozess laufend definiert.

Die *globalen Parameter* beeinflussen dagegen mehrere Modellbereiche gleichzeitig. Die durch den parallelisierten Modellierungsvorgang entstandenen kurzen linearen Abhängigkeitsketten können mit globalen Parametern miteinander verknüpft und somit effektiv gesteuert werden (Abb. 5).

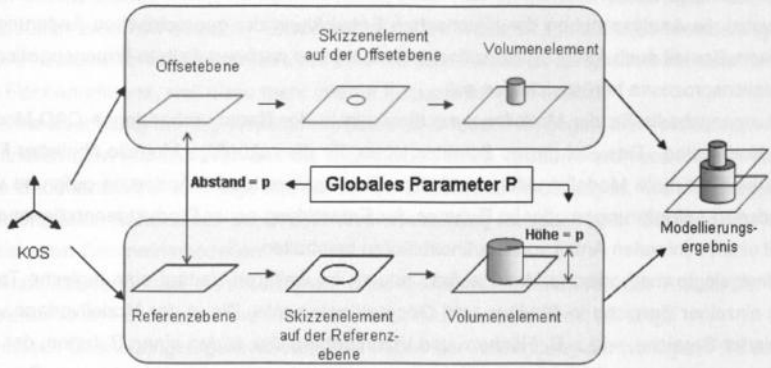


Abb. 5: Durch globale Parameter verknüpfte kurze lineare Abhängigkeitsketten

Dieser methodische Modellaufbau stellt sicher, dass auch bei umfangreichen Modelländerungen in weiteren Produktentwicklungsphasen die CAD-Modelle sich an die neuen Randbedingungen ohne Geometriefehler anpassen.

Die individuellen geometrischen Produktmerkmale, wie z.B. Ausrundungen oder Anschlussbohrungen, werden anschließend produktspezifisch modelliert und stellen somit die höchste Konkretisierungsstufe eines CAD-Modells dar, deren allgemeine systematische Erfassung nicht mehr sinnvoll ist. Die in diesem Bereich zu erstellenden Geometrieelemente orientieren sich in ihrem methodischen Aufbau an allgemeine oder firmenspezifische Teilmethoden.

Der entwickelte methodische Modellierungsansatz zur Erhöhung der Modellstabilität lässt sich auf sehr unterschiedliche Modellarten, wie z.B. grundkörperbasierte Modelle, Styling- bzw. Designmodelle, anwenden. Von der wirtschaftlichen Seite empfiehlt es sich, überwiegend komplexe CAD-Modelle, deren Erstmodellierung mehrere Arbeitstage eines Konstrukteurs in Anspruch nimmt, mit Hilfe der methodischen Lösung zu erstellen.

Neben der Modellkomplexität spielt der Aspekt der Wieder- und Weiterverwendung der Modelle in den neuen Produktgenerationen bzw. in den weiteren Entwicklungsphasen des Produktes eine wichtige Rolle. Laut Aussagen mehrerer Anwendern rechnet sich der in den methodischen Modellaufbau investierte Aufwand nach mindestens zwei umfangreichen Geometrieänderungen.

5. Verifizierung der methodischen Lösung

Die im Kapitel 4 vorgestellte methodische Modellierungsvorgehensweise wurde im Rahmen einer Industriekooperation bei einem mittelständischen Automobilzulieferer in der Praxis verifiziert. Für ein komplexes Blechteil – Lehnenseitenteil (Abb. 6) – wurde eine Modellvorlage entwickelt, die neben den häufig modifizierten Bereichen auch fertigungsspezifische Aspekte berücksichtigt. Die entwickelte Methodik kann für die Modellierung funktionsähnlicher Bauteile unter der Nutzung des wieder verwendbaren Teilefamilien-Startmodells eingesetzt werden.

Abb. 6: Komplexes Praxismodell Lehenseitenteil

Entsprechend der Anforderung nach den kurzen parallelen Abhängigkeitsketten werden in der ersten Modellierungsphase unabhängig von einander Grundkörper (positive Volumenoperationen) und Abzugskörper (negative Volumenoperationen) modelliert (Abb. 7), die feste Geometriebereiche abbilden.

Die *mengentheoretischen Vereinigungsoperationen* dieser beider Elementengruppen grenzen den stabilen Modellbereich ab. Innerhalb dieses Bereiches können sehr umfangreiche Modelländerungen ohne Geometriefehler vorgenommen werden. Somit stellt diese Modellstufe die Ausgangsbasis für die Modellierung ähnlicher Bauteile aus der Teilefamilie Lehnenseitenteil dar.

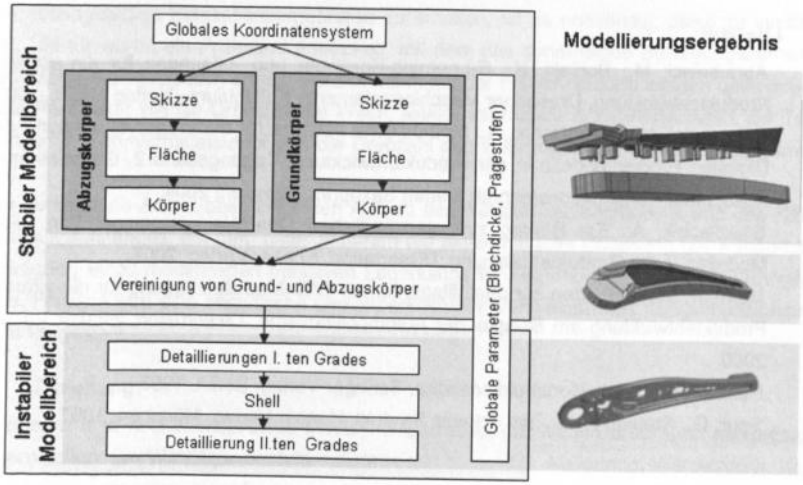


Abb. 7: Anwendung der Methode auf das CAD-Modell eines Lehnenseitenteils

6. Zusammenfassung

Aus der wirtschaftlichen Sicht ermöglicht die durch methodische Modellierung verbesserte Modell-Wiederverwendung deutliche Zeitersparnisse in der Produktentwicklung bei gleichzeitig gesteigerter Modellqualität. Demzufolge amortisiert sich der in den methodischen Modellaufbau investierte zeitliche Aufwand schon nach zwei relativ komplexen Änderungen.

Die Tatsache, dass der allgemeine Methodeneinsatz nur vereinzelt zum signifikanten Erfolg in Unternehmen führt, erklärt sich durch die eingebürgerte Top-Down Konstruktionsvorgehensweise in der Praxis. Demnach werden CAD-Modelle der Einzelteile ausgehend von Baugruppenkonstruktionen erstellt. Es existieren also in der frühen Phase der Produktentwicklung noch keine analysegeeignete Modelle, sie „wachsen" vielmehr mit dem Konstruktionsstand des Produktes und sind in der Regel im CAD-System nicht optimal aufgebaut. Werden jedoch die bestehenden Modelle für weitere Änderungs- und Anpassungskonstruktionen verwendet, werden die Vorteile der methodischen Nachmodellierung aus terminlichen Gründen ignoriert.

Die konsequente Nutzung der Modellierungsmethoden in der Entwicklung bedarf also organisatorischer Unterstützung und transparenter Regeln, die den Nutzen des Methodeneinsatzes für alle Beteiligten nachvollziehbar machen.

Unter diesen Voraussetzungen kann die methodische Modellierung entscheidend zu kürzeren Produktentwicklungszeiten beitragen.

7. Literatur

[1] Abramovici, M.; Borilski, K.: E-Learning-Konzepte und -Lösungen für die virtuelle Produktentwicklung, Dresdener Maschinenelemente Kolloquium , Verlag Mainz, 2003

[2] Abramovici, M.; Stekolschik, A.: Methodische Ansätze für die Weiterverwendung der Digitalen Produktmodelle in der Produktentwicklung, Tagungsband 2. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Verlag Saxoprint, Dresden, 2004

[3] Stekolschik, A.: Ein Beitrag zum ganzheitlichen Qualitätsmanagement von CAD-Modellen in der Produktentstehung, Dissertation, Shaker Verlag, 2007

[4] Meißner, M.: Methoden zur qualitätsgerechten CAD-Modellerzeugung für die virtuelle Produktentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie, Dissertation, Shaker Verlag, 2000

[5] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Springer Verlag, Berlin, 1993

[6] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt, Hanser Verlag, München, 1997

Analytische und experimentelle Verifikationsmethoden anhand eines Wälzlagerkäfig-Simulationsmodells

Till Babbick, Bernd Sauer

TU Kaiserslautern, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik

Kurzfassung

Die Dynamik-Simulation auf Basis der Mehrkörpersysteme hat in den vergangenen drei Jahrzehnten zu großen Fortschritten bezüglich des Verständnisses von Wälzlagern geführt. Mit dieser Technologie lassen sich Wechselwirkungen und Phänomene im Inneren der Lager nachvollziehen und verstehen, die mit experimentellen Ansätzen nur schwer zu erfassen sind.

Am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik der TU Kaiserslautern wurde ein Simulationsmodell eines Rillenkugellagers (6212) in der kommerziellen Mehrkörpersimulationsumgebung ADAMS aufgebaut. Durch die dynamische Simulation dieses Lagers unter 3-dimensionalen Betriebsbedingungen, wie z.B. kombinierte Belastungen und Schiefstellungen, werden das dynamische Bewegungsverhalten des Käfigs und Wechselwirkungen zwischen Kugel und Käfigtasche untersucht. Des Weiteren werden die Wälzlagerkäfig-Simulationsmodelle dahingehend untersucht, dass Betriebsbedingungen gewählt werden, die eine Einsatzgrenze für den Lagerkäfig darstellen.

Um aussagefähige Simulationsergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, diese zu verifizieren. Hierfür wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dem das dynamische Bewegungsverhalten des Käfigs messtechnisch erfasst werden kann. Mit der Prüfeinrichtung werden unterschiedliche Parameter wie die Drehzahl der Welle, axiale und radiale Krafteinwirkungen, die Temperatur im Schmiermittelsumpf und die Drehzahl des Wälzlagerkäfigs messtechnisch ermittelt.

Der vorliegende Artikel beschreibt den Aufbau des Käfigsimulationsmodells und des Käfigdynamikprüfstandes, mit dem unter anderem die experimentelle Erfassung der Käfigorbitalbewegung eines modifizierten massiven Lagerkäfigs für Rillenkugellager (6212) ermöglicht wird. Folgend wird eine analytische und experimentelle Verifikation des Käfigsimulationsmodells vorgestellt.

1. Einleitung

Wälzlager sind hochbeanspruchte Maschinenelemente, die Wellen unter Last reibungsarm lagern sollen. Ein Wälzlager besteht meistens aus Innenring, Außenring, Wälzkörpern, Käfig und -wenn vorhanden- einer Dichtung, die den Schmierstoff im Lager einschließt.

Die Hauptaufgabe des Wälzlagerkäfigs besteht darin, den direkten Kontakt der Wälzkörper untereinander zu verhindern und damit erhöhte Reibung, Wärmeentwicklung und Verschleiß zu verringern. An moderne Wälzlagerkäfige werden jedoch weitere Anforderungen gestellt. Daher existiert heute eine Vielzahl von Käfigausführungen, die für bestimmte Einsatz- und Betriebsbedingungen der unterschiedlichen Lagertypen optimierte Eigenschaften aufweisen.

Die Käfige werden nach der Ausführung (Massiv, Blech), nach den Führungseigenschaften (Innen-/ Außenring oder Wälzkörper-geführt) und nach dem eingesetzten Werkstoff (Metall, Hartgewebe oder Kunststoff) unterschieden [1].
Um die errechnete nominelle Lebensdauer der Lager zu erreichen, müssen möglichst optimale Betriebsbedingungen realisiert werden. Der Käfig bestimmt maßgeblich die Funktionsfähigkeit des Lagers, allerdings ist die Beurteilung seines dynamischen Verhaltens sehr schwierig und stellt eine große Herausforderung dar. Es besteht daher großes Interesse, Schadensrisiken, die unter bestimmten Betriebsbedingungen auf den Käfig zurückzuführen sind, zu erfassen und zu beurteilen.
In den meisten Anwendungen erfüllen die eingesetzten Lagerkäfige über die gesamte Einsatzzeit unauffällig ihre Aufgaben. Der Käfig rückt erst dann in den Mittelpunkt des Interesses, wenn er zum lebensdauerbegrenzenden Bauteil wird. Eine Reduzierung der erreichbaren Lebensdauer eines Wälzlagers kann dabei durch verschiedene Verschleiß- und Schadensmechanismen herbeigeführt werden [1].
Beim klassischen Gewaltbruch beispielsweise bildet ein defektes Element des Wälzlagers den Ausgangspunkt und zerstört im weiteren Verlauf das Lager völlig. Gewaltbrüche am Käfig werden häufig bei der Montage durch unsachgemäßen Einbau, Verspannung oder Kollision begünstigt. Im Betrieb können überhöhte Drehzahlen, zu häufige Lastwechsel oder Schwingungen zu diesem Schadensbild führen. Mangelschmierung oder die Verwendung von Schmierstoffen ungeeigneter Viskosität sind weitere mögliche Ursachen [2].
Bei Rillenkugellagern, die mit vorwiegender oder hoher Axiallast betrieben werden, kann des Weiteren Käfigverschleiß in Form von ausgescheuerten Käfigtaschen auftreten. Mangelhafte Schmierung begünstigt diesen Effekt [2].
Käfigbrüche werden auch durch starke Verkippung zwischen den Lagerringen hervorgerufen. Beim Kugellager beispielsweise laufen die einzelnen Kugeln auf unterschiedlichen Durchmessern. Dies bewirkt unterschiedliche Kugelumlaufgeschwindigkeiten, was zu hohen Zwangskräften zwischen den Kugeln und dem Käfig führen kann [3]. Bei steifen Metallkäfigen sind Verschleiß oder Bruch die Folge. Um diese Schäden zu vermeiden geben die Lagerhersteller Empfehlungen für maximal zulässige Kippwinkel an.
Da der Käfig nicht im festen Kontakt mit den übrigen Lagerteilen steht, wirken sich Käfiggeräusche auf den Körperschall wenig, aber direkt auf den Luftschall des Lagers aus. Radiale Stoßbeanspruchungen können zu Käfigverformungen mit Käfigverschleiß und ungünstige Schwingungsverhältnisse zu Eigenresonanzen des Käfigs führen [4].
Um die Zusammenhänge verschiedener Schadensfälle besser verstehen zu können, wurde am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik der TU Kaiserslautern ein Simulationsmodell eines Massivkäfigs für ein Rillenkugellager (6212) entwickelt [1]. Um ein solches Modell zu verifizieren, können verschiedene Verfahren herangezogen werden. Ausgewählte Verifikationsmethoden werden in diesem Beitrag beschrieben und am Beispiel des Käfigsimulationsmodells und eines entwickelten Prüfstandes verdeutlicht.

2. Kinematik eines Rillenkugellagers

Rillenkugellager setzen sich aus zwei Laufringen, einem Kugelsatz und einem Käfig zusammen. Die beiden Laufringe sind mit Rillen versehen, deren Radius minimal größer ist als der Radius der Kugeln. Somit berühren die Kugeln die Laufringe in je einem Punkt. Durch diesen Punktkontakt ergibt sich geringe Reibung, die hohe Relativdrehzahlen zwischen den beiden Laufringen zulässt. Des Weiteren liegt durch die minimale Radiendifferenz der Rillen zur Kugel eine enge Schmiegung vor, die eine Aufnahme hoher axialer und radialer Lasten ermöglicht. Die Verbindungslinie der beiden Berührpunkte steht lotrecht zu den Laufbahnen und verläuft durch den Kugelmittelpunkt. Entlang dieser Linie wird die äußere Belastung von einem Lagerring auf den anderen übertragen. Diese sogenannte Drucklinie des Lagers schließt mit der Lagerradial-Ebene den Druckwinkel α_0 ein. Abbildung 1 stellt die geometrischen und kinematischen Zusammenhänge im Rillenkugellager dar. Hierbei ist ein Schrägkugellager, das als allgemeiner Fall des Rillenkugellagers behandelt wird, im Quer- und im Längsschnitt abgebildet, um den Druckwinkel graphisch darstellen zu können.

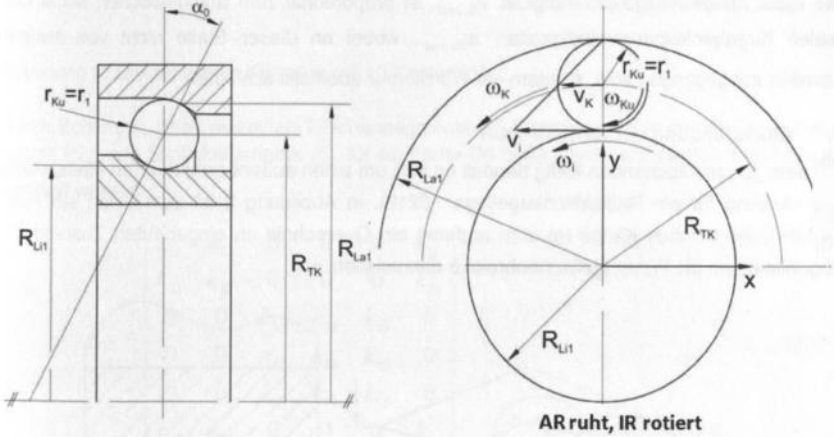


Abbildung 1: Geometrische und kinematische Verhältnisse im Rillenkugellager [1]

Die Bahngeschwindigkeit des Käfigs auf dem Teilkreisradius R_{TK} wird durch das arithmetische Mittel aus den Umfangsgeschwindigkeiten von Innen- und Außenring bestimmt. Mit der Annahme des stehenden Außenrings gilt für die Bahngeschwindigkeit des Käfigs v_K:

$$v_K = R_{TK} \cdot \omega_K = 0{,}5 \cdot v_i = \frac{\omega_i}{2}\left(R_{TK} - r_{Ku} \cdot \cos\alpha_0\right) \tag{2.1}$$

Dies entspricht, unter Annahme reinen Abwälzens der Kugeln, der Bahngeschwindigkeit der Wälzkörpermittelpunkte um die Drehachse des Lagers. Für die Käfigwinkelgeschwindigkeit ω_K bei stehendem Außenring ergibt sich somit:

$$\omega_K = \frac{\omega_i}{2}\left(1 - \frac{r_{Ku} \cdot \cos\alpha_0}{R_{TK}}\right) \tag{2.2}$$

Die Winkelgeschwindigkeit der Kugel ω_{Ku} ergibt sich unter der Voraussetzung reinen Abrollens wie folgt:

$$\omega_{Ku} = -\frac{\omega_i}{2}\left(\frac{R_{TK}}{r_{Ku}} - \cos\alpha_0\right) \tag{2.3}$$

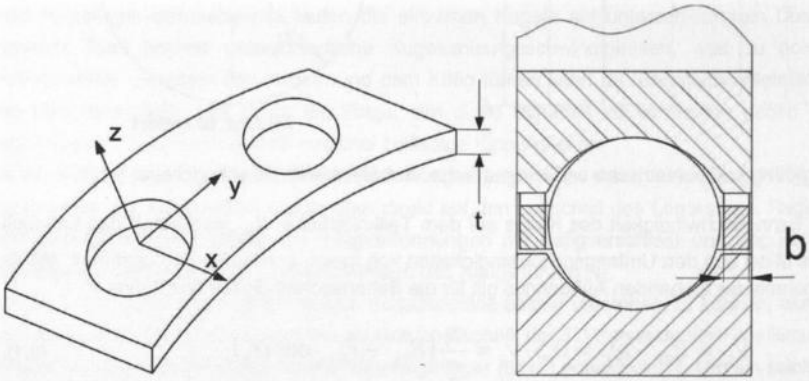
Der Käfigschlupf s_K ergibt sich aus der Käfigwinkelgeschwindigkeit ω_K und der realen Käfigwinkelgeschwindigkeit $\omega_{K,real}$:

$$s_K = 1 - \frac{\omega_K}{\omega_{K,real}} \tag{2.4}$$

Die reale Käfigwinkelgeschwindigkeit $\omega_{K,real}$ ist proportional zum arithmetischen Mittel der realen Kugelwinkelgeschwindigkeiten $\omega_{Ku,real}$, wobei an dieser Stelle nicht von reinem Abrollen ausgegangen wird, sondern die Wälzkörper ebenfalls schlupfen.

3. Modellbildung der Käfigstruktur

Bei dem zu untersuchenden Käfig handelt es sich um einen außenbordgeführten Massivkäfig aus Messing für ein Radialrillenkugellager (6212). In Abbildung 2 ist zum einen ein Ausschnitt eines solchen Käfigs (a) zum anderen ein Querschnitt im eingebauten Zustand (b) abgebildet, um die Führungsflächenbreite *b* darzustellen.



(a) Ausschnitt des MA Käfigs **(b) Führungsflächenbreite**

Abbildung 2: Geometrie des MA-Käfigs [1]

In dem zu verifizierenden Modell wird zur Realisierung des makro-elastischen Käfigs eine Diskretisierung des gesamten Käfigs in *i* einzelne Käfigsegmente vorgenommen. In ihnen sind Masse und Massenträgheiten der einzelnen Segmente hinterlegt, die sich jeweils auf das Koordinatensystem der Tasche beziehen (vgl. Abbildung 2(a)). Die Knoten des diskretisierten Käfigrings sind über Feder-Dämpfer-Elemente untereinander verbunden (siehe Abbildung 3).

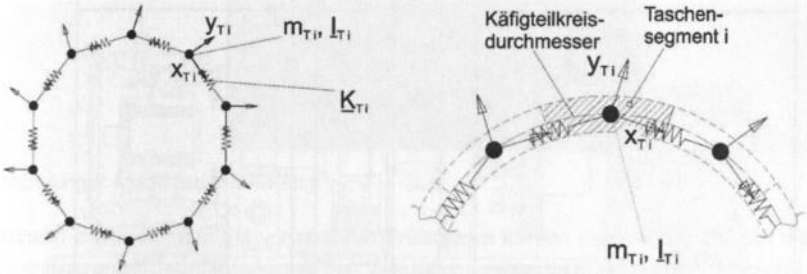


Abbildung 3: Diskretisierter Käfigring mit 10 Knoten [1]

Durch Belastung eines einzelnen Taschensegments mit Einheitslasten in der FE-Umgebung konnte folgende Steifigkeitsmatrix $\underline{K}_T$ für ein Feder-Dämpfer-Element zwischen zwei Knoten ermittelt werden.

$$\underline{K}_T = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & 0 & 0 & 0 & k_{26} \\ 0 & 0 & k_{33} & k_{34} & k_{35} & 0 \\ 0 & 0 & k_{43} & k_{44} & k_{45} & 0 \\ 0 & 0 & k_{53} & k_{54} & k_{55} & 0 \\ k_{61} & k_{62} & 0 & 0 & 0 & k_{66} \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

Weitere geometrische Einflussgrößen wie z.B. thermische Ausdehnung, Fliehkraft und Fertigungstoleranzen werden durch Gleichungen, Massen und Geometriedaten in der Simulation berücksichtigt. Die hydrodynamische Reibung und Dämpfung an den Kontaktstellen des Käfigs sind ebenfalls im Simulationsmodell des Radialrillenkugellagers enthalten.

4. Aufbau des Käfigdynamikprüfstandes

Um das aufgebaute Simulationsmodell des Käfigs zu verifizieren, wurde unter anderem ein Käfig-Dynamik-Prüfstand entwickelt, mit dem Ergebnisse der Simulation experimentell abgeglichen werden können. Der in Abbildung 4 dargestellte Prüfstand ermittelt neben den Randbedingungen wie Drehzahl des inneren Laufrings, Temperatur im Ölsumpf, axiale und radiale Krafteinleitung auch die Käfigdrehzahl und die Orbitalbewegung des Käfigs. Die axiale und radiale Kraft wird an den Stellen **I** und **IV** eingeleitet. Die Drehbewegung der Welle

wir über eine Zahnriemenscheibe im Abschnitt **II** von einem Elektromotor übertragen. Die Drehzahl ist über den Stromrichter und der gewählten Übersetzung stufenlos zwischen 0 und 5000 min^{-1} einstellbar. Im Abschnitt **III** ist ein Stützlager eingebracht. Das Testlager mit dem modifizierten Käfig ist im Abschnitt **V** montiert und lagert die Welle mit dem Spindellager der axialen Krafteinheit als angestellte Lagerung in X-Anordnung.

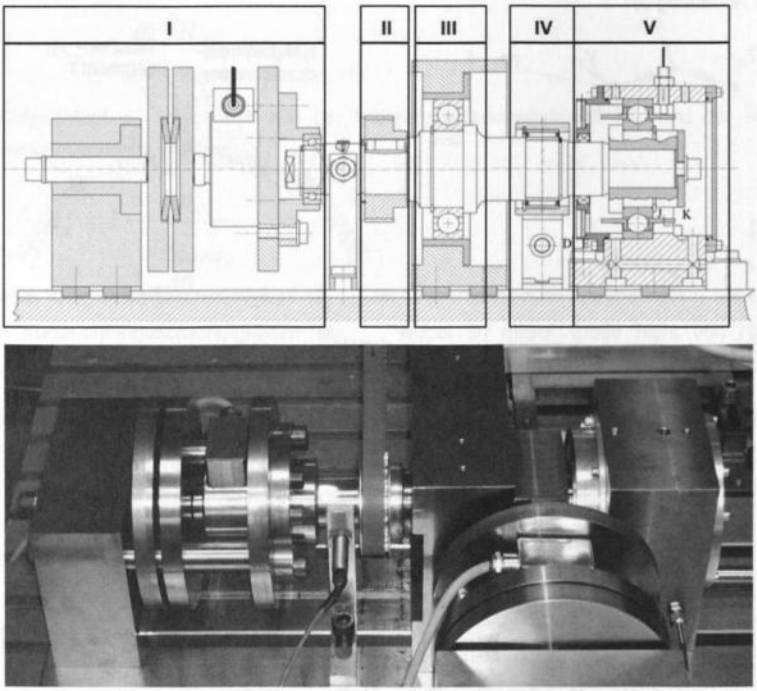


Abbildung 4: Käfig-Dynamik-Prüfstand

In diesem Prüfstand ist die Erfassung der Käfigdrehzahl und Käfigorbitalbewegung über die Modifikation des Käfigs gelöst. (siehe Abbildung 5). Um die Validierung mit dem Simulationsmodell zu gewährleisten sind sowohl die Massenträgheit als auch die Steifigkeitsmatrix des Modells an den modifizierten Käfig angepasst.

Abbildung 5: Modifizierter MA-Käfig

Anhand des in Abbildung 4 vorgestellten Prüfstandes können ausgewählte Größen messtechnisch erfasst werden und mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Somit können grundlegende Effekte wie Käfigdrehzahl, Käfigschlupf und die Käfigorbitalbewegung mit variabler Käfiggeometrie, unterschiedlichen Wellendrehzahlen und Belastungen zur experimentellen Verifikation des Simulationsmodells herangezogen werden.

5. Verifikation

Für einen Vergleich von Simulationsergebnissen mit Messwerten aus dem Experiment müssen die Randbedingungen als notwendiges Kriterium übereinstimmen. Die Simulation kann nur realitätsnah abbilden, wenn alle vorzugebenden Parameter denen des abzubildenden Messpunktes entsprechen. Einige Parameter können auf einfache Art und Weise von der Messung übernommen werden [5]. Dazu zählen Parameter, die sich während des Versuchsbetriebes präzise einstellen lassen, wie die Winkelgeschwindigkeit ω_i des inneren Laufrings, die axiale und radiale Belastung oder das Käfigspiel. Folgend werden exemplarisch einige Verifikationsmethoden vorgestellt, die sich zum einen auf die analytische, zum anderen auf die experimentelle Verifikation stützen.

5.1. Analytische Verifikation

Zu Beginn wird eine statische Lastverteilung aus der Simulation mit bekannten Methoden zur analytischen Berechnung, deren Ansätze beispielsweise in [6] enthalten sind, durchgeführt. Für das untersuchte Lager der Baugröße (6212) ist eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der analytischen Methode für eine kombinierte Belastung von $F_{rad} = F_{ax} = 5000\ N$ in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Statistische Lastverteilung [1]

Kugel Nr.	Analytisch	Abweichung	Simulation
1	1420 N	1,02%	1434,6 N
2	1420 N	0,23%	1423,3 N
3	1560 N	0,59%	1569,2 N
4	2130 N	0,30%	2136,4 N
5	2970 N	0,23%	2976,9 N
6	3400 N	0,14%	3404,9 N
7	2970 N	0,22%	2976,6 N
8	2130 N	0,30%	2136,4 N
9	1560 N	0,59%	1569,2 N
10	1420 N	0,23%	1423,3 N

Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit einer maximalen Abweichung von ca. 1 %. Somit kann in Bezug auf die elastische Verformung und den Normalkräften an den Kontaktstellen von der Stimmigkeit des verwendeten Modellansatzes ausgegangen werden.

Unter der Annahme reinen Abrollens an den Laufbahnkontaktstellen kann die Kinematik des Käfigs mit den oben vorgestellten analytischen Zusammenhängen beschrieben werden. Hierfür wurden Simulationsrechnungen des Rillenkugellagers (6212 MA) mit unterschiedlichen Innenringdrehzahlen von 1000, 2000 und 3000 min^{-1} mit jeweils einer reinen radialen Beanspruchung von F_{rad} = 1000 *N* und einer kombinierten Belastung von $F_{rad} = F_{ax}$ = 1000 *N* durchgeführt. Bei der rein radialen Beanspruchung wird der Druckwinkel $\alpha_0 = 0°$, und bei der kombinierten Last mit $\alpha_0 = 16°$ (nach [7]) angenommen. Das Lager ist ölgeschmiert mit dem Referenzöl FVA Nr.3 bei 60 °C [8]. Bei der kinematischen Verifikation wurden an dieser Stelle Betriebsbedingungen gewählt, bei denen der Schlupfanteil verhältnismäßig gering ausfällt und somit ein nahezu kinematisches Abrollen stattfindet. Der Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 2 zeigt auch an dieser Stelle eine gute Übereinstimmung.

Tabelle 2: kinematische Verifikation, Referenzöl FVA 3 bei 60 °C

Innenring-drehzahl	Druckwinkel α_0	Käfigdrehzahl		
		Analytisch	Abweichung	Simulation
104,72 rad/s	0°C	42,64 rad/s	0,28%	42,76 ±0,03 rad/s
104,72 rad/s	16°C	43,01 rad/s	0,44%	42,82 ±0,04 rad/s
209,44 rad/s	0°C	85,27 rad/s	0,42%	84,91 ±0,08 rad/s
209,44 rad/s	16°C	86,03 rad/s	0,52%	85,58 ±0,05 rad/s
314,16 rad /s	0°C	127,91 rad/s	0,30%	127,52 ±0,03 rad/s
314,16 rad/s	16°C	129,04 rad/s	0,46%	128,45 ±0,05 rad/s

Aus den oben dargestellten Ergebnissen der statischen und kinematischen Grundlagenuntersuchungen ist festzustellen, dass sowohl die Normalkräfte in den Kontaktstellen als auch die Bewegung des Radialkugellagerkäfigs im Simulationsmodell den analytischen Berechnungsmethoden entsprechen.

5.2. Experimentelle Verifikation

Zur experimentellen Erfassung der Käfigdynamik existieren Prüfstände von Gupta [9] und SKF [10]. Der hier vorgestellte Prüfstand lehnt sich an den von Gupta entwickelten Prüfstand an, indem die Käfigdynamik über modifizierte Käfige messtechnisch erfasst wird. Bei dem Käfig-Dynamik-Prüfstand (KFDYN) werden über zwei orthogonal angeordnete Wirbelstromsensoren die Orbitalbewegung des modifizierten Käfigs ermittelt. Die Käfigdrehzahl wird anhand von Nuten im Käfig über einen axial angebrachten induktiven Sensor erfasst.

Zur Verifikation werden zum einen die Käfigdrehzahl und die Orbitalbewegung des Käfigs herangezogen. Messgrößen wie beispielsweise die Kontaktkraft einer Kugel während eines Umlaufs können dem Simulationsmodell entnommen werden, sind derzeit messtechnisch aber nicht realisierbar, so dass durch die Verifikation erfassbarer Parameter auf die Stimmigkeit des Modells geschlossen wird.

Analog zur kinematischen Verifikation wurde die Käfigdrehzahl unter variablen Eingangsgrößen wie Innenringdrehzahl und Druckwinkel bei entsprechend rein radialer (Druckwinkel $\alpha_0 = 0°$) oder kombinierter Last (Druckwinkel $\alpha_0 = 16°$) in Höhe von 1000 N untersucht (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Verifikation des Käfigsimulationsmodells mit dem Prüfstand KFDYN anhand der Käfigdrehzahl bei unterschiedlichen Drehzahlen und Belastungsarten

Innenring-	Belastung			Käfigdrehzahl	
drehzahl	radial	axial	Simulation	Abw.	Messung
104,72 rad/s	1 kN	-	42,76 ±0,03 rad/s	0,7 ±1,1 %	42,47 ±0,5 rad/s
104,72 rad/s	1 kN	1 kN	42,82 ±0,04 rad/s	- 0,4 ±1,8 %	42,98 ±0,8 rad/s
209,44 rad/s	1 kN	-	84,91 ±0,08 rad/s	1,1 ±1,3 %	83,96 ±1,2 rad/s
209,44 rad/s	1 kN	1 kN	85,58 ±0,05 rad/s	0,6 ±1,9 %	85,06 ±1,7 rad/s
314,16 rad /s	1 kN	-	127,52 ±0,03 rad/s	1,4 ±1,6 %	125,75 ±2,1 rad/s
314,16 rad/s	1 kN	1 kN	128,45 ±0,05 rad/s	0,3 ±2,5 %	128,00 ±3,2 rad/s

Die in Tabelle 3 dargestellten Abweichungen zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung und bestätigen die simulierten Ergebnisse der Käfigdrehzahl.

Im Folgenden wird der Käfigschlupf untersucht. Der Wert dieser Größe bewegt sich zumeist in engen Grenzen um die theoretische kinematische Drehzahl (Mikroschlupf). Bei leichtbelasteten Wälzlagern können aber beträchtliche Abweichungen auftreten, die Werte bis zu 70% erreichen. Dieser Schlupf wird Makroschlupf genannt [11]. Dieser Makroschlupf wird mit dem Simulationsmodell untersucht und anhand des Käfigdynamikprüfstandes verglichen. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt, bei denen der Innenring mit 1000 min^{-1} umläuft und die radiale Belastung zwischen 50 und 500 *N* variiert wurde.

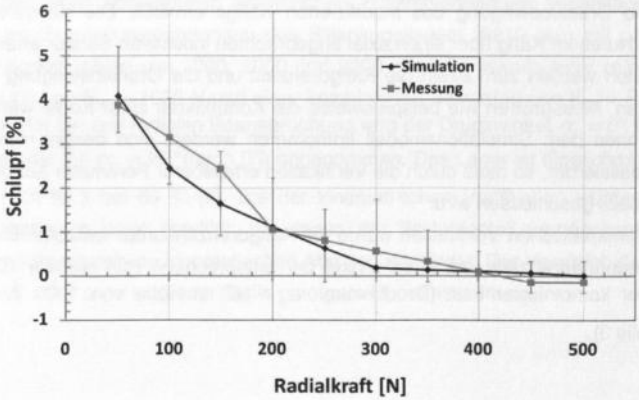


Abbildung 6: Experimentelle Verifikation des Käfigschlupfes beim 6212MA bei einer Innenringdrehzahl von 1000 min^{-1}

Auch bei den experimentellen Untersuchungen zum Käfigschlupf ist eine gute Übereinstimmung zur Simulation zu erkennen, was die realitätsnahe Abbildung der Kontaktbeschreibung im Simulationsmodell bestätigt.

Abschließend wird die Käfigorbitalbewegung des Simulationsmodells mit der Orbitalbewegung des modifizierten Käfigs verglichen. In Abbildung 7 ist die Orbitalbewegungen bei einer

Innenringdrehzahl von 1000 min^{-1} und kombinierten Belastung von 1000 N dargestellt. Abhängig von der Drehrichtung bleibt der Käfigmittelpunkt bei den hier untersuchten Betriebsbedingungen quasi-statisch durch seine Trägheit in den beiden unteren Quadranten.

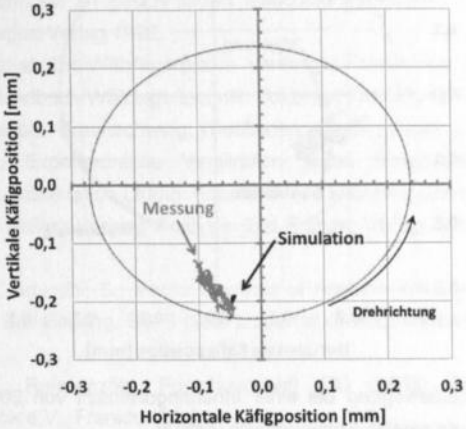


Abbildung 7: Käfigorbitalbewegung bei einer Innenringdrehzahl von 1000 min^{-1} und einer radialen wie axialen Belastung von 1000 N

In Abbildung 8 wird eine Innenringdrehzahl von 2000 min^{-1} und eine kombinierte Belastung von 2000 N gewählt. Es ist zu erkennen, dass sich bei kombinierter Last der Käfigmittelpunkt in der Simulation sowie auf dem Prüfstand entgegen der Drehrichtung im dritten Quadranten bewegt. Der Käfigmittelpunkt verschiebt sich infolge der höheren axialen Last und der erhöhten Drehzahl im Bezug auf die Einstellungen in Abbildung 7 nach oben. Auch hier ist eine tendenzielle Übereinstimmung gut zu erkennen. Gründe und weitere Effekte des Käfigs bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen sind ausführlich in [1] erläutert.

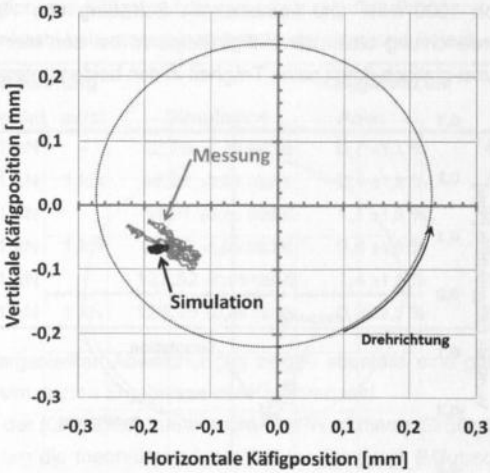


Abbildung 8: Käfigorbitalbewegung bei einer Innenringdrehzahl von 2000 min^{-1} und einer radialen wie axialen Belastung von 2000 *N*

Auch der Vergleich mit anderen Prüfständen zur Untersuchung der Käfigdynamik beispielsweise von Gupta [9] können anhand des Simulationsmodells nachvollzogen werden und erzielen eine sehr gute Übereinstimmung.

6. Zusammenfassung

Bei der virtuellen Produktentwicklung wird die Mehrkörper-Simulation immer mehr zu einem wichtigen Berechnungs-Werkzeug. Hierbei ist das Verständnis des betrachteten Systems (z.B. ein Kraftfahrzeug), seiner Teilsysteme (z.B. Antriebsstrang) bis hin zu einzelnen Elementen innerhalb der Teilsysteme (z.B. Wälzlager) unabdingbar. Erst die Verifizierung der Modelle gewährleistet eine realitätsnahe Abbildung des Systems. In diesem Beitrag wurden analytische und experimentelle Verifikationsverfahren für ein Wälzlagersimulationsmodell eines Rillenkugellagers (6212 MA) vorgestellt. Analytisch können ausgewählte statische und kinematische Ergebnisse des Simulationsmodells überprüft werden. Die hierfür durchgeführten Untersuchungen der statischen Lastverteilung einzelner Kugeln und die Käfigdrehzahl bei unterschiedlichen Drehzahlen und Lastbedingungen erzielen eine sehr gute Übereinstimmung. Die simulierte Käfigdrehzahlen, sowie der Käfigschlupf und die Orbitalbewegung des Käfigs wurden bei unterschiedlichen Belastungen und Drehzahlen anhand des Käfig-Dynamik-Prüfstandes verglichen. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zu sehen. Grundlegende Effekte, die messtechnisch erfasst werden können, stimmen mit den Simulationsergebnissen überein, so dass von einer hohen Vorhersagewahrscheinlichkeit des erarbeiteten Käfigmodells ausgegangen werden kann.

7. Literatur

[1] Hahn, K.: Dynamik-Simulation von Wälzlagerkäfigen. Dissertation (2004): Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik, TU Kaiserslautern.

[2] Bartz, W.: Schaden an geschmierten Maschinenelementen: Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder. Expert Verlag 1992.

[3] Brändlein, J. et al.: Die Wälzlagerpraxis. Vereinigte Fachverlage GmbH 1995.

[4] Dahlke, H.: Handbuch Wälzlagertechnik. Bauarten Gestaltung Betrieb.: Koyo (Hrsg.). überarb. Neuausg.. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, ISBN: 3-528-06572-9. 1994.

[5] Unwerth, T.: Experimentelle Verifikation eines Simulationssystems für eine GASSCREW. Dissertation (2002): Fakultät Maschinenbau, Universität Dortmund.

[6] Harris, T. A.: Rolling Bearing Analysis. 2nd Edition, Verlag John Wiley & Sons, Inc., 1984.

[7] Kawakita, K.; Ariyoshi, S.: Vector Analysis of Angular Velocity Components of Ball Rotation in a Ball Bearing. Bd. 8 (1987): Journal of JSLE International Edition, S 135-140.

[8] Schilling, M.: Referenzöle. Forschungsheft 180 (1985): Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main.

[9] Gupta, P. K.: Modelling of Instabilities of Rolling Elements, Springer Verlag 1984.

[10] Stacke, L. E.; Fritzson, D.; Rydell, B.: Das dynamische Verhalten von Wälzlagern in Simulation und Versuch. Ausgabe 1 (2002): Evolution, AB SKF, Göteborg, Schweden.

[11] Lutz,O.; Brüne, G.: Berechnung des Käfigschlupfes axialbelasteter Schrägkugellager. 31.Jahrgang Nr. 7 (1970): Motortechnische Zeitschrift, Stuttgart.

Bone slice recognition using two layer logsigmoid Artificial Neural Networks

Stanley Baksi, Karl-Heinz Grote
Otto-von-Guericke University Magdeburg

Abstract

Bones of a particular area usually exhibit similar shape and features. This similarity percolates down to the level of internal slices and microstructure of the bones. The present paper explores the methods that can be used to exploit this similarity and develop a system that can recognize the type and part of the bone presented.

Artificial Neural Networks have been extensively used for optical character recognition. The same concept is transplanted to recognize different parts of the Femur, as an example. Different slices from various positions of the extremities and the shank are taken. These slices may or may not represent all the features of a particular part and are the non ideal vectors representing the bone. Thirty such slices for each part is selected from a pool of five different femurs of the right leg of adult males.

The Artificial Neural Network constructed to recognize the bone represented is a two layer, ten neuron networks. The network is first trained on the ideal vectors. It is trained on the noise cases and an error graph against epochs is plotted. After training the network again on the ideal cases, it is tested by presenting random case of the lower extremity, the upper extremity and the shank. It is seen that the network can successfully recognize all three cases. The combination of such templates with template matching techniques would provide for an easy and automatic solution to the problem of automatic surfacing of bone structures.

1. Introduction

Every individual has a unique identity while remaining inside the perimeters of being a classified member of a particular group. This is valid not only for humans as a whole but also for the various components that individually contribute to constitute the human being. This can also be extended to other living beings found in nature and thus constitutes the branch of science known as taxonomy. Taxonomy deals with classification of species in a hierarchical order. Each species belongs to a genus; each genus belongs to a family, and so on through order, class, phylum, and kingdom. This classification requires recognition of similar feature between the species. This process of recognition is sometimes subjective and requires human intelligence that can quantify certain qualities and then compare similarities to form a group and classify certain objects or species. The same approach can also be applied to bones in the human body. Bones belonging to a particular region, say the bones in the limbs have similar shapes and can be classified and identified with respect to their features. If the type of bone can be identified, then the proper template defined for that bone as explained by Baksi et al. [BaGr06] can be selected. This in effect would help in automation of the process for surface reconstructions. Artificial intelligence provides us with a few such mathematical tools that can be used for classification and estimation of various parameters in a system.

The main attributes of intelligence are logical reasoning, learning, adaptation, fault tolerance and self organization. Data and information processing paradigms that exhibit these attributes can be referred to as members of the family of techniques that make up the knowledge based engineering area [Pa90]. Knowledge based systems get their power from expert knowledge that has been coded into facts, rules, heuristics and procedures. One of the basic and essential characteristic of living things is the ability to recognize and identify objects and to reason the various cause and effects. Such systems organized in mathematical forms are known as Artificial Intelligence Systems.

Artificial intelligence can be broadly classified into a) Ability to reason or logical reasoning, like true and false statements and sets and b) Ability to recognize and classify identical objects and or patterns. While logical reasoning has wide spread applications in fields like decision making, inference deducing and methodics [Ki04], pattern recognition and classification have been extensively used in medical field for prediction and diagnosis [Ni86]. This development is facilitated by features of various diseases and anomalies that follow a particular pattern. Extending the same concept, various corresponding anatomical components have similar shapes in different human beings. It naturally follows that the principles mentioned above can be applied to study the patterns of various body parts and the system can be trained to recognise and predict when an instance is presented to it. The objective is to test whether a specific data structure is an instance of a given general pattern and particularly, to establish whether input data items can provide values for pattern variables. The schematic working of pattern classification is shown in Fig. 1.

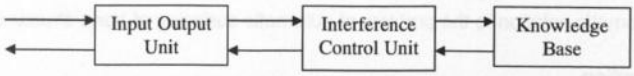


Fig. 1: Schematic working of Knowledge based systems

Shown in Fig. 1 is an input output unit which receives the instance from the seeker. The instance can be in the form of segmented cases, probabilistic values or sharp numerical values. The instance is then converted in a suitable format in the interference control unit, which can then be presented to the "trained" knowledge base to extract an answer. The answer is then converted back to a form compatible with the seeker. Paradigms of knowledge based system, that can be used in pattern recognition and classification are, Fuzzy Logics, Artificial Neural Networks (ANN), and Evolutionary Computing. For the purpose of indentification of bone features, the research presented in this paper focuses solely on ANNs.

2. Artificial Neural Networks

ANNs are a system of linear equations which behave in a manner similar to the human brain trying to learn behaviour of a system from its instances. The system usually has many parameters and elements which are interconnected in a complicated way, such that, it is not easily defined by simple mathematical equations. There are two key similarities between biological and artificial neural networks. First, the building blocks of both networks are simple

computational devices that are highly interconnected. Second, the connections between neurons determine the function of the network. Both networks behave in roughly the same manner [HaDe03]. The schematic working of the neural network is shown in Fig. 2. The network consists of a group of interconnected neurons, each of which have a certain weight associated with it. The network is trained to match a particular output for a given input. The training is done through iterations in which the weight between the neurons is iteratively adjusted till the output data obtained matches the standard set of output within acceptable error limits.

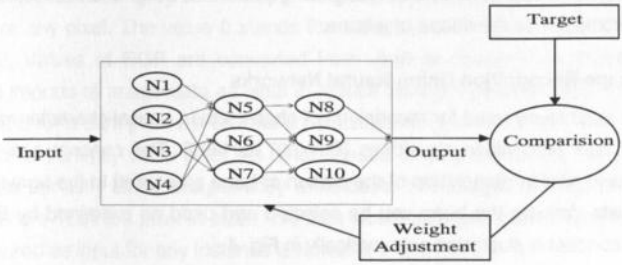


Fig. 2: Concept of Neural network

A basic ANN would contain an input layer, one or more layers of Neurons and an output layer. The layer of neurons is basically a transfer function that processes the input to give an output in the desired form. The layer or neurons is composed of weight and bias matrices connected to the other layers with transfer functions. The neural network can be a single layer neural network or multiple layer networks. The most general form as explained by Hagan et al. in [HaDe03] of a neural network is represented in Fig. 3. "p" represents the input matrix, "W" the weight matrix, "b" the bias, "*f* "the transfer function and "a" the output from the system.

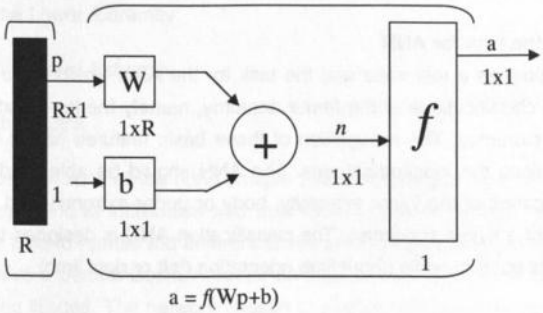


Fig. 3: Representation of a neural network

The succeeding paragraphs elaborate on the ability of neural network to identify the various parts of a pre-learned example. This concept is applied to identification of bones, with an outlook to utilize the system for identifying particular types of bones or parts of bones and then select a predefined template or process that would match the bone type presented and help in reducing some of the manual steps involved in reconstruction of bone surfaces. Multi-layer networks are inherently more powerful than single layer networks. The problems solved in this chapter use two or more layer networks. These networks have been trained to demonstrate capabilities of such systems in recognizing parts of a bone and in prediction of parameters that would define the shape of a bone.

3. Bone Shape Recognition Using Neural Networks

ANN has been extensively used for recognition of characters in optical character recognition, fingerprint and face recognition algorithms [BuWa97,JaHa99]. The concept can be further expanded so as to help in recognition of the portion of bone presented to the network so that a proper template defining the bone can be selected and used as explained by Baksi et al [BaGr06]. The concept is illustrated schematically in Fig. 4.

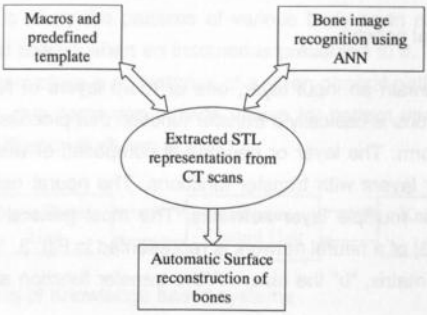


Fig. 4: Schematic representation of the process for Surface automation of bones

3.1. Defining the task for ANN

The femur is taken as a test case and the task for the ANN would be to identify the three basic structural classifications of the femur anatomy, namely the lower extremity, the shank and the upper extremity. The recognition of these basic features has to be done from CT images taken along the longitudinal axis. The ANN should be able to identify the images taken at any location of the lower extremity, body or upper extremity and should not be restricted to that of a single specimen. The classification ANN is designed to function for any femur of humans but is specific about limb orientation (left or right limb).

3.2. Conversion of images to matrices

For applying techniques of ANN for recognition of images from CT scans, the images have to be modified to a suitable format. The images from CT scans are usually in DICOM format and they can be directly exported to JPEG [JP04] format. This format can be directly read into MATLAB [MAT]. MATLAB converts the images into a matrix of dimension 'X'x'Y'x3 where X and Y denote the rows and columns of the matrix respectively. The JPG images are expressed in RGB values. The values are expressed in a scale of 0 to 255. Since DICOM images are expressed in grey scale, all the images imported have same value for all three R, G and B for any pixel. The value 0 stands for a black pixel and the value 255 stands for a white pixel. Values of RGB are converted from uint8 to double data structure. MATLAB stores and imports all image data as uint8 to reduce storage space. If normalized, the values of R, G and B for a dark pixel will be 0 for a perfectly black pixel and the values of R, G and B will be 1 for a perfectly white pixel. All other shades of grey are scaled from 0 to 1 and lie between the perfectly black and perfectly white case. The images of bone shapes provided to MATLAB are 150x150 pixel in size. This data would thus generate a 150x150 matrix. The matrix required as input for any instance is however in the form,

$$p = R \times 1$$

where, R = Number of rows for the matrix.

Thus a 150 x 150 pixel image would generate a 22500 x 1 size matrix as input. Since the identification algorithm has to classify an instance between the three cases of the upper extremity, the shank and the lower extremity, any input vector p has to be composed of all three elements and hence would be a 22500 x 3 matrix.

3.3. Network architecture

The network receives the 150x150 pixel image of the bone section as a 22500 element input vector. It is required to identify the bone section with a three element output vector since the number of types to be identified is three. The output vector associated with each element is,

a) [1;0;0] for the Lower Extremity

b) [0;1;0] for the Upper Extremity

c) [0;0;1] for the Shank

Due to varying cross sections of the bone images and also taking into consideration the different bone shapes found in individuals and their orientations at the time of scanning, the network should be able to handle the different cases presented to it. In practice the network would never perceive a perfect Boolean vector as input due to Hounsfield units associated with the surrounding tissues. The network chosen to perform the classification is a two layer log-sigmoid/log-sigmoid network. This transfer function is particularly useful for outputs with Boolean values. The network is shown in Fig. 5.

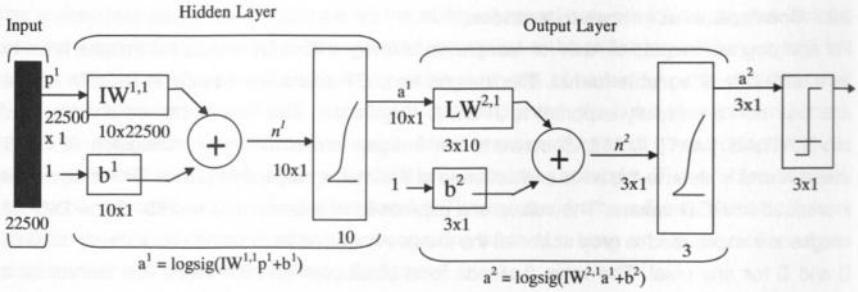


Fig. 5: Representation of two layer, ten neuron Network for recognition of Femoral sections

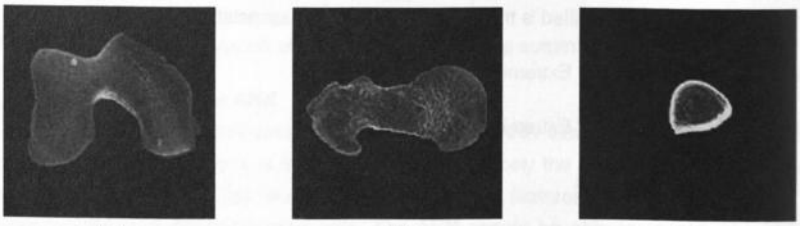
The Hidden layer (first layer) has 10 neurons. This number was decided upon by trial and error for optimum learning rates and minimum errors. The network is trained to output the vectors presented above for the values of the Lower Extremity, the Upper Extremity and the Shank. However, noisy input vectors may result in incorrect outputs that are not clearly 0s and 1s. Hence the output is passed through a hardlims function with the decision boundary at 0.2. This changes the output to a bunch of 0's and 1's.

4. Training the Network

The network has to be designed so as to handle both data with and without noise. Hence the network is trained both on ideal and noise vectors.

4.1. Ideal Vectors

The network is first trained on ideal vector (data), till a low sum squared error is achieved. The ideal images which were later converted to vectors are presented in Fig. 6.



(a) (b) (c)

Fig. 6: Ideal images of the lower extremity, the head and the shank presented to the network. (a) lower extremity, (b) upper extremity and (c) shank

The figures are considered ideal in the sense that the data involved is either purely black or purely white, i.e. the normalized values of the pixel are either 0 or 1. Furthermore in the images presented in Fig. 6. (a), (b), and (c), the lower extremity clearly exhibits the essential features like the lateral and medial condyles, the patellar surface and the intercolloid fossa. The upper extremity exhibits the arc of the head, the formation of the neck and the greater

trochanter. The shank exhibits the protrusion of the linea aspera. The training was done using the traingdx [WaQu05] algorithm. 'traingdx' is a network training function that updates weight and bias values according to gradient descent momentum and an adaptive learning rate. The performance goal of 0.1 was reached after 208 Epochs. The variation of performance goal with Epochs is presented in Fig. 7.

4.2. Noise Vectors

The vector is also trained on noise examples. In these examples the grey values are allowed to remain. Thirty noise examples were prepared from different samples. The images were selected at different positions on the lower extremity, upper extremity and the shank. Representations of noise are shown in Fig. 8. The figure represented is on a linear scale with dark blue representing the completely black pixel and red representing the completely white pixel. The network was first trained twice on the vectors without noise. The network was then trained on 30 instances of noise vectors. The noise vectors are named bone01, bone02.... , bone30.

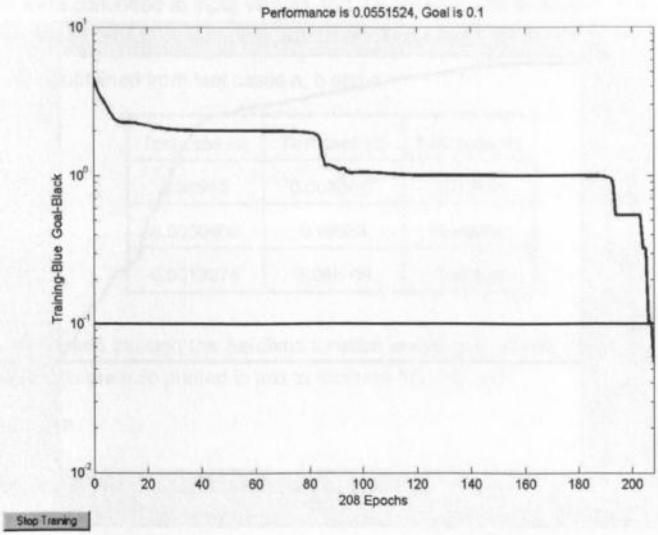
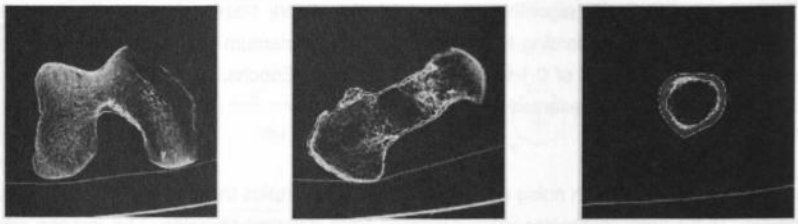


Fig. 7: Performance of the network trained on ideal images or vectors



(a) (b) (c)

Fig. 8: Image representation of Noise vectors for (a) lower extremity, (b) upper extremity and (c) shank

For the first pass the performance goal of 0.6 was met in the 112th approach (Fig. 9) while for the subsequent passes, the performance goal was met in the first or the second approach.

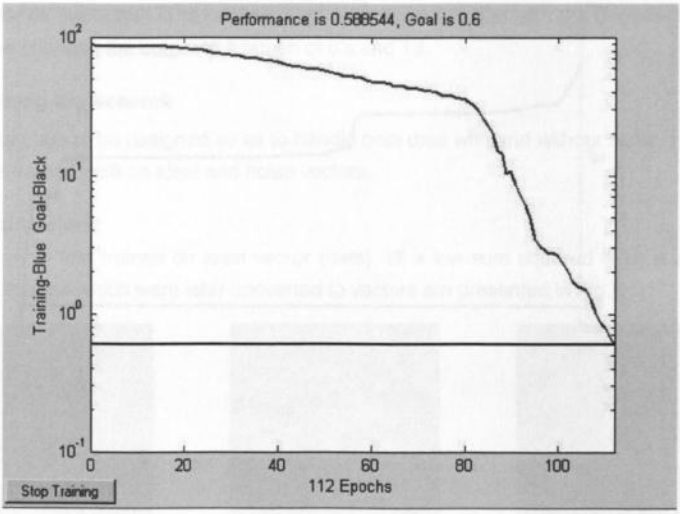
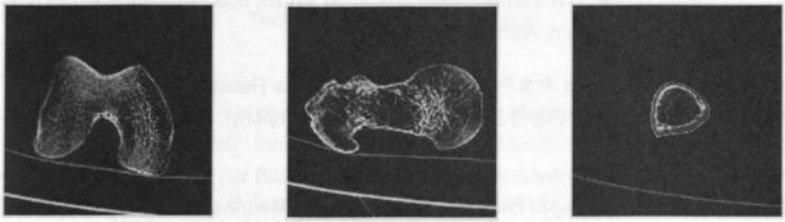


Fig. 9: Performance of the system with noise data

5. Testing of the Network

Three test cases were presented to the network. The test cases were unknown to the network and they were included with noise. The test cases are shown in Fig. 10.



(a) (b) (c)

Fig. 10: Test examples presented to the ANN. (a) lower extremity, (b) upper extremity and (c) shank

The images were converted to input vectors and the network was simulated. The results obtained are presented in Table 1.

Table 2: Results obtained from test cases a, b and c

Test case (a)	Test case (b)	Test case (c)
0.98943	0.0020427	0.013121
0.0050606	0.99553	0.049656
0.0013274	6.09E-08	0.96529

The result processed through the hardlims function would give us the results in the correct format. The results are also printed in text to facilitate the end user.

6. Conclusion

A two layer neural network was designed that was able to identify the basic features of a Femur presented to it. The network could reach its performance goals fairly easily and showed little error. The basic nature of the log-sigmoid network ensured that the output was not in binary numbers. But the output was very close to the desired values and simple hardlims or survival approach would ensure the result in binary terms.

7. Reference

[BaGr06] Baksi, S.; Grote, K.-H.: "A Template to Match the Lower Extremity of the Femur", In, Brökel, K. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.); Stelzer, R. (Hrsg.): In, 4. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2006 am 28. und 29.09.2006 im Ostseebad Kühlungsborn. Aachen: Shaker

[BuWa97] Bunke, H.; Wang, P.S.P.: Handbook of Character Recognition and Document Image Analysis, World Scientific Publishing Company, 1997, ISBN-10: 981022270X

[JaHa99] Jain, L.C.; Halici, U.; Hayashi, I.; Lee, S.B.; Tsutsui, S.: Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition, Crc Press International Series on Computational Intelligence, 1999, ISBN-10: 0849320550.

[Jp04] More information under:www.jpeg.org/committee.html

[HaDe03] Hagan, M.T.; Howard, B.D; Beale, M.: Neural Network Design, Thomson Learning, 2003

[Ki04] Kimura, I.: Product Development with Mathematical Modeling, Rapid Prototyping and Virtual Prototyping (Fortschritte in der Maschinenkonstruktion S. Ph.D thesis), ISBN: 3-8322-0896-8, Shaker Verlag

[MAT] More information under: www.mathworks.com

[Ni86] Nilsson, N.J.: Principles of artificial intelligence Tioga Pub. CA & Springer Verlag. 1986

[Pa90] Patterson, D.W.: Introduction to artificial intelligence and expert systems, Prentice Hall, NJ, 1990

[WaQu05] Wang, L.; Quek, H.C.; Tee, K.H.; Zhou, N.; Wan, C.: Optimal Size of a Feedforward Neural Network: How Much does it Matter?, Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services, 2005. ICAS-ICNS 2005.

Digitale Prozesskette zur Erstellung individueller Implantate

Steffen Schreiber, Christine Schöne, Asmus Figge
Technische Universität Dresden

Kurzfassung

Endoprothesen werden in der chirurgischen Praxis heute in einem standardisierten operativen Verfahren angewendet. Individuell angepasste Endoprothesen sind aus der Literatur bekannt. Diese werden auf der Basis von Stereolithografiemodellen händisch angepasst.
Die Vorteile liegen in der formschlüssig angepassten Kontur begründet. Für die Individualisierung sind die konkreten patientenbezogenen Daten im lokalen Umfeld der avisierten Endoprothese von Interesse. Anhand von Kiefergelenkendoprothesen wurde dieser Ablauf virtuell erprobt und qualifiziert. Eine Softwarelösung, die eine parametrisierte Endoprothesenpaarung patientenspezifisch generieren kann, unterstützt diesen Prozess.

Abstract

In surgical practice, endoprostheses are used in a standardised operation technique today. Individually modified endoprostheses are known from literature. Endoprostheses of this kind are manually fitted based on stereolithography models.
The advantages are founded by their contour being adapted in a positive fit. For individual sation, the precise patient-related data nearby the announced endoprothesis are of interest . This process was virtually tested and qualified by means of jaw joint endoprostheses. It is supported by a software solution able to generate a parameterised endoprostheses' matching specifically to each patient.

1. Ausgangspunkt und Motivation

Im Bereich des Maschinenbaus haben die Verfahren zur 3D-Datenerfassung komplizierter Geometrie, die Aufbereitung der diskreten Daten zu CAD-Modellen, die Berechnung der Festigkeit und die generativen Fertigungsverfahren in den letzten Jahren Einzug gehalten. Inzwischen ist es möglich, nicht nur Prototypen (Rapid Prototyping) durch den generativen Aufbau von Material zu erstellen, sondern auch Objekte, die für den direkten Einsatz vorgesehen sind (Rapid Manufacturing). Durch diese Entwicklung können Bauteile in kurzer Zeit hergestellt werden, da außer der Datenaufbereitung keinerlei weitere Vorbereitungen, wie zum Beispiel die Herstellung von Werkzeugen, notwendig sind. Diese modernen Verfahren für die Individualisierung von Endoprothesen und Implantaten für die medizinische Praxis zugänglich zu machen, ist Zielstellung der Arbeit.
Endoprothesen und Implantate werden in der chirurgischen Praxis heute in einem standardisierten operativen Verfahren angewendet. Diese Endoprothesen/ Implantate werden je nach Einsatzort im menschlichen Körper von unterschiedlichen Herstellern in verschiedenen Größen bereitgestellt. Sie liegen vor einer Operation physisch zwar in vielfältigen Varianten vor, bieten aber dennoch nur eine

begrenzte Möglichkeit der individuellen Anpassung beim Patienten. Insbesondere ist bei der Implantation auf Oberflächengeometrien zu orientieren, die sich unter Einhaltung eines Spaltmaßes nahezu formschlüssig an den Restknochen anschmiegen. Dadurch wird die Kontaktoberfläche zwischen Restknochen und Implantat erhöht. Es steigen damit die Einheilchancen des Implantats und die Belastungen des Restknochens können minimiert werden. Die Vorteile liegen also in der angepassten Kontur begründet. Für die Individualisierung von Endoprothesen/ Implantaten sind die konkreten patientenbezogenen Daten im lokalen Umfeld der avisierten Endoprothese (des Implantats) von Interesse. Diese Daten stehen heute durch moderne Diagnose- und Auswertverfahren in Form von Computertomografie (CT), digitaler Volumentomografie (DVT) und Magnetresonanztomografie (MRT) durchgängig zur Verfügung, bleiben für die Individualisierung der Endoprothesen/ Implantate aber weitgehend ungenutzt. Anhand der Erstellung von Volumenmodellen menschlicher Unterkiefer und der Ableitung von angepassten Kiefergelenkendoprothesen wird ein erster Ansatz hinsichtlich Individualisierung beschritten.

2. Stand der Technik

Die Firma TMJ Implants Inc. bietet individualisierte Implantate an, diese werden allerdings in Handarbeit an ein zuvor mit Stereolithographie hergestelltes Modell angepasst. Beispiele für auf digitalem Weg angepasste Prothesen findet man in verschiedenen medizinischen Bereichen, wobei sich hier auf Rekonstruktionen im Kopfbereich beschränkt wird. Der Blick auf zwei ausgewählte Studien [1,2] soll eröffnen, inwieweit die Anpassung von Prothesen und die Verwendung von Rapid Manufacturing-Verfahren bereits Einzug in die Medizin gehalten haben.

Beide Studien [1,2] beschreiben die Herstellung von Schädeldachplastiken. Ziel ist es, die Eingriffsdauer so gering wie möglich zu gestalten und die Präzision soweit herzustellen, dass intraoperative Anpassungen überflüssig werden. Dafür wird zunächst die Datenaufnahme mit Hilfe eines Computertomographen durchgeführt. Die Datenaufbereitung erfolgt mit dem CAD-System STRIM 100 (Cisigraph, Vitrolles), mit dem es möglich ist, die Implantatgeometrie aus Knochendefektgrenzen und nicht betroffenen Konturen zu generieren. Die Herstellung der Prothese und der aus dem gleichen Datensatz entwickelten Resektionsschablone erfolgt mit Hilfe von dreiachs-CNC-Fräsmaschinen. Bei den durchgeführten Operationen zeigt sich, dass sich das Implantat in 90% der Fälle durch einfaches Einlegen platzieren lässt und die Spaltmaße zwischen Knochen und Prothese kleiner als ein Millimeter sind. Des Weiteren wird angemerkt, dass der Durchlauf der Prozesskette von CT-Scan bis zur Fertigung der Prothese maximal fünf Tage dauert und dass die durch die Individualisierung höheren Fertigungskosten bei Berücksichtigung der Gesamtkosten nur wenig ins Gewicht fallen [1,2].

Die Studien zeigen, dass die rechnergestützte individuelle Anpassung von Implantaten an die jeweilige Anatomie des Patienten durchaus möglich und teilweise auch schon Praxis ist. Dabei wird das Implantat entweder aus dem Block gefräst oder zum Beispiel mit Hilfe zuvor erstellter Schädelmodelle von Hand angepasst. Der Schritt von der Verwendung von Rapid Prototyping-Verfahren hin zur Verwendung von Rapid Manufacturing-Verfahren ist zumindest in den betrachteten Studien noch nicht gemacht.

3. Technische Basis zur Umsetzung der Aufgabenstellung

Für eine individuelle Anpassung der Endoprothesen müssen die patientenspezifischen Daten berücksichtigt werden. Diese können durch Computertomografie (CT) erfasst und in Form von Schichtbildstapeln bereitgestellt werden.

Diese Bildstapel werden hinsichtlich ihrer Grauwerte mittels VOXim® [3] analysiert und zu einem virtuellen 3D-Modell des Schädels aufbereitet. Das 3D-Modell des Schädels steht nach dieser Aufbereitung im ST-Format bereit.

Diese STL-Repräsention ist für die Visualisierung geeignet. Für konstruktive Arbeiten eignet sich das STL-Format nur ungenügend. Deshalb müssen die Oberflächen nach Möglichkeit durch Flächen in Form von B-Splines dargestellt und in einem, diese Splines unterstützenden, Format abgespeichert werden (z.B. iges). Dieser Vorgang und die Veränderung der Datensätze ist in (Abbildung 1) dargestellt und wird mit Geomagic Studio realisiert.

Abbildung 1: a) CT-Schichtbild des Kiefers, b) STL-Datensatz des Unterkiefers in Bearbeitung, c) Flächenmodell des Unterkiefers

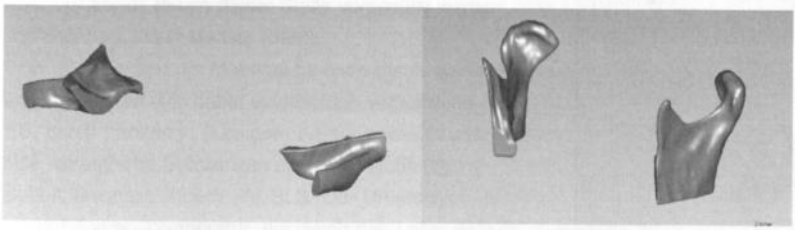


Abbildung 2: Teilstücke des Unterkiefers und des Schädels als Flächenmodelle

Zur konstruktiven Anpassung der Endoprothese sind nur Teilbereiche des Unterkiefers und des Schädels von Interesse. Diese werden selektiert und sind in (Abbildung 2) dargestellt.

4. Parametrisierung von Fossakomponente und mandibulärer Komponente

Die Endoprothese besteht aus 2 Teilen, aus der Fossakomponente und aus der mandibulären Komponente. Die mandibuläre Komponente wird aus verhältnismäßig einfachen geometrischen Features aufgebaut. Die Konstruktion der Fossa-Komponente ist aufgrund der Forderung nach anatomischer Ähnlichkeit zur Gelenkgrube und der Verwendung von Freiformflächen bedeutend komplizierter (Abbildung 3).

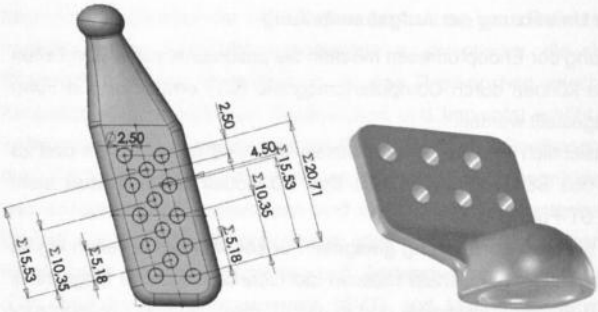


Abbildung 3: Mandibuläre Komponente und Fossakomponente der Endoprothse

5. Erarbeitung einer Anpassungssoftware

Die Entwicklung der Anpassungssoftware erfolgte in der Programmiersprache Visual Basic mit dem Programm Microsoft Visual Basic 6.0 unter Nutzung der SolidWorks Funktionen.
Die Benutzeroberfläche zur Konstruktion der individuellen Endoprothese wird nach Fossa- und mandibulärer Komponente, mit jeweils der Option, die Anpassung für die linke oder rechte Seite durchzuführen, aufgeteilt (Abbildung 4).

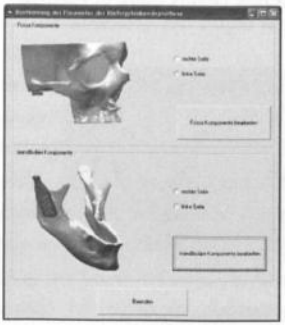


Abbildung 4: Startbildschirm der Anpassungssoftware

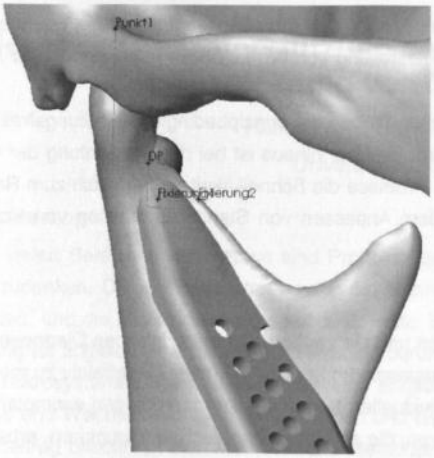


Abbildung 5: Verknüpfung zwischen Komponete und Schädel

6. Erstellung der Endoprothese mittels generativem Fertigungsverfahren

Mit Verfahren des Rapid Manufacturing ist es möglich, Prothesen direkt herzustellen, die ohne den Umweg der Modellerstellung individualisierbar sind und die für ein Endprodukt gewünschten mechanischen Eigenschaften besitzen [4]. Das Ziel weiterführender Arbeiten ist es, dieses Verfahren für die individuelle Fertigung von Endoprothesen zugänglich zu machen.

Zwei Verfahren, die an dieser Stelle vorgestellt werden, sind Selective Laser Sintering (SLS) und Selective Laser Melting (SLM).

Beim SLS werden die Materialkörnchen durch die Erwärmung mit Hilfe eines Lasers miteinander versintert. Die dabei automatisch vorhandene Porosität des Bauteils kann nachträglich z.B. durch tränken in flüssigem Kupfer beseitigt werden. Verwendbare Materialien sind Metalle, keramische Substanzen und Kunststoffe [5].

SLM funktioniert ähnlich wie SLS. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht in der höheren Temperatur, die durch den Laser erreicht wird, und somit dem unterschiedlichen Verbindungsprozess der Materialkörnchen. Durch das Verflüssigen des Materials ist es möglich, eine nahezu poren- und rissfreie Struktur aufzubauen, die eine theoretisch 100%ige Dichte des Ausgangsmaterials erreichen kann. Die möglichen Festigkeitswerte sind höher als die des SLS.

Zum Aufschmelzen des Materials wird in den meisten Fällen ein CO_2- oder Nd:YAG-Laser verwendet. Die Steuerung und Fokussierung des Laserstrahls erfolgt mit Hilfe einer Optik (Mirror Scanner). Das Trägersystem befindet sich auf einem in der Z-Achse verstellbaren Tisch (Build Cylinder). Beim Auftragen wird das Pulver aus dem Materialcontainer (Feed Container) nach oben gedrückt und von der Rolle (Roll) gleichmäßig auf dem Tisch verteilt. Überflüssiges Pulver wird auf der anderen Seite im Überlauf (Overflow) aufgenommen [6].

Als problematisch erweisen sich zurzeit noch die Oberflächengüte, die erreichbaren Festigkeiten und Genauigkeiten bei der Herstellung von Werkstücken mit einem Rapid Manufacturing-Verfahren [7,8].

Positiv an generativen Verfahren ist vor allen Dingen die prinzipbedingte Gestaltungsfreiheit, da der Aufbau schichtweise vollzogen wird. Darüber hinaus ist bei der Betrachtung der Gesamtfertigungszeit einer individualisierten Prothese die Schnelligkeit im Vergleich zum Rapid Prototyping mit anschließendem manuellem Anpassen von Standardprothesen von Vorteil [9].

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Softwaretechnischen Voraussetzungen und die verfügbaren medizinischen Diagnoseverfahren erlauben individuelle patientenangepasste Implantate in kurzer Zeit effektiv zu modellieren. Dieser Weg wird anhand von individuellen Kiefergelenkendoprothesen exemplarisch beschritten. Generative Fertigungsverfahren, die als Rapid Manufacturing fungieren, arbeiten inzwischen mit Titanlegierungen und reinem Titan. Diese sollen in weiterführenden Arbeiten diesen Ansatz praktikabel umsetzen und entsprechend vervollständigen.

. Literatur

1] Stojadinovic, S. u.a.(1999): One-Step resection and reconstruction of the mandible using computer-aided techniques – experimental and clinical results. Aus Mund Kiefer GesichtsChir, Springer-Verlag

[2] Kamyszek, T. u.a. (2001): Versorgung kraniofazialer Knochendefekte mit individuell vorgefertigten Titanimplantaten. Aus Mund Kiefer GesichtsChir, Springer-Verlag

[3] VoXim®, Benutzerhandbuch, Version 5.6

[4] Wirtz, T.P. (2005):Herstellung von Knochenimplantaten aus Titanwerkstoffen durch Laserformen. Dissertation an der RWTH Aachen

[5] Rapid Prototyping (RP). Online im Internet: http://www.ulrich-rapp.de/stoff/fertigung/rapidpro.htm [Stand: 20.11.2006]

[6] Kruth, J.P. u.a. (2004): Bining Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting. proc. 15th Solid Freeform Fabrication Symposium

[7] Wohlers, T.T. (2006): Wohlers Report 2006, Rapid Prototyping and Manufacturing, State of the Industry. Wohlers Associates

[8] Laoui, T. u.a. (2004): Properties of Titanium Implant Models made by Laser Processing. Laser Assisted Net Shape Engineering 4

[9] Pi (2005): Trendreport Rapid Manufacturing. Aus Werkzeug&Formenbau

Methodische Unterstützung der Systemintegration bei der Entwicklung von Mikrosystemen

Robert Watty, Hansgeorg Binz
Universität Stuttgart

Kurzfassung

Aus vielen Bereichen des Alltags sind Produkte der Mikrosystemtechnik heute nicht mehr wegzudenken. Durch Mikrosysteme kann ein Mehrwert für konventionelle Systeme erreicht werden, und die Miniaturisierung spart z. B. Platz, Energie und Gewicht. Die starke Verkleinerung ist zugleich eine besondere Herausforderung bei der interdisziplinären Entwicklung von Mikrosystemen, denn sie erfordert eine sorgfältige Integration, um unerwünschte Einflüsse und Wechselwirkungen zu vermeiden und die Systemfunktion zu gewährleisten. Dieser Beitrag beschreibt eine Methodik und Methoden, die den Entwickler bei dieser Aufgabe unterstützen.

1. Einleitung

Die Entwicklung und Herstellung von Mikrosystemen ist mehr als in anderen Disziplinen gekennzeichnet durch eine große Vielfalt beteiligter Domänen, z. B. Mikroelektronik, Mikromechanik, Mikrooptik und Mikrobiologie, und eine daraus resultierende hohe Interdisziplinarität. Auch durch die starke Verkleinerung der Bauteile und die dadurch bedingten physikalischen Effekte sind Mikrosysteme höchst komplex.

Die Vielfältigkeit der beteiligten Technologien, der hohe Integrationsgrad und die oftmals parallele Entwicklung von Produkten und Herstellungtechnologien stellen hohe Anforderungen an den Entwicklungsprozess. Insbesondere die Integration der unterschiedlichen beteiligten Disziplinen erfordert die Zusammenarbeit von erfahrenen Experten aus unterschiedlichen Bereichen, um unerwünschte Wechselwirkungen und Störeinflüsse in solch komplexen Systemen auszuschließen. Dazu ist eine entsprechende methodische Unterstützung der Entwickler sinnvoll, um deren Bedarf an Gestaltungsregeln zu Geometrie, Herstellungsverfahren und Materialien, aber auch an Hilfe zum Verständnis des Gesamtsystems zu decken.

Dieser Beitrag beschreibt einen neu konzipierten Entwicklungsprozess und neu entwickelte Methoden zur Unterstützung von Entwicklern aus unterschiedlichen Domänen bei der effektiven und effizienten Entwicklung von Mikrosystemen.

2. Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik hat sich ursprünglich aus der Mikroelektronik, genauer der Halbleitertechnik, entwickelt. So wurde der Begriff „Mikrosystem" auch ursprünglich in der Mikroelektronik für die Kombination mehrerer integrierter Schaltungen zu einem komplexen System verwendet. Die Mikroelektronik befasst sich mit rein elektronischen Bauelementen, deren zweidimensionale Struktur in der Regel vollautomatisiert entworfen wird. In der Mikrosystemtechnik werden dagegen in der Regel dreidimensionale Strukturen eingesetzt, deren aufgabenspezifische und vielgestaltige Geometrie in der Regel auch nicht automatisiert entworfen werden kann.

Mikrosysteme haben heute einen hohen Einfluss auf aktuelle und künftige technische und wirtschaftliche Entwicklungen in praktisch allen Bereichen der Technik. Typische Einsatzgebiete reichen von der Automobiltechnik (z. B. Beschleunigungssensoren für ABS oder ESP) über die Computertechnik (z. B. Schreib-/Leseköpfe für Festplatten) bis hin zur Medizin- und Biotechnik (z. B. Herzschrittmacher, medizinische Analysegeräte). Der Markt für mikrosystemtechnische Produkte wächst aktuell jährlich um 20 %. Bereits heute sind in der Mikrosystemtechnik 49.000 Menschen direkt und 680.000 indirekt beschäftigt [1]. Hauptvorteil des Einsatzes von Mikrosystemen ist dabei insbesondere die Möglichkeit, Kosten, Platz, Gewicht und Energie einzusparen und gleichzeitig die Funktionalität und die Zuverlässigkeit zu erhöhen [2].

Die Vielfalt dieser Einsatzgebiete und der erforderliche hohe Integrationsgrad aufgrund der starken Miniaturisierung stellen aber gleichzeitig hohe Anforderungen an die Entwicklung von Mikrosystemen. So werden in vielen Produkten z. B. mechanische und elektrische Komponenten auf engstem Raum verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig auf bisher wenig erforschte Art und Weise. In Fachbereichen wie z. B. der Biotechnologie wird Fachwissen aus den unterschiedlichsten Disziplinen benötigt. Eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit unterschiedlichster Fachbereiche ist zur Entwicklung von Mikrosystemen deshalb noch stärker als in anderen Disziplinen unbedingt erforderlich. Oft werden Experten aus vier oder fünf verschiedenen Fachrichtungen in Entwicklungsprojekten eingesetzt [3]. Ein hoher Anteil der Entwickler kommt von der Ausbildung her aus dem Maschinenbau, der Elektrotechnik oder der Physik, ergänzt um Spezialisten aus einer Reihe von anderen Gebieten. Da in diesen Bereichen die Vorgehensweisen bei der Entwicklung stark unterschiedlich sind, ist die Zusammenarbeit bis heute nicht optimal. Gerade die optimale Abstimmung der Zusammenarbeit und ein effizientes Wissensmanagement sind aber künftige Schlüsselkomponenten des Wirtschaftszweiges Mikrosystemtechnik [4].

Wichtige Teilaspekte dieser Zusammenarbeit betreffen nicht nur die Kompatibilität der unterschiedlichen Technologien, sondern besonders auch die Kommunikation innerhalb der Entwicklungsteams. Durch die unterschiedliche Ausbildung ist es für die Entwickler wichtig, sowohl eine interdisziplinäre Vorgehensweise für die Entwicklung von Mikrosystemen als auch eine „gemeinsame Sprache" zu finden, um ein wechselseitiges Verständnis für die speziellen

Probleme der einzelnen Fachrichtungen zu erzielen. Beide Aspekte werden nachfolgend betrachtet.

3. Methodische Entwicklung von Mikrosystemen

Durch die ursprüngliche Ableitung aus der Mikroelektronik ist der Entwicklungsprozess für Mikrosysteme in vielen Prozessmodellen stark an die Vorgehensweise in der Mikroelektronik und die dort verwendeten Beschreibungsmittel angelehnt. Oft wird eine Unterteilung des Systems in Komponenten vorgenommen, die dann getrennt entwickelt oder aus einer Systembibliothek entnommen werden, um sie zu einem System zusammenzufügen. Es fehlt daher häufig eine kreative Phase in Form einer Suche nach geeigneten neuen Lösungen oder Gesamtkonzepten. Durch die frühzeitige Unterteilung des Systems werden sowohl der für die Mikrosystemtechnik bedeutsame Aspekt der Integration mehrerer Funktionen in einem Bauelement als auch Wechselwirkungen und Störeinflüsse unter Umständen erst verspätet betrachtet, wenn die Komponenten weitgehend „fertig" sind. Dies führt dann unweigerlich zu Schleifen im Produktentwicklungsprozess. Eine Entwicklung sollte daher von vorneherein interdisziplinär und integriert erfolgen. Einen Vorschlag für eine generelle Vorgehensweise, die auf dem in der VDI-Richtlinie 2206 [5] vorgeschlagenen Entwicklungsablauf für die Mechatronik aufgebaut ist, stellt Abb. 1 dar.

Eine wichtige Grundlage für den Aufbau eines Mikrosystems ist ein interdisziplinäres Systemkonzept, das zu Beginn der Entwicklung basierend auf den Anforderungen erstellt werden sollte. Der nächste Schritt unterscheidet sich deutlich von der Vorgehensweise in anderen Disziplinen: die einzelnen Komponenten des Systems müssen interdisziplinär abgestimmt entwickelt werden. Dies bedeutet nicht nur, dass die am Gesamtsystem beteiligen Disziplinen eng zusammenarbeiten, sondern auch, dass die Herstellungstechnologie eng mit einbezogen werden muss.

Eine sorgfältige Integration des Gesamtsystems in dieser Entwicklungsphase ist wichtig, um die Funktion des Gesamtsystems zu gewährleisten und wechselseitige Störeinflüsse im System und mit der Umgebung zu vermeiden. Bei der abschließenden Systemausarbeitung müssen neben der konstruktiven Ausarbeitung auch die gewünschten Eigenschaften des Systems sorgfältig überprüft und abgesichert werden.

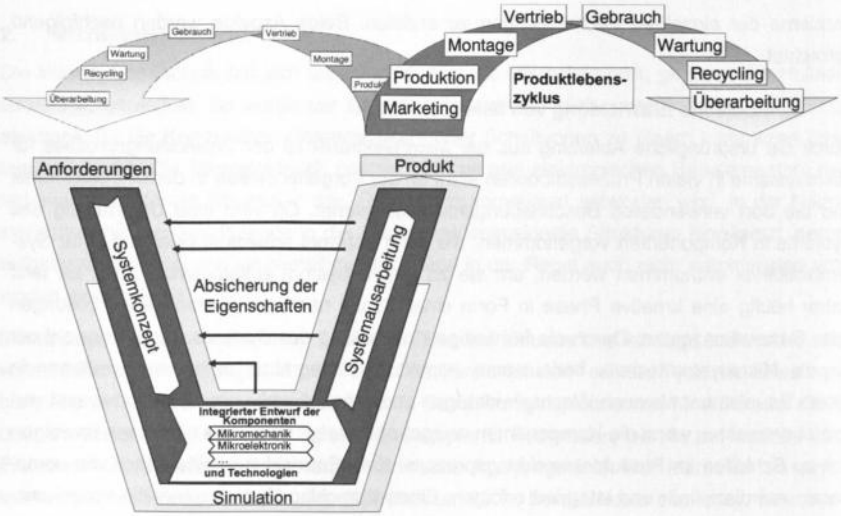


Abb. 1: Entwicklungsablauf für Mikrosysteme

Der Produktentwicklungsprozess im engeren Sinne kann nicht losgelöst vom Lebenszyklus des Produktes betrachtet werden. Informationen und Anforderungen, die sich z. B. beim Gebrauch oder der Wartung der Produkte ergeben, sollten deshalb in die Entwicklung einfließen. Eine begleitende Simulation zur Vorhersage von Systemeigenschaften hilft, Iterationsschleifen zu vermeiden. Hierzu sind allerdings insbesondere domänenübergreifende Werkzeuge noch nicht in ausreichendem Maße vorhanden.

Die Integration des Gesamtsystems ist die Hauptschwierigkeit bei der Entwicklung von Mikrosystemen. Wichtig ist hierbei eine Betrachtung des Gesamtsystems, denn die Funktion der einzelnen Komponenten ist sozusagen nur die notwendige, aber nicht die hinreichende Bedingung für die Leistungsfähigkeit des Systems.

Dafür fehlen bisher leistungsfähige Entwicklungswerkzeuge und –methoden, die den Zusammenhang der Komponenten und damit der benötigten Teilfunktionen im Gesamtsystem betrachten [6]. Geeignete Werkzeuge müssen den Entwickler darin unterstützen, Zusammenhänge, insbesondere Kopplungen und Wechselwirkungen, zu erkennen und anschließend zu beseitigen. Eine zu diesem Zwecke speziell für die Mikrosystemtechnik entwickelte Methode wird im Folgenden beschrieben.

4. Die Wirkstruktur als Integrationsmethode

Teilfunktionen von Systemen werden in der Regel durch physikalische Effekte realisiert, die auch als physikalische Wirkprinzipien bezeichnet werden, wenn sie konkret einer Teilfunktion zuzuordnen sind [7]. Das verwendete Wirkprinzip und der Zusammenhang zwischen Bauelementen sind entscheidend für die Funktion aller technischen Produkte, so dass Verhalten und Struktur eines Systems eng miteinander verknüpft sind [8]. Das Wirkprinzip kann in die Einflussgrößen Geometrie (Wirkort, Wirkflächen, Wirkbewegungen), Stoff (Werkstoff) und Betriebsparameter (interne und externe Einflüsse) gegliedert werden [9].

Für mechanische Systeme wird zur Beschreibung des Wirkzusammenhangs der Bauelemente die Wirkstruktur verwendet. Die Wirkstruktur wird dabei verstanden als „Verknüpfung von Wirkprinzipien mehrerer Teilfunktionen zum Erfüllen der Gesamtfunktion" [7]. Auch in der Mechatronik erfolgt die Produktentwicklung von der abstrakten Funktionsstruktur über die Wirkstruktur zur konkreten Baustruktur [8]. Damit bietet die Wirkstruktur eine Möglichkeit, funktionsentscheidende Zusammenhänge darzustellen und den Übergang von der abstrakten Funktion zur konkreten Umsetzung in der Konzeptphase zu unterstützen.

In den aktuellen Anwendungsbereichen wird der Begriff der Wirkstruktur vorwiegend für den geometrischen und mechanisch-funktionalen Zusammenhang in technischen Systemen benutzt und ausschließlich in der Konzeptphase verwendet. Für die Mikrosystemtechnik sind aber Zusammenhänge zwischen den Wirkelementen von Bedeutung, die in Art und Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren darüber hinausgehen. So spielen zusätzlich z. B. optische oder elektrische Effekte eine wichtige Rolle, bei denen auch ein Wirkraum berücksichtigt werden muss, der die eigentliche Bauelementgeometrie überlagert. Da insbesondere unerwünschte Wirkungen physikalischer Effekte und externe Einflussgrößen auch über die Konzeptphase hinaus von Bedeutung sind, ist eine Verwendung der Wirkstruktur auch in der Gestaltungsphase wünschenswert.

Für eine Verwendung zur Unterstützung der Systementwicklung in der Mikrosystemtechnik muss die Wirkstruktur im klassischen Sinne also ergänzt und angepasst werden. Die nachfolgend dargestellte Erweiterung für die Mikrosystemtechnik beruht auf zwei Elementen: einer erweiterten Wirkstruktur und einer Wirkstrukturmatrix, die externe und wechselseitige interne Einflussfaktoren berücksichtigt und rechnergestützt ausgewertet werden kann.

In einer Wirkstruktur für die Mikrosystemtechnik müssen zunächst die Bauelemente des Mikrosystems, die als Wirkelemente eingesetzt werden, dargestellt werden, im Idealfall mit ihren geometrischen Abmessungen, um den Bauraum überprüfen zu können. Der geometrische Aufbau des Gesamtsystems und die Lage der Bauelemente zueinander liefern weitere wichtige Informationen zu wechselseitigen Einflüssen der Bauelemente aufeinander, die aufgrund der hohen Integration in der Mikrosystemtechnik von besonderer Bedeutung sind. Die Freiheitsgrade für die mechanische Verknüpfung der Bauelemente oder z. B. ihre Befestigung auf einem Gehäuse oder einer Bodenplatte sind entscheidend für die Wahl einer geeigneten Verbindungsart und sollen deshalb ebenfalls dargestellt werden. Weit über die Bedeutung in der (makro)mechanischen Technik hinaus spielen verschiedenste Flüsse, z. B.

elektrischer, optischer, thermischer oder nuklearer Natur, in der Mikrosystemtechnik eine große Rolle und müssen geeignet berücksichtigt werden.

Aufbauend auf diesen Anforderungen wurde eine erweiterte Wirkstruktur erarbeitet, die speziell für Mikrosysteme das Verständnis des Systemzusammenhangs fördern soll, aber auch auf andere Bereiche übertragen werden kann. Die Darstellung der erforderlichen Elemente baut auf den in Abb. 2 dargestellten Symbolen auf.

Das Wirkelement (a) kann als Symbol oder aber mit seiner tatsächlichen Form dargestellt werden. Operanden und Operatoren und damit die Flüsse im System können durch gestrichelte Pfeile gerichtet dargestellt werden, mechanische Verbindungen durch Linien. Externe, nicht für die Funktion vorgesehene Einflüsse (b), werden mit gepunkteten Pfeilen grundsätzlich bis an die Systemgrenze herangeführt. Mechanische Verbindungen der Wirkelemente (c und d) können mit einfachen Pfeilen für die vorgesehenen translatorischen und doppelten Pfeilen für die (mathematisch positiven) rotatorischen Freiheitsgrade dargestellt werden.

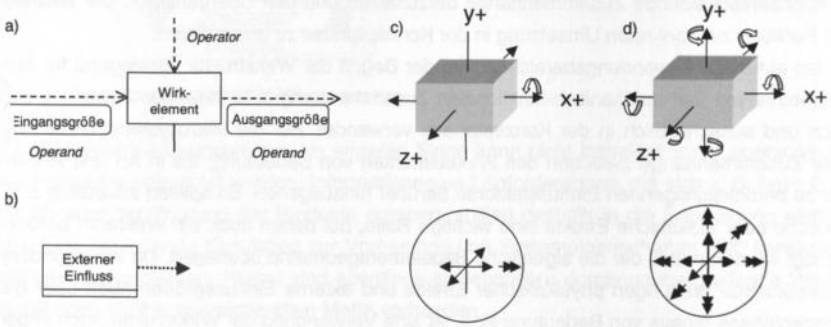


Abb. 2: Symbole der Wirkstruktur für die Mikrosystemtechnik
a) Wirkelement b) Externer Einfluss
c,d) Mechanische Verbindung

Aufbauend auf diesen Vorgaben ist in Abb. 3 beispielhafte eine erweiterte Wirkstruktur eines Drehgebers dargestellt, die zusätzlich Einflussgrößen berücksichtigt, die z. B. nichtmechanisch sind oder als externe Störgrößen auftreten. Die erweiterte Wirkstruktur gibt einen Überblick über den Drehgeber, seine Wirkelemente und die Freiheitsgrade ihrer Verbindungen. Darüber hinaus sind die elektrischen und optischen Flüsse, aber auch äußere Störgrößen wie z. B. elektromagnetische Energieflüsse dargestellt, so dass das System in seiner Gesamtheit abgebildet wird.

Durch das Erstellen der Wirkstruktur werden zunächst die Betrachtung des gesamten Systems gefördert und sein Aufbau, aber auch einwirkende Einflussfaktoren betrachtet. Allein diese Betrachtung hat in den Projekten, in denen das Verfahren eingesetzt wurde, schon zu mehr Klarheit über den Aufbau des Systems geführt.

Eine weitere Unterstützung insbesondere der Kommunikation zwischen den beteiligten Teildisziplinen lässt sich durch das Aufstellen der Wirkstrukturmatrix erreichen. Die Analyse z. B. geometrischer, physikalischer oder funktionaler wechselseitiger Einflüsse der einzelnen Elemente eines Systems oder seiner Umgebung kann aufbauend auf der Wirkstruktur mit einer Wirkstrukturmatrix unterstützt werden, Abb. 4.

Diese auf der Design Structure Matrix (DSM) [10] aufbauende Wirkstrukturmatrix enthält alle Systemelemente und Einflussgrößen sowohl in den Spalten als auch den Reihen der Matrix.

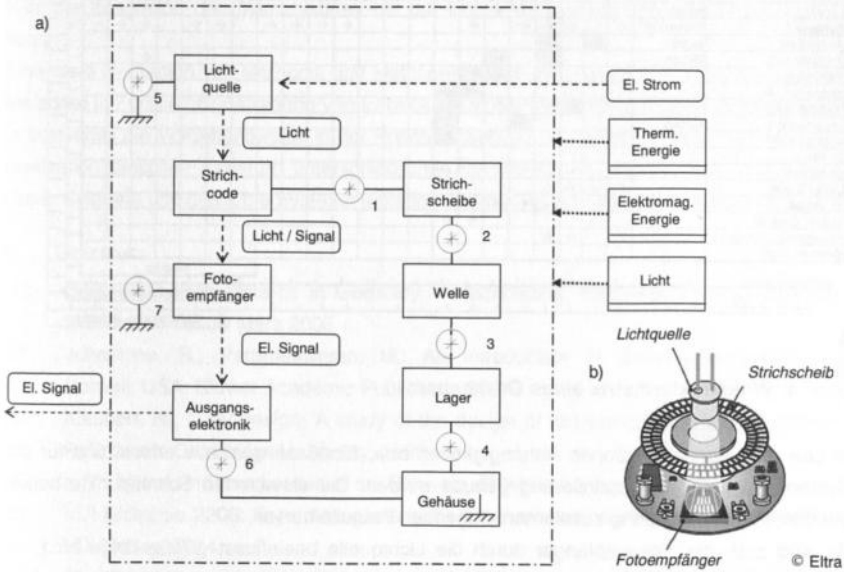


Abb. 3: Wirkstruktur eines Drehgebers

Wirkstruktur-matrix	Nature / material	Fotoempfänger	Codierstriche	Lichtquelle	Codierscheibe	Analyse IC	Welle	Lager	Gehäuse	Verbindung 1	Verbindung 2	Verbindung 3	Verbindung 4	Verbindung 5	Verbindung 6	Verbindung 7	El. Strom	Lichtstrahl	Licht / Signal	El. Signal	Therm. Energie	Elektromagn.Energie	Externes Licht
Fotoempfänger				←												←		←	←			←	←
Codierstriche		←		←	←	←					←										←		
Lichtquelle		←												←			←						
Codierscheibe			←							←	←												
Analyse IC		←	←												←					←	←	←	
Welle					←				←		←	←											
Lager	radial						←		←			←	←								←		
Gehäuse	Kunststoff	←		←	←	←		←					←	←	←	←		←	←		←	←	←
Verbindung 1	Laser		←		←																		
Verbindung 2	kleben				←		←														←		
Verbindung 3							←	←															
Verbindung 4								←	←														
Verbindung 5				←					←														
Verbindung 6	kleben					←			←														
Verbindung 7		←							←														
El. Strom																							
Lichtstrahl				←					←														
Licht / Signal		←	←	←	←				←														
El. Signal		←				←																←	
Therm. Energie								←	←														
Elektromagn.Energie		←		←	←																		
Externes Licht																							

Externes Licht

Externes Licht

Externes Licht

Externes Licht

Struktur

Thermische Belastung

Elektromagn. Belastung

Abb. 4: Wirkstrukturmatrix eines Drehgebers

In den Schnittpunkten können Abhängigkeiten bzw. Einflüsse qualitativ erfasst und für die Systemerstellung und –optimierung genutzt werden. Die schattierten Schnittpunkte heben die durch eine Verbindung zusammenhängenden Bauteile hervor.

So wird z. B. der Fotoempfänger durch die Lichtquelle beeinflusst (Wellenlänge etc.), es muss eine geeignete Verbindung zum Gehäuse gewählt und es muss ein Licht/Signal aufgenommen werden. Weitere Einflüsse gehen aber auch vom Licht aus, das innerhalb des Gehäuses unerwünscht vorhanden ist (z. B. durch Reflexion). Darüber hinaus können Einflüsse durch externes Licht oder je nach Bauart des Empfängers auch durch externe elektromagnetische Felder auftreten. Durch die Erfassung der Einflüsse wird erreicht, dass sie im Laufe der Entwicklung berücksichtigt werden können, so dass bei der Konstruktion oder Auswahl eines Fotoempfängers seine Funktion gewährleistet wird und mögliche Fehlerquellen vermieden werden.

In einem weiteren Schritt ist eine rechnerunterstützte Optimierung denkbar, indem in den Schnittpunkten Abhängigkeiten nicht mehr qualitativ erfasst, sondern durch hinterlegte Formeln oder Simulation berechnet werden. Dies muss für die möglichen Einflussarten getrennt geschehen, so dass eine dreidimensionale Matrix entsteht.

Damit kann z. B. eine thermische Energie, die von einem Bauelement ausgeht, für einen gegebenen Bauraum mit Wirkelementen unter verschiedenen Einsatzbedingungen simuliert und hinsichtlich der Wirkungen auf das Gesamtsystem untersucht werden.

5. Zusammenfassung

Die Entwicklung von Mikrosystemen ist durch hohe Komplexität und ausgeprägte Interdisziplinarität gekennzeichnet. Um die beteiligten Entwicklerteams zu unterstützen, sind daher ein angepasster Entwicklungsprozess und entsprechende Methoden besonders für die interdisziplinäre Integration von Komponenten im System hilfreich. In diesem Beitrag wurden dafür eine neue interdisziplinäre Entwicklungsmethodik und insbesondere eine mikrosystemspezifische Wirkstruktur und eine darauf aufbauende Wirkstrukturmatrix beschrieben, mit deren Hilfe die Integration des Mikrosystems bei der Entwicklung wesentlich verbessert werden kann.

Eine erste Evaluation von Methodik und Methoden wurde in Industrie- und Hochschulprojekten sowie in Form einer Befragung von Entwicklern in der Industrie durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Vorgehensweise in der Praxis umsetzbar ist und beide Methoden die Kommunikation zwischen Experten unterschiedlicher Fachrichtungen bei der Entwicklung komplexer Systeme und damit die Systemintegration und die –funktion deutlich verbessern.

6. Literatur

[1] Berger, J.: Microsystems in Germany – Modernizing Traditional German Industry. MST news, Teltow März 2005

[2] Johnstone, R., Parameswaran, M.: An Introduction to Surface-Micromachining. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 2004

[3] Klaubert, H., "Tiny design: A study of the design of microelectromechanical system PhD-thesis, Cambridge University, 1998

[4] o. V.: Mikro- und Nanowelten in der Schweiz, SMM 31-32/ 2003

[5] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Düsseldorf: VDI Verlag, 2004

[6] http://www.mstonline.de/mst/mikrosystemtechnik/glossar/default.html#A1, Stand: 30.05.05

[7] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grothe, K.-H.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer, 2003

[8] Köckerling, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Diss. Universität Paderborn, 2004

[9] Jung, A., „Geometrie, Stoff und elektrische Funktion, Zur Didaktik des geometrisch-funktionalen Denkens", Proceedings ICED 91, Zürich 1991

[10] Warfield, J. N.: Binary Matrices in System Modeling. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3 (1973)

Unterstützung der kreativen Phasen im Produktentwicklungsprozess mit dem Elementmodell C&CM

Albert Albers, Thomas Alink, Jochen Oerding

Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH)

1. Hintergrund

Industrieunternehmen müssen auch den Entwicklungsprozess aufgrund der drastischen Verkürzung der Produktentstehungszeit verbessern. Die starke Verkürzung der Produktlebenszyklen führt dazu, dass die Konstruktionsforschung neue Wege und Strategien für eine schnelle und effiziente Lösung für konstruktive Probleme erforscht und entwickelt, um die Unternehmen weiterhin mit innovativen Produkten erfolgreich zu halten. Die Forderung nach einer Ziel-Orientierten und zuverlässigen Lösung von Problemen, die Kern jeder Entwicklungstätigkeit sind, ist Objekt der Konstruktionsforscher seit den 50er Jahren. Der „Engpasses der Konstruktion" brachte die „klassischen" Konstruktionsmethoden hervor wie sie z.B. Grundlage für die VDIRichtlinie 2221 [14] sind. Diese Methoden-, Produkt- und Prozessmodelle sind nach wie vor Grundlage für die Erforschung der Konstruktion und Modell für die Vermittlung von Konstruktionswissen in der Lehre an den Universitäten in deutschsprachigen Raum. Parallel zur Entwicklung bekannter präskriptiver Modelle des Konstruktionsprozesses wurden empirische Untersuchungen zum tatsächlichen Ablauf der Produktentwicklung angestellt. In Deutschland ist das empirische Vorgehen durch eine enge Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus der kognitiven Psychologie gekennzeichnet [2]. Konstruktion ist eine hoch komplexe Tätigkeit, die durch viele kognitiv und psychologisch mental verankerte Prozesse gekennzeichnet ist. Zusätzlich macht es die komplexe Struktur der Produkte, die große Anzahl und Vielfalt der technischen Merkmale unmöglich das gesamte Wissen, das in einem Produkt „steckt" zu überblicken [10].

Konstrukteure müssen bei Ihrer Arbeit die Gesichtspunkte Funktion und Gestalt genau so wie auch Kosten, Herstellbarkeit, Werkzeuge und Fertigkeiten im Unternehmen berücksichtigen, um eine erfolgreiche Produktentwicklung durchzuführen. Es sind Einflüsse des Prozesses aber auch der Struktur und Aufbau des Produktes, die die enorme Komplexität eines Handlungssystems zur Produktentwicklung [1] erzeugen. Die Konstruktionsforschung strebt an diese enorme Komplexität zu beherrschen, um die konstruktiven Probleme der Kreativität des Entwicklers zugänglich zu machen. Die Aufteilung in die Untersuchung der Vorgehensweise der Problemlösung und die Suche nach effektiver Darstellung des Problems in geeigneten Modellen sind die zwei Bereiche der Konstruktionsforschung, die oft separat betrachtet, aber für eine zielgerichtete Problemlösung unzertrennbar sind.

Dieses Manuskript stellt einen Ansatz vor, der die Darstellung des Problems auf verschiedenen Abstraktionsebenen mit einer zielgerichteten Vorgehensweise kombiniert.

1.1. Vorgehensweise: Produktentwicklung als Problemlösungsprozess

Der Mensch als Problemlöser ist in den Mittelpunkt der Konstruktionsforschung gerückt. Hierbei wird immer wieder herausgestellt, dass das Abstraktionsvermögen, also der Transfer des Problems auf ein für das Problem auf das Wesentliche reduziertes Niveau als Kernkompetenz für gute Problemlöser angesehen wird.

Gute Problemlöser starten den Problemlösungsprozess mit einer sorgfältigen Problemklärung, um ein umfassendes Verständnis für das Wesentliche des Problems herzustellen [15]. Die Art und Weise wie Ingenieure ihr Problem formulieren und erfassen beeinflusst maßgeblich wie sie ihre Lösungen finden und welche Qualität diese haben [5]. Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten sind Problemlösungsprozessmodelle wie z.B. auch das Problem Solving Concept des Systems Engineering [16].

Der Lösungsfindungsprozess verläuft sprunghaft in Bezug auf Abstraktion, Detaillierung, Analyse- Synthese, bildlich – begrifflich[15]. D.h. es findet ein ständiger Wechsel zwischen Wofür und Wie statt, auf der anderen Seite ein Wechsel zwischen Grob (Wo im System befinde ich mich) und Detail (hier liegt mein Problem).

Bedeutende Konstruktionsforscher wie z.B. Roth [12], Rodenacker [11] stellen Konstruktionsansätze zur Verfügung, die auf funktionale Beschreibungen aufsetzten, die aber nicht das typische intuitive für Problemlösung notwendige Hin- und Herspringen zwischen den verschiedenen Abstraktionsebenen unterstützten.

Zur Lösung eines Problems ist Kreativität unverzichtbar. Die Charakteristik eines Problems erfordert die Überwindung einer Denkbarriere, die nur durch einen kreativen Einfall überwunden werden kann [6]. Es ist also unmöglich anzunehmen, dass der Konstruktionsprozess automatisierbar ist, da für das Generieren von Neuem immer ein Schritt ins Ungewisse, Unsichere, Unbekannte stattfinden muss.

1.2. Darstellung des Problems: Modellbildung

Zur Darstellung des Problems in den verschiedenen Sichtweisen werden Modelle verwendet. Um eine Vorfixierung und „Denkrillen" zu vermeiden, müssen Darstellungsmöglichkeiten geschaffen werden, die es ermöglichen auf das zu fokussieren, was die Konstruktion tun soll; im Gegensatz zur reinen Gestaltdarstellung. Dieses Problem wird bereits durch präskriptive Methoden aufgegriffen. Z.B. leitet die Systematik des Axiomatic Design [13] dazu an, den Entwicklungsprozess als eine streng hierarchische gegliederte Zuordnung ausgehend von der Funktion zu einer Gestalt zu entwickeln. Der Konstruktionsprozess oszilliert bewusst zwischen Funktion und Gestalt um Produktkonzepte zu entwickeln, die explizit zusammen mit deren funktionalen Anforderungen gespeichert werden.

Modellbildung, interne (mentale) und externe (z.B. Skizze oder CAD) ist ein unverzichtbares Hilfsmittel um die Komplexität von Problemen zu reduzieren und sie so dem menschlichen Erfassungsvermögen zugänglich zu machen. Modelle stellen die für die Problemlösung wesentlichen Informationen da, lassen aber gleichzeitig Informationen weg, die unnötig sind. Modelle mit hohem Abstraktionsgrad stellen Funktion einer Konstruktion da. Eher konkrete Modelle fixieren getroffene Entscheidungen und halten somit gefundene Lösungen fest. Die

mentale Modellbildung läuft generell eher visuell konkret ab, da die Erinnerung, das Gedächtnis, der Lernprozess durch Analogiebildung zwischen dem zu Erlernenden und etwas Bekannten geschieht. Daher neigen Konstrukteure im Allgemeinen zur schnellen Fokussierung auf eine Lösung die im bekannten Lösungsraum liegt.

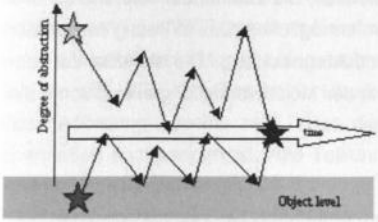


Bild 1: Verlauf des Konstruktionsprozesses auf verschiedenen Abstraktionsstufen

Die Fähigkeit Probleme auf einer abstrakten Ebene zu modellieren ist also hilfreich um Vorfixierung zu vermeiden. Die mentale Modellbildungskapazität ist begrenzt: Konstrukteure können mental nur Teile des konstruktiven Problems erfassen. Es gibt auch keine Garantie, dass die mentalen Modelle vollständig und konsistent sind. Ingenieure bemerken diese Begrenzung erst, wenn sie mit Fragen konfrontiert sind, die nicht beantwortet werden können. Bild 1 zeigt, dass viele Konstruktionsprozesse gleichzeitig sowohl auf abstraktem als auch auf konkreten Ebenen ablaufen um verschiedene Ideen und Situationen zu erkunden bis sich die beiden Wege der Beschreibung treffen.

Abstrakte Darstellungsweisen sind von Natur aus mehrdeutig da sie keine Details einer Lösung festlegen. Es besteht also immer Interpretationsspielraum. Dies ist einerseits sehr hilfreich, da ein Lösungsraum offen gelassen und so Kreativität zu gelassen wird. Auf der anderen Seite kann dies zu Fehlern führen, die durch die unterschiedlichen Interpretationsweisen entstehen.

Auf der einen Seite bestehen sehr abstrakte Beschreibungsweisen für den Problemraum (z.B. Funktionsanalyse) andererseits gibt es Methoden die bei bereits Bestehendem ansetzten (z.B. Morphologischer Kasten, Design Structure Matrices). Es gibt aber kein Modell das die beiden Enden des Konkret- Abstrakt Spektrums zwischen Funktion und Gestalt integriert. Die bekannten Modelle unterstützen immer auf einem bestimmten Abstraktionsgrad und überlassen der Kompetenz des Konstrukteurs aber den wesentlichen Schritt der Integration der Modelle [5].

2. Ansatz: Contact and Channel Model (C&CM)

Für die erfolgreiche Produktentwicklung wird ein Werkzeug benötigt, welches das technische System so darstellen kann, dass es für den Menschen mit seiner Problemlösungsfähigkeit best möglich in dem dynamischen Prozess der Problemlösung erfassbar ist. Dieses Werkzeug ist flexibel genug das technische System immer so darzustellen wie es das sprunghafte Vorgehen beim Lösen von Problemen erfordert, ohne dabei zuviel mentale Kapazität vom

eigentlichen Problemlösungsprozess abzuziehen. Des Weiteren muss das Werkzeug in der Lage sein, die Schwierigkeiten beim abstrakten Denken zu vermindern.
Die Systematisierung des Zusammenhangs zwischen Funktion und Gestalt, die mit dem Elementmodell C&CM durchgeführt wird erlaubt die Integration verschiedener Modelldarstellungen und die systematische Erstellung anderer Modelle, die zueinander referenziert sind und somit verschiedene Sichtweisen auf das Problem ermöglichen. Das in Bezug setzten der Modellvorstellungen geschieht implizit bei jeder Produktentwicklung. Die explizite Verwendung des C&CM erleichtert wesentlich das Wechseln der Modellvorstellungen und somit die Lösungsfindung.

2.1. Systematik des C&CM

Den Kern des Elementmodells bilden die drei Grundhypothesen. Die Grundhypothesen "Nicht-Singularität" und "Technische Funktion" stellen Bedingungen für die Erfüllung einer technischen Funktion. Eine technische Funktion ist jede Funktion, Verhalten eingeschlossen, die der Eingang/Ausgang Beschreibung gemäß VDI 2221 [14] entspricht. Diese beiden Grundhypothesen legen fest wie die Elemente Wirkflächenpaare (WFP) und Leitstützstrukturen (LSS) eines technischen Systems aufgebaut sein müssen, damit dessen Funktion erfüllt wird. Grundhypothese "Dynamisches Modell" hält fest, dass ein technisches System auf jeder Detaillierungsstufe der Betrachtung gleich anzuwendend ist. Je nach Problemstellung und Bezug kann ein System sehr hoch aufgelöst oder aber als reine "Blackbox" betrachtet werden.

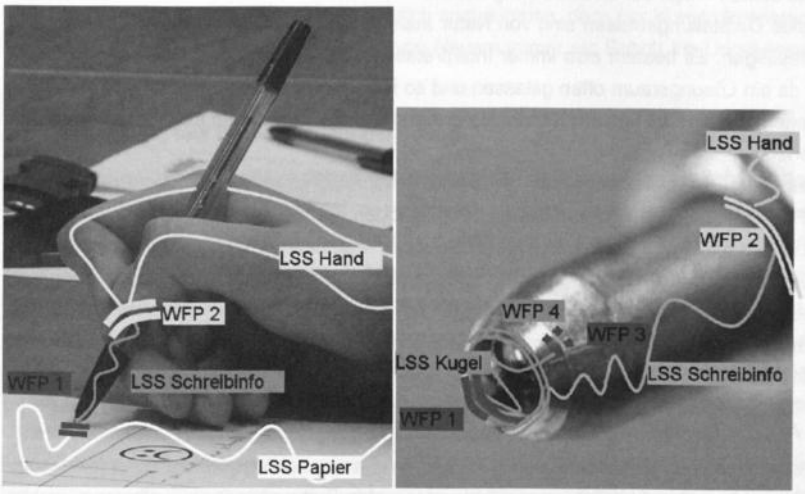


Abbildung 1: Funktionen eines Kugelschreibers hervorgehoben durch WFP und LSS

Beispiel: Grundlage für die Arbeit mit dem C&CM ist das Verständnis dafür, dass ein Effekt nur dann stattfinden kann, wenn die eine Wirkfläche (WF) des betrachteten Systems in Kontakt mit einer Wirkfläche des benachbarten System steht (ein WFP erzeugt) und dass für die Erfüllung einer technischen Funktion ein weiteres WFP existiert, dass durch eine LSS mit dem ersteren verbunden ist. Der Kugelschreiber in Abbildung 1-links kann seine Funktion nur erfüllen, wenn das WFP zwischen Hand und Kuli, das WFP zwischen Papier und Kuli, sowie wenn die Leitstützstruktur des Kugelschreibers existieren. Schreiben auf Glas ist nicht möglich, da das WFP Kuli-Glas keine Übertragung der Schreibinformation durch die Tinte zulässt. Abbildung 1-rechts zeigt, dass diese Systematik auf alle Detaillierungsebenen gleichermaßen anzuwenden ist. Alle Teilfunktionen können ebenfalls abgebildet und in Bezug zueinander gesetzt werden.

Die Grundhypothesen des C&CM übernommen aus [9]:

Nicht-Singularität

Jedes Grundelement eines technischen Systems erfüllt seine Funktion durch Wechselwirkung mit mindestens einem anderen Grundelement.

Die eigentliche Funktion – und damit die gewünschte Wirkung – wird erst durch den Kontakt einer Fläche mit einer anderen Fläche möglich. Diese Flächen sind Wirkflächen und bilden zusammen ein Wirkflächenpaar. Ein Wirkflächenpaar setzt sich aus genau zwei Wirkflächen zusammen.

Technische Funktion

Die Funktion eines technischen Systems oder eines technischen Teilsystems wird grundsätzlich über mindestens zwei Wirkflächenpaare und eine sie verbindende Leitstützstruktur verwirklicht. Funktionsbestimmend sind dabei allein die Eigenschaften und Wechselwirkungen der beiden Wirkflächenpaare und der sie verbindenden Leitstützstruktur.

Dynamisches Modell

Jedes System, das Funktionen erfüllt, besteht aus den Grundelementen Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur, die in beliebiger Anzahl, Anordnung und Form auftreten können.

2.2. Wesentliche Merkmale

Mit dem Elementmodell C&CM wird dem Ingenieur ein konstruktionsmethodisches Grundmodell zur Verfügung gestellt, das menschliche Handlungsprinzipien beim konstruktiven Problemlösen unterstützt. Der Kernpunkt hierbei ist, dass mit diesem Grundmodell der Zugang zu anderen Modelldarstellung auf das konstruktive Problem wesentlich vereinfacht wird. Die Tätigkeit des Konstruierens ist geprägt durch ein Springen zwischen verschieden Sichtweisen auf das Problem. Diese Sichtweisen hängen zum Teil auch voneinander ab. Dies wird insbesondere bedeutsam, wenn die verwendeten Modelle inkompatibel sind und sich schlecht ineinander überführen lassen, so dass die zielgerichtete Lösung des Problems aufgrund falscher oder mangelhaft vorliegender Informationen behindert wird. Modelle sind für den Konstrukteur unverzichtbar um sich das Problem so darzulegen, wie es der Situation entspricht. Im Folgenden werden nun einzelne Handlungsprinzipien, und deren Gegensätze,

die in verschiedenen Modelldarstellungen resultieren aufgegriffen und gezeigt, wie das C&CM in der jeweiligen Sichtweise wieder zu finden ist:

Wechsel zwischen Abstrakt/verbal und konkret/bildhaft

Mit dem Elementmodell gelingt die Verknüpfung von abstrakten und konkreten Darstellungsweisen. Funktionale Darstellung lassen sich mit einer Geometriedarstellung zu verknüpfen. Die WFP und LSS visualisieren Funktionen auf der konkreten Gestalt. Die Elemente WFP und LSS sind in sowohl abstrakten, als auch konkreten Darstellungen zu finden.

Gesamt – Detail

Die Elemente des C&CM sind auf jeder Detaillierungsstufe gleich zu behandeln. So kann ein WFP aufgelöst werden in viele WFP, die ein genaueres Hinsehen ermöglichen. Der Bezug der Teilsysteme bleibt durch die hierarchische Ordnung bestehen und sorgt für Referenz zum übergeordneten System.

Synthese und Analyse

Bei der konstruktiven Problemlösung findet eine ständige Zielsystemklärung statt [15]. Durch die systematische Integration von Funktion und Gestalt wird das Ziel für jede zu findende Gestalt mitdokumentiert, bleibt als Teil der Gestalt (Wirkfläche) als Referenz im Modell, d.h. die charakteristische Analyse der durch Synthese festgelegten Lösung bleibt einfach zugänglich und überprüfbar.

Ein Hindernis für erfolgreiche Produktentwicklung sind schwache Repräsentationen und Argumentationsunterstützung durch Modellsysteme. Dies resultiert aus der einseitigen Sichtweise (eine bestimmte Modellsicht) auf das Produkt bei gleichzeitigem Fehlen einer anderen ebenfalls wichtigen Sichtweise. Genau hier liegt der Vorteil der Benutzung des Elementmodell C&CM. Dadurch, dass die Elemente WFP und LSS auf jedem Abstraktionsniveau (in jeder Modelldarstellung) identifizierbar sind, ist ein einfacher Transfer und Wechsel der Modelldarstellung möglich. Die in den speziellen Modellen gespeicherten wichtigen Informationen, liegen als Eigenschaften der Elemente WFP und LSS vor und werden je nach Phase der Problemlösung in den Vordergrund gezogen. Die Bedeutung der Beziehungen verschiedener Modelldarstellung ist kritisch und sollte dargestellt werden um den Konstrukteur zu unterstützen. Unterstützende Systeme sollten erstellt werden mit Bezug auf menschlich kognitive Faktoren, d.h. Modelle, bildlich mathematisch oder auch computergestützt, sollten immer als externe Repräsentationen menschlicher mentaler Modelle und Prozesse gesehen werden. Dies gelingt mit dem C&CM.

3. Anwendung des C&CM

Im folgenden beschrieben Entwicklungsprojekt wurde ein C&CM Produktmodell erstellt um die Weiterentwicklung des Unterarms des humanoiden Roboters ARMAR III des SFB588 „Lernende und kooperierende multimodale Roboter" abzusichern. Das Modell dient als Basis für die Abschätzung der Auswirkungen von Änderungen im Unterarm des Systems. Die Methode "Change Prediction Method CPM"[4] wird am Engineering Design Centre EDC der University of Cambridge (UK) entwickelt. In der ursprünglichen CPM werden aufbauend auf einem Produktmodell, das die Verbindungen der Komponenten zueinander in einer Design Structure Matrix erfasst (Abbildung 2), die erkannten Komponentenbeziehungen hinsichtlich

Wahrscheinlichkeit und eventuelle Auswirkungsstärke einer potentiellen Änderung der Konstruktion bewertet. Ergebnis der Methode ist nach Auswertung der direkten und indirekten Beziehungen ein Risikowert der Änderungsausbreitung für jede Komponentenbeziehung.

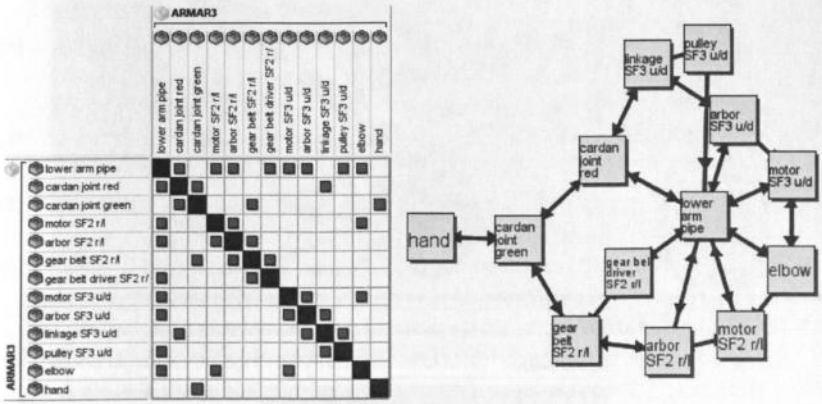


Abbildung 2: DSM basiertes Produktmodell für die Change Prediction Method [4]

Das CPM Produktmodell wird mittels Interview der an der Entwicklung beteiligten Ingenieure erstellt und speichert deren Beurteilung des Systems mit Hilfe der DSM. Erstellt man das Produktmodell für die CPM als C&CM Modell werden zusätzlich funktionale Informationen gespeichert, sodass eine die Qualität des Modells höher und zuverlässiger ist. Abbildung 3 zeigt den Roboter und einen Ausschnitt aus dem erstellten C&CM Produktmodell als Funktionen - Bauteil Matrix. Das zum Teil bruchstückhaft und bei verschiedenen Personen liegende Wissen kann auf diese Weise systematisch gespeichert werden. Die für die getroffenen Entscheidungen relevanten Funktionen und Bedingungen die zur Gestalt des Produktes geführt haben, werden als Eigenschaften der WFP und LSS gespeichert und werden dadurch nachvollziehbar.

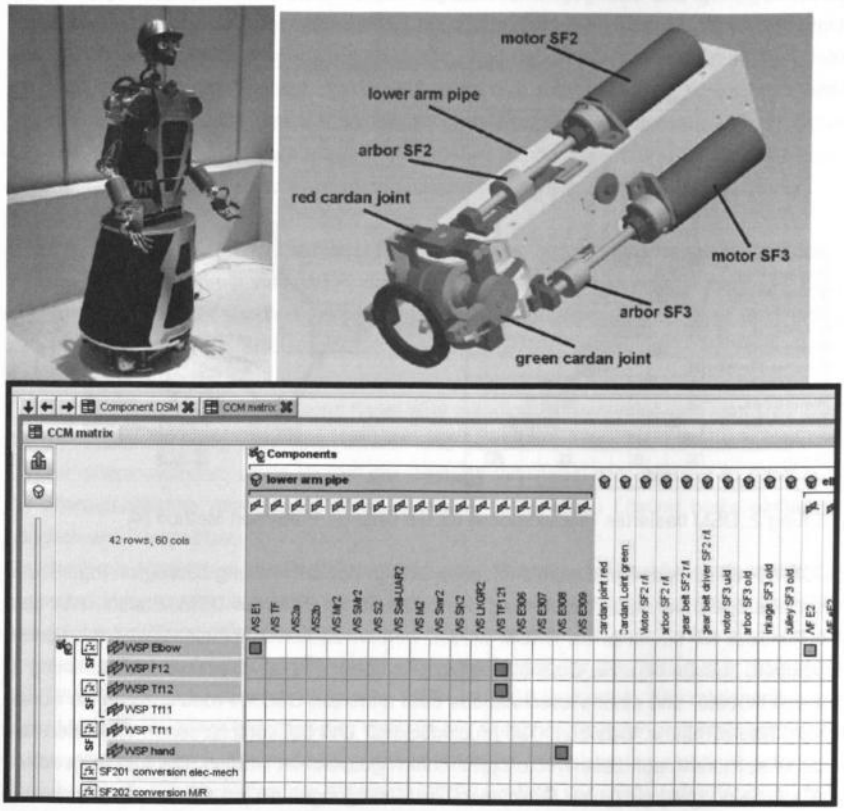


Abbildung 3: Drei Unterschiedliche Sichtweisen auf den ARMAR III

4. Schlussfolgerung

Mit dem Elementmodell C&CM steht dem Entwickler ein flexibles Werkzeug zur Verfügung, welches unter Berücksichtigung des Faktors Mensch die kreativen Phasen der Produktentwicklung unterstützt. Die Anwendung des Elementmodells unterstützt die Erstellung und Speicherung eines Systemverständnisses, bringt Ingenieure dazu über das zu lösende Problem in einer systematischen Art und Weise nachzudenken und Zusammenhänge zu ergründen. Kreatives, unstrukturiertes Vorgehen, das für die Lösungsbegründung und -Findung aber unerlässliches ist, wird bewusst zugelassen; die Ergebnisse des unstrukturierten Vorgehens werden systematisch gespeichert und liegen im Ergebnis als zusammengefasstes Systemmodell vor, das „weiches", funktionales Wissen mit direkter Referenz zur Gestalt des Produktes umfassend darstellt.

5. Referenzen

[1] Albers, A., Meboldt, M. IPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. ICED Paris, 2007.

[2] Bender B. Erfolgreiche Individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, 2004.

[3] Blessing L. A process-based approach to Computer-Supported Engineering Design. Dissertation, University of Twente, Enschede, 1994.

[4] Clarkson P.J., Simons C. and Eckert C.M. Predicting change propagation in complex design. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126(5), 765-797.

[5] Eckert C.M., Albers A., Ohmer M. Engineering Design in a different way: cognitive perspective on the Contact and Channel Model approach. In International Conference on Visual and Spatial Reasoning, Cambridge, USA, 2004.

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

[7] Frankenberger E., Birkhofer H., Badke-Schaub P. Designers – The Key to Successful Product Development. Springer Verlag, London, 1998.

[8] Lossack R.-S. Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnergestützte Konstruktion. Habilitationsschrift, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), 2004.

[9] Matthiesen S. Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. IPEK Forschungsberichte, 2002.

[10] Pahl G., Beitz W. Konstruktionslehre. Springer, Berlin Heidelberg, 2003.

[11] Rodenacker: Methodisches Konstruieren, Konstruktionsbücher Band 27, 1970.

[12] Roth K. H. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer Verlag, 1982.

[13] Suh N.P. The Principles of design. Oxford University Press, New York, 1990.

[14] VDI 1993, VDI Richtlinie 2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.

[15] VDI Berichte 1169 Effizienter Entwickeln und Konstruieren. VDI Verlag, Düsseldorf, 1995.

[16] Züst R. Systems Engineering. Verlag Eco-Performance, Zürich, 1998.

Teilemanagement: Bedarf der Industrie - Anforderungen an die studentische Ausbildung

Michael Curschmann [1]; Erhard Leidich [1], Werner Grahl [2]

[1]TU Chemnitz, [2]IB Dr. Grahl

Kurzfassung

Der Markt fordert eine immer größere Vielfalt an Produktvarianten. Mit Ausnahmen von Baukastenkonstruktionen erhöht ein Ansteigen der Variantenvielfalt das Komponentenspektrum und damit die Anzahl an zu verwaltenden Bauteilen. Ein konsequentes Management der in Produkten eingesetzten und einzusetzenden Bauteile ist somit für die Unternehmen strategisch notwendig, um insgesamt die Herstellkosten für die Produkte zu senken, d.h. um einerseits die Anzahl vorhandener Bauteile zu reduzieren und andererseits die Anzahl neu entstehender Bauteile zu begrenzen. Der Vortrag gibt einen Überblick über die aktuelle Situation in vielen Unternehmen und zeigt beispielhaft Lösungsstrategien auf. Weiterhin werden die Anforderungen bestimmt, die sich aus der vorgestellten Praxissituation für die Ingenieurausbildung ergeben und ein Lösungsansatz für die Lehre vorgestellt.

1. Motivation

Die fortschreitende Individualisierung der Produktanforderungen führt zur Ausweitung der Produktvarianz [1] und bei Beibehaltung der bisherigen Organisation der Produktentstehungsprozesse zwangsläufig zum Anwachsen des Teilestamms und der Produktentstehungskosten [2]. Um Einsparpotenziale in Höhe von 15%-20% der Herstellkosten einer Baugruppe („Potential Variantenkosten" - Abb. 1) in Entwicklung&Konstruktion und in den Geschäftsprozessen, die häufig auf konstruktive Daten zurückgreifen – wie beispielsweise Arbeitsvorbereitung, Fertigung&Montage und Material&Lagerwirtschaft – zu erschließen, werden zunehmend die Produktentwicklungsprozesse so verändert, dass die Abhängigkeit von Varianz und Teilespektrum (Teilestamm) durchbrochen werden kann. Ziele sind die Varianz der Produkte nach außen zu erhalten bzw. zu erweitern, aber nach innen zu reduzieren, um damit das Teilestammwachstum für zukünftige Projekte/Aufträge zu bremsen. Insgesamt soll das Wiederverwenden von Komponenten/Lösungen gegenüber dem Neukonstruieren stärker als bisher unterstützt werden.

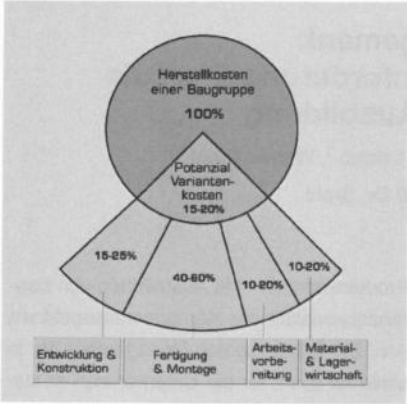


Abb. 1: Beeinflussbares Potenzial bei den Herstellkosten einer Baugruppe [3]

2. Handlungsbedarf

Die Durchdringung der Geschäftsprozesse mit CAD-, ERP- und/oder PDM-Technologien und die Verfügbarkeit entsprechender universeller Softwarewerkzeuge ermöglichen heute digitale Bestandsanalysen (z.B.: Clusteranalyse mit Datawarehousesystemen) mit relativ geringem Aufwand. Diese effizienten Möglichkeiten zur quantitativen Bewertung von Teilestämmen verbunden mit einer Analyse der Teilprozesse und Schnittstellen der Produktentwicklungsprozesse gestatten es, die Teilemanagementmaßnahmen – von der Reduzierung des Teilestammes und des Teilestammwachstums bis zur physischen Umsetzung am Arbeitsplatz des Nutzers – anforderungsgerechter zu konzipieren und in den Kosten-Nutzen-Relationen mit erhöhter Sicherheit zu planen.

Durch Teilemanagement können in relativ kurzer Zeit erhebliche Kosten- und Zeiteinsparungen erwirtschaftet werden, zumal die typischen Schwachstellen in den Prozessen und im Teilestamm allgemein bekannt sind:

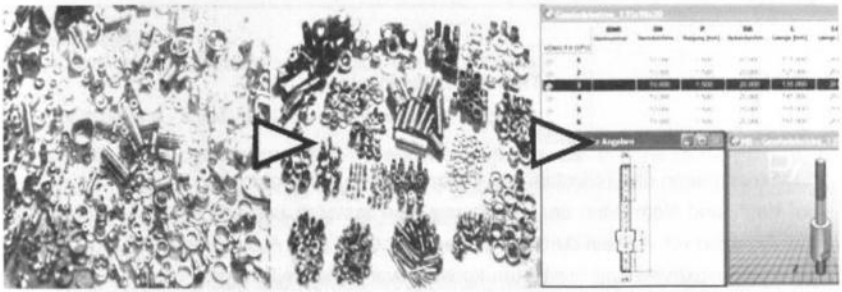
- Die Bezeichnungen der Artikel im Teilestamm sind häufig unvollständig und/oder fehlerhaft. Die Strukturierung der Teileklassen verwischt immer stärker. Die Übersicht über den Teilestamm (Fertigungsteile, Werksnormteile, Kaufteile und Normteile) und die Nachnutzungsmöglichkeiten von Teilen aus vorangegangenen Projekten werden immer stärker beeinträchtigt.
- Die Festlegungen zu Vorzugslieferanten und Auswahlreihen sind zwischen den Geschäftsbereichen nur teilweise abgestimmt, am Arbeitsplatz des Ingenieurs oft nicht bekannt und werden somit im Tagesgeschäft zu selten umgesetzt.
- Die Informationen zu Teilen und Teilearten sind auf verschiedene Standorte, Medien und Systeme verteilt. Die Beschaffung von Informationen zu neuen Teilen ist zeitaufwendig und im Sinne einer Vereinheitlichung wenig systematisch.
- Die Aktualität der Teile im Teilestamm ist nur bedingt gesichert. Damit wachsen Fehlerrisiko und Aufwand zur Fehlerbeseitigung.

- In der Konstruktion wird zu schnell neu konstruiert, weil der Suchaufwand im Teilestamm zu hoch ist, die Suchwerkzeuge nicht anwenderfreundlich sind oder das Suchergebnis nicht ausreichend ist.
- Bei Fertigungsteilen setzt das betriebliche Normen (Baureihen und Musterteile) zu spät ein, so dass neue Teile außerhalb der Werksnormen angelegt werden.
- In der Montage steigen mit Zunahme der Anzahl ähnlicher Teile die Verwechslungsgefahr und das Risiko von Fehlverbauungen (Produkthaftung) weiter an.
- Im Einkauf wächst ständig die Zahl der Bestellungen mit kleinen Stückzahlen.

Das weitere Anwachsen von Varianz und Größe des Teilestammes verstärkt diese betriebswirtschaftlichen Negativwirkungen.

3. Lösungsstrategie

Teilemanagement ist eine bereichsübergreifende Aufgabenstellung [4], welche die Zusammenarbeit von Vertretern aller Geschäftsbereiche und eine neue Qualität in der Integration der IT-Systeme erfordert (Abb. 2).



Nachbearbeitung **Bereinigung** **Konsolidierung**

Abb. 2: Strategie des Teilemanagements

Unterschiedliche Produktspektren, Fertigungstypen und Organisationsformen bedingen differenzierte Vorgehensweisen beim Teilemanagement. Generell ist zwischen Konzepten zum Bereinigen und Konsolidieren [5] zu unterscheiden. Die darüber hinaus gehende Typisierung in Teilmaßnahmen (Abb. 3 und Abb. 4) vereinfacht das Bilden von Ketten aus spezifischen aufgabenbezogenen Einzelmaßnahmen.

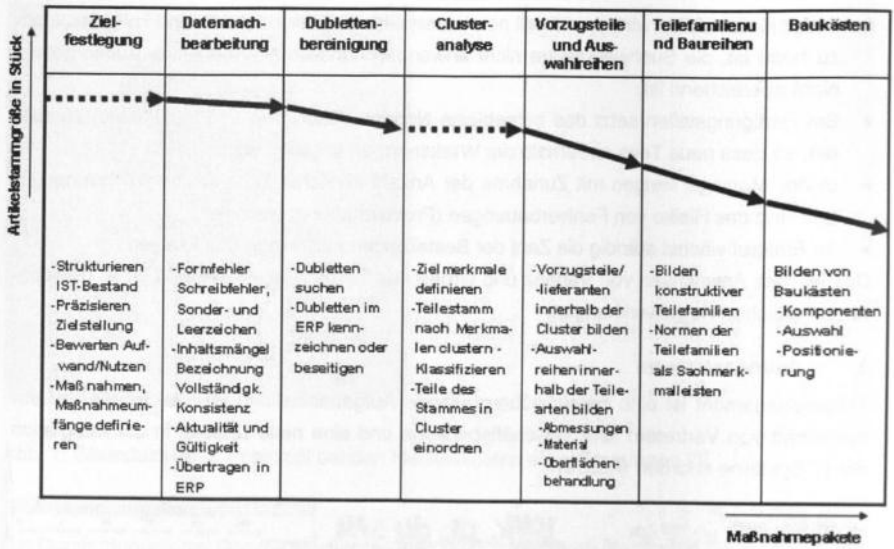


Abb. 3: Maßnahmenübersicht zur Teilestammbereinigung

Das Bereinigen (Abb. 3) beinhaltet:

- das Strukturieren des Teilestammes in transparente Artikelgruppen
- bei Kauf- und Normteilen das Bilden von Vorzugsteilen und von Auswahlreihen sowie das Ersetzen von Artikeln durch solche aus Vorzugs- oder Auswahlreihen
- bei Fertigungsteilen das Erarbeiten konstruktiver Teilefamilien, das Vereinheitlichen von Gestaltzonen, das Typisieren von Konfigurationsprozessen für Baugruppen und das Normen in Form von Sachmerkmalleistenkonzepten und Konfiguratoren
- das reproduzierbare Gestalten einheitlicher Benennungen.

Das Konsolidieren (Abb. 4) beinhaltet das Integrieren der in den Geschäftsprozessen genutzten Systeme (ERP, PDM, CAD) durch eine Linkdatenbank und das arbeitsplatzbezogene Umsetzen der konzeptionellen Lösungen in Softwarelösungen. Kauf- und Normteilekataloge sind als einheitliche Modelle bereit zu stellen (einschließlich externer Revisionierung), die Auswahlreihen zu visualisieren, Sachmerkmalleisten für Fertigungsteile zu modellieren und zu visualisieren, sowie für alle Teilearten digitale Hilfen zum Klassifizieren, Identifizieren, Suchen und Vergleichen einzuführen.

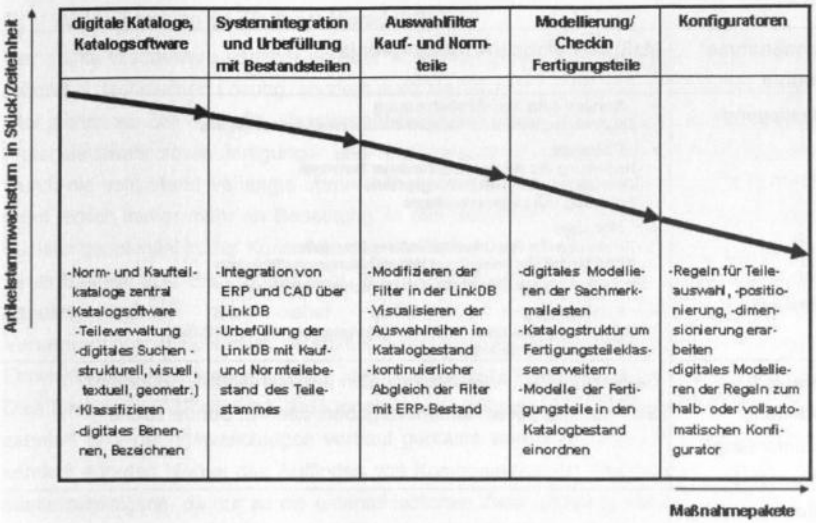


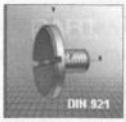
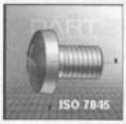
Abb. 4: Maßnahmenübersicht zur Teilestammkonsolidierung

4. Fallbeispiel - Kauf- und Normteilereduzierung

Gegenstand des Fallbeispieles ist die Veranschaulichung der Abläufe und Prozesse bei einer Maßnahme zur Reduzierung des Kauf- und Normteilespektrums im Sinne der Definition von Vorzugsteilen und Auswahlreihen für zukünftige Produkte.

Projektbeschreibung:

Ziel:	Kauf- und Normteilereduzierung (Bestand und Wachstum) als Bereinigungsmaßnahmen (ohne Konsolidierung).
Ausgangssituation:	ERP und CAD sind integriert, Basisbereinigung durchgeführt, bisher ermittelte Vorzugsteile sind in schon in Filtern definiert.
Bearbeiterteam:	Konstruktion, Einkauf, Montage, IT. Clustermerkmale und Clusterauswertung erfolgen als Zwischenetappen im Bearbeiterteam.
Projektzeitraum:	12 Monate mit klassenweiser Umsetzung.
Maßnahmen:	Bereinigen des Teilestammes durch fünf Teilmaßnahmen in zeitlicher Folge (siehe Abb. 3): - Zielfestlegung - Datennachbearbeitung - Dublettenbereinigung - Clusteranalyse - Erarbeiten von Vorzugsteilen und Auswahlreihen als Entscheidungsvorlage für das Projektteam. Projektablauf und Ergebnisfortschritt sind nachfolgend tabellarisch dokumentiert.

Teilmaßnahme/ Ergebnis	Maßnahmeinhalt/Arbeitsergebnis
Zielfestlegung Lasten- und Pflichtenheft	• **Service und Kundenbetreuung** **- Ein Artikelschlüssel für Verschleißteilwechsel und Reparatur** • **Einkaufs** **- Halbierung der Anzahl verschiedener Normteile** **- Optimierung des Beschaffungspreises** **- Erhöhung des Lagerumschlages** • **Montage** **- Halbierung der Anzahl verschiedener Normteile** **- Reduzierung der Fehler- und Verwechslungsmöglichkeiten** **- Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Werkzeuge** • **Entwicklung** **- Reduzierung des Such- und Beschaffungsaufwands für CAD-Daten** **- Reduzierung Einführungsaufwand**
Datennach-bearbeitung 37% Datensätze nachbearbeitet	Bereinigung der Artikelstammdaten (Vollständigkeit, Konsistenz, Schreibfehler, freie Namensvergaben, Leer- u. Sonderzeichen)
Dubletten-bereinigung 1,7% Artikel als Dubletten erkannt	27910 ZAHNSCHEIBE DIN6797-A 3,2 - FDST VERZ A3,2-FDST 751409 ZAHNSCHEIBE DIN6797-A 3,2 - FDST VERZ A3,2-FST VERZINKT 751414 ZAHNSCHEIBE DIN6797-A 5,3 - FDST VERZ A5,2-FST VERZINKT 27944 ZAHNSCHEIBE DIN6797-A 5,3 - FDST VERZ A5,3-FDST-A2G
Cluster-analyse Merkmalcluster mit Artikelzuord-nung	⊟ Schraube (569) ⊞ Bedingungen ⊞ Zuweisungen ⊞ Augenschraube (1) ⊞ Blechschraube (2) ⊞ Flachkopfblechschraube (4) ⊟ Flachkopfschraube (29) ⊞ Bedingungen ⊞ Zuweisungen ⊞ DIN 921 (1) ⊞ ISO 1580 (13) ⊞ ISO 7045 (15) 139054 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M3X10-ST-5.8 353270 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M4X10-A2-70 18910 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M4X10-ST-4.8 353271 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M4X12-A2-70 18953 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M4X12-ST-4.8 18821 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M4X6-ST-4.8 18872 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M4X8-ST-4.8 19089 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M5X10-ST-4.8 364176 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M2,5x6-A2-70 62618 ISO1580 SCHRAUBE ISO1580-M3X16-ST-4.8
Vorzugsteile/ Auswahlreihen • Ersetzungsalter-nativen als Ent-scheidungsvorla-gen • Verteilungsmatri-zen als Entschei-dungsvorlage • Bildung Auswahl-reihe (16 Artikel von 29)	**Teilebestand** **Bewertung**  **Ersetzen durch ISO 7045 ohne Ausnahme**  **Vorzugsteil** **Ersetzen durch ISO 7045 ohne Ausnahme** Lösungsvorschlag für Teilefilter ISO 7045 Nenndurchmesser Länge / M2,5 / M3 / M3,5 / M4 / M5 / M6 3 / A 4 / A,A 5 / B / A 6 / A,B / A / A,B 8 / B 10 / B / A / A,B,B / B / C 12 / A,A,A,B,B 16 / B / A,B 18 / A 20 / Erläuterung 25 / A: ISO 7045 / A 30 / B: ISO 1580 32 / C: DIN 921 / B

5. Anforderungen an die Ingenieurausbildung

Der starke Wettbewerb verlangt von der Konstruktion nicht nur die Realisierung der bestmöglichen technischen Lösung, sondern auch die Beachtung wirtschaftlicher Aspekte [6] [7]. Hier stehen zur Zeit noch die „klassischen" Bereiche wie Entwicklungszeit, Bauteilauslegung, Materialauswahl sowie fertigungs- und montagegerechte Gestaltung im Vordergrund [8]. Durch die vom Markt verlangte immer höhere Variantenvielfalt gewinnt das Teilemanagement jedoch immer mehr an Bedeutung. In den Betrieben wird erkannt, welches Kostenreduzierungspotential in der Konsolidierung der Teilestämme und in der Nachnutzung vorhandener Bauteile bzw. Baugruppen liegt. In die Ausbildung der Ingenieure müssen daher diese Aspekte stärker als bisher einfließen, d.h. das bereichsübergreifende Verantwortungsbewußtsein muss stärker betont werden. Dazu ist die verzahnte Nutzung von Entwicklungswerkzeugen wie PLM, ERP, CAD, FEM, Teilemanagement etc. unabdingbar. Dies führt zu der Anforderung, dass Ingenieure so früh wie möglich mit der Nutzung von verzahnten Entwicklungswerkzeugen vertraut gemacht werden müssen. Besondere Aufmerksamkeit erfordert hierbei das Auffinden von Komponenten zur Nachnutzung und die Teilestammbereinigung, da nur so die unterschiedlichen Ziele „Variantenvielfalt" und „beherrschbarer Teilestamm" in Einklang gebracht werden können. Von der Softwareindustrie werden hierfür bereits Werkzeuge angeboten. Für die Universität gilt nun – gemeinsam mit Herstellern und Anwendern – den angehenden Ingenieuren den Umgang mit diesen Systemen zu vermitteln und den Anwendern bei Nutzung und Optimierung Unterstützung zu leisten.

6. Lösungskonzept

Hier setzt das an der Professur Konstruktionslehre der Technischen Universität Chemnitz eingerichtete Labor für integrierte Produktentwicklung an (Abb. 5). In mehreren Stufen werden die Studenten an die Arbeit mit integrierten Entwicklungswerkzeugen herangeführt:

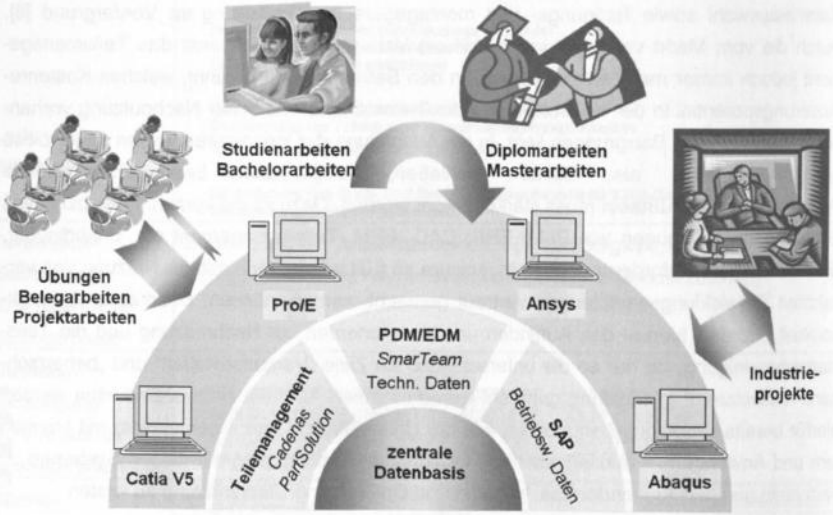


Abb. 5: Labor für integrierte Produktentwicklung

- **Stufe 1: Grundstudium / Bachelorstudium**
  Kurse, Vorlesungen/Übungen, Belege, Praktika und Projektarbeiten führen die Studenten Schritt für Schritt an die integrierte Nutzung rechnergestützter Werkzeuge (PLM, ERP, CAD, FEM, Teilemanagement) heran. Im Rahmen dieser Arbeiten bauen die Studenten einen Datenbestand auf, der als „Modellteilestamm" dient. Das Spektrum der entstehenden Daten reicht dabei von den einfachen Modellen der CAD-Grundkurse über die Modelle von Kupplungs- und Getriebebelegen bis hin zu Projektarbeiten, welche z.B. die komplette Konstruktion von Prüfständen umfassen.
- **Stufe 2: Hauptstudium / Masterstudium**
  Die durch die Vordiploms-/Bachelorarbeiten entstandenen Datenbestände können nun in Studien-, Diplom- und Masterarbeiten ausgewertet und optimiert werden. Die Belegarbeiten repräsentieren dabei die gewachsenen Strukturen von Baureihen, die Projektarbeiten das Ergebnis einer Einzelfertigung. Ziel ist es, grundlegende Zusammenhänge bei der Auswertung und Optimierung bestehender Datenbestände zu ermitteln und geeignete Vorgehensweisen für die Behandlung unterschiedlicher Datenarten (Serien- oder Einzelfertigung) und unterschiedlicher Datenmengen zu formulieren. Diese können dann in Richtlinien für die Optimierung des integrierten Entwicklungsprozesses einfließen. Eine grundlegende Aufgabe ist dabei die Aufstellung von Algorithmen zur Bauteil- und Ähn-

lichkeitssuche, denn das schnelle und erfolgreiche Suchen von wieder verwendbaren Bauteilen und Baugruppen ist der Schlüssel zu einem kompakten Teilestamm.

- **Stufe 3: Industrieprojekte**
  Das Labor findet dann auch Einsatz in der Zusammenarbeit mit der Industrie. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im Rahmen von konkreten Industrieprojekten angewandt [9], indem bestehende Teilestämme anhand der ermittelten Richtlinien und Algorithmen ausgewertet und optimiert werden. Die Erkenntnisse aus der Praxis fließen dann wiederum in die Optimierung der Richtlinien ein. Weiterhin können sich Industriebetriebe im Labor über das Zusammenspiel der integrierten Konstruktionswerkzeuge informieren. Dabei sollen besonders auch die Mitarbeiter aus den Bereichen Einkauf, Finanzen, Controlling und Normung angesprochen werden, denn das volle Potential des integrierten Entwicklungsprozesses kann nur in enger Zusammenarbeit aller an der Entwicklung beteiligter Bereiche ausgeschöpft werden.

7. Zusammenfassung

Zu den bisherigen Zielen der Produktentwicklung „hochwertiges, marktgerechtes Produkt", „kurze Entwicklungszeit" und „kostengünstige Fertigung" kommt das Ziel „Variantenvielfalt" hinzu. Hierzu ist ein konsequentes Management der in einem Produkt eingesetzten Bauteile/Baugruppen erforderlich. Nur durch Nachnutzung vorhandener Komponenten und Begrenzung von Neuteilen kann die geforderte Variantenvielfalt beherrscht werden. Dies erfordert noch stärker verzahnte Entwicklungswerkzeuge und ein noch stärkeres bereichsübergreifendes Verantwortungsbewusstsein beim Entwickler. Mit dem Labor für integrierte Produktentwicklung sollen Studenten stufenweise an die Arbeit mit integrierten Entwicklungswerkzeugen herangeführt werden. Darüber hinaus stellt es eine Demonstrations- und Optimierungsplattform für die Zusammenarbeit von Softwareentwicklern, Industrie und Forschung bereit.

8. Literatur

[1] Himmelsbach, O.: Produkte und Prozesse bilden Anwenderwünsche ab, VDI-Nachrichten Nr. 37, 15.09.2006

[2] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann,U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Springerverlag Berlin Heidelberg New York 2005

[3] Caesar, C.: Kostenorientierte Gestaltungsmethodik für variantenreiche Serienprodukte, VDI Reihe 2, Nr. 218, VDI-Verlag Düsseldorf 1991

[4] Grahl, W.; Lange, C.: Systematisches Teilemanagement in Konstruktion und Fertigung spart Kosten und senkt Durchlaufzeiten, ZWF H. 1-2/2007, S. 60-63

[5] Grahl, W.: Mit LEAN DESIGN zu Wettbewerbsvorteilen, 2. Internationale Automobil Fachtagung 2006. Festo Technologie Center, Esslingen, 12.10.2006

[6] Leidich, E.; Götze, U.: Kostenorientierte Produktentwicklung - Target Costing, Multimedia-CD 06/2007

[7] Fischer, J O.; Götze, U.; Leidich, E.; Köhler, S.: Management von Kostenwissen im Konstruktionsprozess. Systemelemente für Industrieunternehmen, VDI-Berichte Nr. 1964, 2006, S. 275 - 296

[8] Leidich, E.: Zielkostenkonstruktion am Beispiel einer Prüfmaschine, ZWF 91 (1996), Carl Hanser Verlag München

[9] Heid, K.: Teamarbeit wie im Ingenieurbüro, VDI-Nachrichten 10.11.2006.

Ableitung einer Produktvariante aus einer Referenzvariante

Jörg Feldhusen, Erwin Nurcahya
IKT, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Kurzfassung

Das Ziel von Variantenmanagement ist einerseits den Kunden so viele Produktvarianten wie möglich anzubieten, andererseits aber die interne Variante des Unternehmens so klein wie möglich zu halten. Die vermeidbare Erzeugung eines neuen Bauteils oder einer neuen Baugruppe muss in einem standardisierten Variantenentstehungsprozess gesteuert werden. Um die Nachhaltigkeit der Produktdaten zu gewährleisten, müssen die neuen Produktdaten in ein existierendes Produktdatenmodell integriert werden, das die Erstellung einer neuen Produktvariante unterstützt. Dieser Beitrag beschreibt die Verwaltung von Produktdaten mit Hilfe einer Referenzvariante und seiner Referenzproduktstruktur, die als Speicherplattform für Bauteile und Baugruppe innerhalb einer bestimmten Produktfamilie dienen können. Die an den Kunden gelieferte Produktvariante ist eine Ableitung der Referenzvariante. Der Konstrukteur wird dabei unterstützt und ermutigt, das Produkt eher zu konfigurieren, anstatt es neu zu konstruieren.

1. Einführung

Ein Unternehmen mit einer hohen Produktvielfalt muss seinen Produktentstehungsprozess optimieren, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Infolge der Kundenerwartung nach individuellen Produkten, muss ein Unternehmen in der Lage sein, die hohe interne Vielfalt wegen der hochgradig angepassten kundenindividuellen Produkte zu beherrschen. Aufgrund des Wettbewerbs und des zeitlichen Drucks (schnelles time-to-market) ist es ein vordringliches Ziel eines Unternehmens mit so wenig Aufwand wie möglich kundengerechte Produktvarianten zu erstellen. Dies betrifft nicht nur den Konstruktionsprozess sondern auch Nachbarprozesse, wie Fertigung und Montage.

Dieses Problem wächst mit der Produktkomplexität und der Anzahl der verwickelten Mitarbeiter sowie der Komplexität der Organisation durch die Abteilungsgrenzen. Häufig ist ein Konstrukteur nicht in der Lage, existierende Daten bzw. Informationen, die für den neuen Auftrag oder die neuen Anforderungen relevant sind, in einer angemessenen Zeit zu finden. Um diesem Mangel zu begegnen, gibt es bereits Standardisierungsregeln in Form von z. B. Konstruktionsleitfäden. Jedoch aufgrund zeitintensiver Suchprozesse werden diese Regeln von den Konstrukteuren oft nicht berücksichtigt. Oft ist es viel einfacher und schneller für einen Konstrukteur, ein neues Bauteil oder eine neue Baugruppe zu erstellen, anstatt eine vorhandene zu nutzen. Als Folge wächst die Variabilität des Produktbestands enorm.

2. IST-Situation

Ein Unternehmen muss die Variantenvielfalt eines Produkts bereits in der Anfangsphase der Produktentwicklung planen, um den Aufwand bei der Variantenerstellung zu minimieren. Das Unternehmen muss daher eine umfangreiche Marktanalyse durchführen, um die Basisinformationen für das zu entwickelnde Produkt zu sammeln. Die Produktvielfalt muss möglichst detailliert vor der Markteinführung geplant werden.

In der Praxis planen viele Unternehmen ungenügend deren Produktvielfalt im Rahmen ihres Portfolios. Eine neue Produktgeneration ist in der Regel ein Ergebnis aus einem bestimmten Kundenprojekt mit einem bestimmten Szenario an Anforderungen. Eine neue Produktvariante wird durch die Modifikation oder Anpassung eines vorhandenen Produkts erstellt, das als für das Projekt geltendes „Referenzprodukt" fungiert.

Aufgrund der gewünschten Flexibilität, um Kundenanforderungen zu erfüllen, und des Kommunikationsmangels bzgl. Kundenwünschen zwischen Konstrukteuren und Vertrieb sowie einer kurzen Entwicklungsdauer, wird eine neue Produktvariante aus einer vorhandenen Produktvariante „gebastelt", die die neuen Anforderungen mit nur wenig Anpassung am nächsten erfüllt. Alle Produktdaten, einschließlich der gerade erstellten Produktvariante, werden in einer Produktdatensammlung ohne entsprechende Referenzierungen gespeichert. Diese Vorgehensweise induziert eine hohe Anzahl an Bauteil- und Baugruppenvariante innerhalb kurzer Zeit, weil die Konstrukteure ständig neue Bauteile und Baugruppen für neue Produktvarianten entwickeln (Abb. 1). Die Abhängigkeiten und Referenzierungen von Bauteilen und Baugruppen sind nicht bzw. nicht klar dokumentiert. Die Wiederverwendbarkeit von vorhandenen Bauteilen und Baugruppen wird dadurch erschwert.

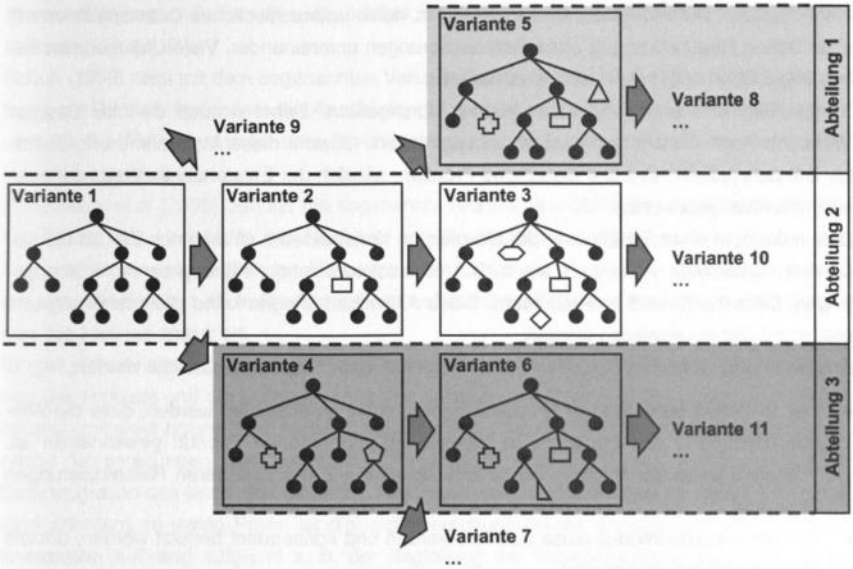


Abb. 1: Willkürliche Ableitung der neuen Produktvariante aus einer beliebigen vorhandenen Variante

Um die Konstruktionsarbeit zu erleichtern, kommt es auch häufig vor, dass die Daten des „Referenzproduktes" kopiert werden und aus der Kopie die neue Produktvariante durch die Änderung einiger Bauteile/-gruppe generiert wird. Die kopierten Bauteile/-gruppen bekommen trotz vielen identischen Anteilen gegenüber dem „Referenzprodukt" völlig andere Artikelnummern. Diese Erleichterung der Konstruktionsarbeit führt neben der schlechten Datenqualität aufgrund hoher Datenredundanz zu erhöhtem Mehraufwand, z. B. bei der Arbeitsvorbereitung und Ersatzteilverwaltung.

Innerhalb eines Unternehmens mit hoher Produktvielfalt ist es für einen Konstrukteur sehr schwierig, sich einen Überblick über alle vorhandenen Bauteile und Baugruppen zu verschaffen. Viele Unternehmen setzen grundsätzlich eine Standardvorschrift ein, die die Konstrukteure anweist, nur bestimmte Standardbauteile und –baugruppe zu benutzen. In der Praxis ist die Umsetzung dieser Vorschrift jedoch sehr schwierig aufgrund der Vielfältigkeit der Kundenwünsche und des Kommunikationsmangels zwischen den Konstrukteuren und dem Vertrieb. Die Konstrukteure tendieren dann fast in jedem Projekt dazu, eine neue kundenspezifische Lösung zu entwickeln. Dieses Problem wird durch die vorhandene Grenze zwischen verschiedenen Abteilungen/Subabteilungen innerhalb des Produktentwicklungsbereichs erschwert. Die Erfahrungen und Informationen bleiben nur innerhalb der betreffenden Subabteilung. Der Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Abteilungen findet kaum statt. Die Folgen sind u. a. erhöhte Datenredundanz und Parallelentwicklungen.

Darüber hinaus ist die Suchaktivität nach vorhandenen Lösungen meist sehr zeitintensiv, weil die meistens Unternehmen keine unterstützenden Werkzeuge bzgl. Wissensmanage-

ment besitzen. Die Produktdaten sind verteilt in vielen unterschiedlichen Datenspeichern mit einer hohen Redundanz und ohne Referenzierungen untereinander. Viele Unternehmen haben sogar überhaupt kein Produktdatenmodell.

Regelmäßig wird eine Produktbereinigung durchgeführt. Dabei werden die überflüssigen Varianten nach bestimmten Kriterien ausgemustert. Obwohl diese Maßnahme erforderlich ist, löst dies jedoch nicht das eigentliche Problem, nämlich der Entstehungsprozess der neuen Produktvarianten selbst.

Dies mündet in einer Situation, in der die meisten Konstrukteure eine Menge Zeit für die Koordinierungsaktivität verbringen, wie z. B. Vertriebskoordination, Klärung der Anforderungsfragen, Datensuche und anderes mehr. Diese Aktivitäten bringen keine Wertsteigerung und sollten möglichst vermieden werden.

Aus der vorhandenen Ist-Situation müssen folgende Gesichtspunkte beachtet werden:

- Der Erstellungsprozess der Produktvarianten sollte so arrangiert werden, dass die Wiederverwendung von Bauteilen/Baugruppen mit einer hohen Priorität gewährleistet ist. Weiterhin muss der Prozess die Nachhaltigkeit der Daten und deren Referenzierungen beachten.
- Ein Produktdatenmodell muss definiert werden und konsequent benutzt werden, um die Datensuche zu vereinfachen.
- Eine sinnvolle IT-Unterstützung mit einem entsprechenden Werkzeug ist unentbehrlich für eine effiziente Arbeit.

3. Vorhandene Ansätze

Eine Variante ist eine alternative Lösung, die sich in wenigstens einem qualitativen oder quantitativen Parameterwert von einer anderen Lösung zum gleichen Zweck unterscheidet [1]. Es gibt sowohl interne (Kosten, Defizit in Methode/Organisation) als auch externe Gründe (Markt, Technologieentwicklung, soziale/politische Änderungen) für die Variantenerstellung [1], [2].

Die Produktstruktur ist ein produktdarstellendes Modell, das die Gesamtheit der nach bestimmten Gesichtspunkten (z. B. Funktion, Fertigung, Montage, Disposition, Kalkulation) festgelegten Beziehungen zwischen Baugruppen und Einzelteilen eines Produktes beschreibt [3].

Die Produktstruktur beschreibt die realen physischen Produktabhängigkeiten und gibt die Beziehungen der Bauteile und Baugruppen wieder [4]. Diese Produktstruktur ist in der Stückliste und den Zeichnungssätzen oder ähnlichen Modellen dokumentiert. Die Stückliste kennzeichnet in der Regel die Einsortierungskriterien innerhalb eines Unternehmens, das normalerweise eine Fertigungs- oder Montagesicht darstellt.

Um den Konstruktionsprozess zu optimieren, ist eine Voraussetzung die Wiederverwendung des bereits in der Vergangenheit aufgebrachten Aufwandes für eine neue Produktvariante. Dies kann z. B. bei der Definition und Festlegungen von Standards für Bauteile/Baugruppen und Prozesse erreicht werden. Dies erfordert die Rationalisierung von Geschäftprozessen, indem Denkarbeit durch Routinearbeit ersetz wird [3]. Hierfür gibt es mehrere Ansätze der

Standardisierung, z. B. Baureihe, Baukästen, modulare Produkte, Plattformen und Featuretechnologieen [2], [4].

Schuh (1989) zeigt mit dem sogenannten Variantenbaum eine Darstellung von Produktstrukturen zur Darstellung, in dem die Anzahl der Komponente in jeder Montagestufe aufgezeigt wird [5]. Die Methode wurde unter Berücksichtigung der Gegebenheiten in der Automobilindustrie entwickelt.

Bongulielmi et.al (2005) benutzt die sogenannte K-&V-Matrix-Methode, um eine strukturelle Darstellung der Variabilität der Produkte und Produkteigenschaften unabhängig von der Komplexität der entsprechenden Maschine oder Anlage zu ermöglichen [6]. Weiterhin wird die sinnvolle Existenz einer Produktvariante auf der Grundlage der zukünftigen Anforderungen des Marktes analysiert.

Es gibt viele Ansätze des Variantenmanagements in der Literatur. Die Unternehmen erkennen das Problem und die beschriebenen vorhandenen Ansätze. Jedoch zögern viele Unternehmen mit einer hohen Produktvielfalt bei der Einführung dieser Ansätze, da diese umfangreiche Vorbereitungen und penetrative Änderungen hinsichtlich der Systemarchitektur, Datenmigration des laufenden Systems, Flexibilitätsverlust oder zusätzliche Mitarbeiterschulung erfordern. In vielen Fällen ist die Implementierung dieses Ansatzes mit einem hohen finanziellen Aufwand aufgrund z. B. der Begleitung der Implementierung durch ein Beratungsunternehmen verbunden.

Daher ist ein praktischer Ansatz, der in kleinen Schritten implementiert und von dem Unternehmen selbst durchgeführt werden kann, zu entwickeln. Dieser Ansatz kann auch als Vorbereitung für die Implementierung anderer Ansätze in der nächsten Produktgeneration benutzt werden. Der im Folgenden beschriebene Ansatz besteht aus einer Konfiguration des Produktdatenmodells mit Hilfe einer Referenzproduktstruktur, um den Variantenentstehungsprozess zu unterstützen.

4. Variantenerstellungsprozess mit Hilfe der Referenzvarianten

Die Referenzproduktstruktur unterstützt den Konstrukteur dabei, die richtigen Daten für die Realisierung der neuen Anforderungen zu finden und kann als Grundlage für das Speichern des Wissens in einem Wissensspeicher dienen. Die Referenzproduktstruktur kann mit Hilfe der Gemeinsamkeitsanalyse der vorhandenen Produkte abgeleitet werden [7]. Das ideale Produktportfolio entfaltet sich dabei aus nur einer Referenzproduktstruktur. Da dieses Ideal sehr selten in der Praxis zutrifft, werden Produkte mit einem hohen Anteil an gleichen Komponenten in einer bestimmten Produktfamilie gruppiert. Deshalb ist es sinnvoll, eine Referenzproduktstruktur für eine bestimmte Produktfamilie zu definieren.

Innerhalb einer Gemeinsamkeitsanalyse, müssen mehrere typische Produkte des Produktportfolios des Unternehmens in Betracht gezogen werden. Die Produktstrukturen dieser Produkte sind genauestens zu analysieren. Identische oder ähnliche Bauteile/Baugruppen sind in der gleichen Position innerhalb der Struktur markiert. Hierbei wird zwischen Bauteilen und Baugruppen unterschieden, die:

- exakt gleich sind. Sie werden als Standards innerhalb des Unternehmens oder zumindest innerhalb der Produktfamilie deklariert.
- zur Standardoption und/oder Standardanpassung gehören.
- als kundenindividuelle Lösung gelten.

Das Ergebnis ist eine Produktstruktur, die alle strukturellen Positionen der vorhandenen Bauteile und Baugruppen beinhaltet. Diese Produktstruktur wird als Referenzproduktstruktur der betreffenden Produktfamilie festgelegt.

Innerhalb einer Referenzproduktstruktur können Referenzvarianten definiert werden. Eine Referenzvariante ist eine mit Bauteilen/Baugruppen bzw. Lösungen ausgefüllte Referenzproduktstruktur und kann auf der Basis der vorhandenen Bauteile/Baugruppen innerhalb einer Produktfamilie festgelegt werden. Die Gruppierung der Produkte in die Produktfamilien hängt sehr stark von dem Anwendungsfall ab. Deshalb kann es erforderlich sein, mehrere Referenzvarianten innerhalb einer Produktfamilie zu definieren. Diese Referenzvarianten besitzen die gleiche Struktur, jedoch unterscheiden sie sich in ihrer Funktionalität und/oder Größe. Da Konstrukteure in Produktfunktionalitäten denken, können sie die geeignete Referenzvariante finden, die die neuen Anforderungen erfüllt.

Alle Varianten werden aus einer bestimmten Referenzvariante abgeleitet. Alle Bauteile oder Baugruppen mit der gleichen Funktion werden in der gleichen strukturellen Position innerhalb der Referenzvariante platziert.

Die Abhängigkeiten zwischen Produktvariante, Referenzvariante und ihrer Struktur werden bei der Beschreibung der Anforderungen festgelegt. Eine bestimmte Referenzproduktstruktur stellt bestimmte Produktanforderungen dar. Die Anforderungen einer Referenzvariante sind durch den Unterschied zu den Anforderungen der entsprechenden Referenzproduktstruktur beschrieben. Dies gilt ebenso für die Produktvariante, deren Anforderungen als ein Unterschied zu der entsprechenden Referenzvariante beschrieben sind (siehe Abb. 2).

Um die Referenzvariante und ihre Struktur zu benutzen, sollte ein standardisierter Prozess der Variantenerstellung definiert werden. Diese umfasst die Verantwortlichkeiten für Datenänderung, wobei eine Änderung der Struktur auf alle Fälle vermieden werden muss. Eine Forderung nach Änderung der initialen Struktur muss genauestens von einem erfahrenen Mitarbeiter geprüft werden, der die erforderliche Kompetenz mitbringt. Die unvermeidliche Anpassung der Bauteile oder Baugruppe muss nicht nur unter dem Konstruktionsaspekt untersucht werden, sondern auch im Hinblick auf Fertigung und Montage des Produkts. Deshalb ist es wichtig eine verantwortliche Person für jede Position innerhalb der Referenzproduktstruktur zu benennen, die über die Genehmigung des Bedarfs nach Änderung entscheidet.

Da Bauteile und Baugruppe innerhalb der Referenzvariante gespeichert sind, kann darüber hinaus eine Produktvariante einfach aus der Referenzvariante mit einem Konfigurationsvorgang abgeleitet werden (Abb. 3).

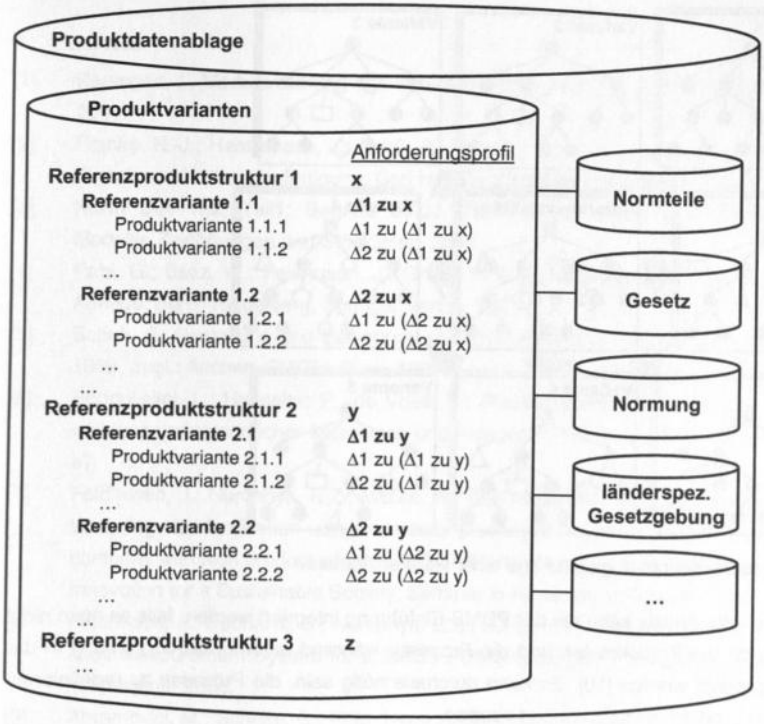


Abb. 2: Referenzvarianten innerhalb eines Produktdatenmodells

5. PDMS Benutzung

Die Gesamtverwaltung von Prozess- und Produktdaten wird in einem Unternehmensspeicher umgesetzt, der alle Prozesse und Daten mit entsprechenden Referenzierungen beinhaltet. Dieser Unternehmensspeicher ist ein Schlüsselelement, um eine Produktlebenszyklusmanagement-Strategie (PLM-Strategie) zu unterstützen.

PLM ist eine wissensbasierte Unternehmensstrategie für alle Prozesse und deren Methoden bezüglich der Produktentwicklung von der ersten Produktidee bis zum Recycling [8]. Eine PLM-Strategie hat den Zweck, die integrierte Verwaltung der Produkte innerhalb des gesamten Lebenszyklus zu unterstützen. Eine zentrale Komponente der IT-Umgebung für die PLM-Unterstützung ist ein logisch integriertes und vernetztes Produktdatenmodell [9]. Die Implementierung dieser Strategie erfordert den Einsatz von Produktdatenmanagementsystem (PDMS).

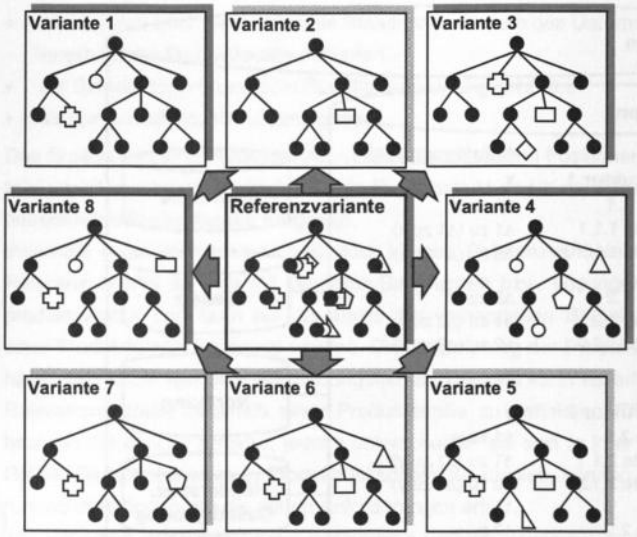


Abb. 3: Produktvariante abgeleitet aus einer Referenzvariante

Der präsentierte Ansatz kann bei der PDMS-Einführung integriert werden, falls es noch nicht geschieht, da die Produktdaten und die Prozesse während einer PDMS-Einführung in der Regel angepasst werden [10]. Es kann durchaus nötig sein, die Prozesse zu redefinieren, bevor sie in Workflows implementiert werden.

Die Erstellung einer Produktvariante in einem PDMS kann durch die Anwendung der Konfigurationsregeln auf eine Referenzvariante geschehen [7]. Die Metadaten der Bauteile/Baugruppen beinhalten auch die Beschreibung der Anforderungen.

6. Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt einen Ansatz vor, eine Referenzproduktstruktur zu implementieren, mit dem Ziel, den Variantenerstellungsprozess innerhalb eines Unternehmens mit einer hohen Produktvielfalt zu unterstützen. Ein Produktdatenmodell, das die Produktdaten mit ihren Referenzierungen untereinander beinhaltet, und ein Variantenerstellungsprozess sind mit Hilfe eines Unternehmensspeichers integriert, der die Basis für die Implementierung innerhalb eines PDMS bildet.

7. Literatur

[1] Baumgart, I., Modularisierung von Produkten im Anlagenbau. Aachen, RWTH, Diss., 2004.

[2] Franke, H.-J.; Hesselbach, J.; Huch, B.; Firchau, N.L.; Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2002.

[3] Norm DIN 199, Teil1: Begriffe 03.02. Technische Produktdokumentation: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten, 2002.

[4] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.H.: Konstruktionslehre - Grundlagen, 7. Auflage. Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2007.

[5] Schuh, G, Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989, Zugl.: Aachen, RWTH, Diss., 1989.

[6] Bongulielmi, L.; Henseler; P., de Vries, T.: Produktstrukturierung in der Auftragsabwicklung variantenreicher Maschinen und Anlagen, in eDM-Report Nr. 4, 2005, p. 44-47.

[7] Feldhusen, J.; Nurcahya, E.Z.; Macke, N., Gebhardt, B.:A pragmatic approach of introducing standardization using reference product structure for existing products in a company with high product variety , 16th CIRP International Design Seminar: Design & Innovation for a Sustainable Society, Seminar in Kananaskis, Canada, 2006

[8] Feldhusen, J.; Gebhardt, B.; Nurcahya, E.Z., Bungert, F.: "Development of a Performance Measurement System for a SME's PDMS-Capability", TMCE-Symposium 2006 in Ljubljana, 2006.

[9] Abramovici, M.; Schulte, S.: PLM: Neue Bezeichnung für alte CIM-Ansätze oder Weiterentwicklung von PDM? In Konstruktion 1/2-2005, p. 64-75.

[10] Feldhusen, J.; Gebhardt, B.; Nurcahya, E.Z.; Macke, N.: "Das unternehmensindividuelle Produktdatenmodell als Voraussetzung einer erfolgreichen PDMS-Einführung – Ein Erfahrungsbericht", 2. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2004, Saxoprint, Dresden 2004, p. 81-89.

Optimierungspotenzial von RP gefertigten Urmodellen

Daniel Sohn, Karl-Heinz Grote, Frank Engelmann
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Abstrakt

Der zunehmende Konkurrenzdruck an den internationalen Märkten verkürzt die Produktlebenszyklen enorm. Hinzu kommt die Ressourcenknappheit, der viele Firmen unterliegen. Deshalb müssen neue Wege gefunden werden, die Produktentwicklungszeiten und die Kosten zu minimieren und die Qualität der Produkte zu maximieren. Einen Beitrag hierzu kann die richtige Anwendung der Rapid Prototyping (RP) Technologien zur Herstellung von nahezu marktreifen Produkten sein. Mit Hilfe dieser Funktionsmodelle können verschiedenste Fehlerquellen des späteren Serienprodukts frühzeitig erkannt und ausgeräumt werden.

In diesem Beitrag wird auf die Nachbearbeitung eines Urmodells als Vorbereitung für das Vakuumgießen eingegangen, wobei das Urmodell mit dem RP-Verfahren PolyJet™ (Objet Eden330) gefertigt wird. Rapid Prototyping Modelle weisen ganz spezifische Merkmale auf, die bei dem späteren Produkt unerwünscht sind, aber durch den Abformvorgang übertragen werden. So ist zum Beispiel der Treppenstufeneffekt in Aufbaurichtung auf dem Modell vorhanden und wird durch die Silikonform auf das Endmodell abgebildet. Daher ist es sinnvoll, schon das Urmodell so gut wie möglich zu fertigen und auch nach der Fertigung zu bearbeiten. Dadurch verringert sich der Nachbearbeitungsaufwand des Modells nach dem Gießprozess erheblich. Dazu können verschiedene Strategien angewendet werden, die aber in Abhängigkeit von dem RP-Verfahren und damit von den verarbeiteten Materialien differieren müssen. Das hier verarbeitete Material ist das FullCure720.

Es wurden verschiedene Verfahren untersucht die Modelloberfläche nachzubearbeiten, um eine möglichst glatte Oberfläche zu erhalten. Dazu zählen das Mikrostrahlen mit Glas und Korund, sowie das Strahlen mit geschredderten Nussschalen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine quantitative Bearbeitungsstrategie zur Verbesserung der Oberflächenqualität eines mit der Objet Eden330 gefertigten RP-Urmodells.

1. Einleitung

Die zunehmende Globalisierung der Wirtschaft birgt große Chancen, aber auch viele Risiken für die Industrie. So werden neue Absatzmärkte erschlossen und im gleichen Moment stellt sich die Industrie auch neuen Konkurrenten. Um sich gegen diesen hohen Konkurrenzdruck durchsetzen zu können, stellen die Firmen ihre Produktion nach folgenden Kriterien um [1]:

- Erhöhung der Variantenvielfalt,
- Kürzer werdende Innovationszyklen und Produktentwicklungszeiten,
- Steigender Termin- und Preisdruck,
- Erhöhte Qualitätsanforderungen an die Produkte,
- Steigende Komplexität der Produkte,
- Erhöhte Anforderungen an eine ressourcenschonende und umweltgerechte Fertigung.

Andererseits ist es erforderlich, die Markteinführungszeiten („time to market") auf den internationalen Märkten so kurz wie möglich zu gestalten, um die Sicherung und den Ausbau von Marktanteilen und somit die Festigung der Wettbewerbsposition zu gewährleisten. Ein großes Zeiteinsparungspotential bietet hier die Produktentwicklungsphase. Denn die Phasen vor der Markteinführung können als einziges die Markteinführungszeit positiv beeinflussen. Eine Möglichkeit diese Verkürzung der Produktentwicklungszeit zu erreichen, ist die Anwendung von schnellen Fertigungsverfahren zur Herstellung von Prototypen. Dadurch kann ein wesentlicher Beitrag zur Verkürzung oder gar zur Vermeidung von zeitaufwendigen Iterationsschritten erreicht werden [2].

Im Rapid Prototyping können grundsätzlich zwei verschiedene Prinzipien zur Modellgenerierung unterschieden werden. Das Erste ist die abtragende Modellgenerierung. Hierbei werden zum Beispiel durch Fräsen oder Schleifen PU-Schäume verarbeitet. Durch CNC-, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC: High Speed Cutting) sowie Laserbearbeitung werden metallische Werkstoffe bearbeitet. Bei der generativen Fertigung wird der Werkstoff nicht abgetragen, sondern aufgetragen. Das Modell wird aus einem formlosen pulverisierten oder flüssigen bzw. formneutralen Material, wie Bänder oder Draht, aufgebaut. Das digitale 3D-Modell wird zuvor von einem Computer in dünne Schichten zerlegt. Diese virtuellen Schichten sind genau so stark wie die von der Rapid Prototyping-Maschine (RP-Maschine) generierten Schichten. Dadurch kann die RP-Maschine das Modell generativ aufbauen. Dieser Vorgang des digitalen Zerlegens in Schichten wird „Slicen" genannt [3].

Unterbegriffe des Rapid Prototypings sind das Rapid Tooling (RT) und Rapid Manufacturing (RM). Dabei wird die RP-Technologie genutzt, Konstruktionen aus Serienwerkstoffen oder serienähnliche Werkstoffen herzustellen. Während im Rapid Tooling eine Form für erstellt wird, kann mittels Rapid Manufacturing das Serienteil direkt mit der RP-Anlage gefertigt werden.

Das Rapid Tooling ist in das Soft Tooling und Hard Tooling untergliedert. Soft Tooling sind die Anwendungen, bei denen ein Urmodell mit einer RP-Anlage gefertigt wird und durch einen Abformvorgang eine Form hergestellt wird. Dabei besteht die Form aus einen Silikon oder einem anderen Polymer. Beim Hard Tooling hingegen besteht die Kavität aus einem verschleißfesteren Material [4].

Das hier betrachtete RT-Verfahren soll das Vakuumgießen sein, wobei der Prototyp zu erst am CAD-System erstellt und anschließend mit einer RP-Anlage gefertigt wird. Dieses Modell ist das Urmodell für die Formerstellung. Der Werkstoff der Form ist ein additiv vernetzendes Silikon. Dies hat den Vorteil, dass die Form flexibel bleibt, so dass die Entformung sehr erleichtert wird. Außerdem bildet das Silikon Formen sehr detailgetreu ab und hat einen geringen Schwund. Die hier benutzte RP-Anlage ist eine Objet Eden330 von Objet Geometries Ltd. Diese Anlage benutzt, dass durch die Firma patentierte Polyjet-Verfahren. Dabei wird, ähnlich einem Tintenstrahldrucker, ein Photopolymer durch 4x92 piezogesteuerte Düsen gesprüht und anschließend durch UV-Licht ausgehärtet.

Die Maßgenauigkeit genau wie die Oberflächenbeschaffenheit des RP-Modells sind für die weitere Prozesskette und die Qualität des Endproduktes von entscheidender Bedeutung. Falls die Maßgenauigkeit und die Oberflächenqualität nicht ausreichend sind, so müssen Nachbearbeitungen durchgeführt werden, um die Mängel zu beseitigen. Diese oftmals von Hand durchzuführenden Arbeiten sind meist zeitaufwendig und dadurch recht kostenintensiv. Das hier betrachtete RP-Verfahren der Firma Objet Geometries Ltd. besitzt ebenfalls diese Charakteristika, wie zum Beispiel den Treppenstufeneffekt in Aufbaurichtung. Nachfolgend wird die Oberflächenrauheit solcher Modelle untersucht und Wege zu Verbesserung der Situation gesucht.

2. Untersuchung des Modells

Das RP-Modell wird zu erst auf die Oberflächengüte untersucht werden, um die Ausgangssituation zu konstatieren. Dazu wurde ein Probekörper gefertigt, welcher ein Würfel mit einer Kantenlänge von 25 mm ist. Dieser Würfel wurde auf der Objet Eden330 gefertigt. Die Oberfläche des Würfels wurde anschließend optisch und taktil vermessen. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die Oberflächenbeschaffenheiten des Würfels. Insgesamt gibt es zwei verschiedene R_z-Werte, weil sich die Oberflächenrauhigkeit in Aufbaurichtung, also in z-Richtung, vehement von den Werten in x- bzw. y-Richtung unterscheidet. Der dafür verantwortliche Treppenstufeneffekt tritt bei vielen RP-Anlagen in Aufbaurichtung auf. Es wurden aber nur die R_z-Werte berücksichtigt, die einen genauen Einblick über die Rauhigkeit geben. Dieser R_z-Wert ist der, der senkrecht zu den Rillen (Stufen) liegt und somit wesentlich größer ist als der Wert, der in Richtung der Rille gemessen wird. Wie in Abbildungen 1 zu erkennen ist, kann die Deckfläche mit R_z=44 µm als glatt beschrieben werden. Die Seitenflächen hingegen sind sehr rau und weisen einen hohen R_z-Wert von R_z=115 µm auf. Somit sind die Seitenflächen ca. um den Faktor 2,5 rauer. Dieser große Unterschied zwischen den Oberflächenrauhigkeiten der Deckfläche und den Seitenflächen kann mit der Wirkweise der RP-Anlage erklärt werden. Denn die Düsen spritzen bei der Fertigung einer Schicht den flüssigen Kunststoff auf das Modell auf. Die Auftragdicke beträgt dabei ca. 20 µm. Anschließend

wird mit einer Rolle diese Schicht auf 16 µm eingeebnet. Die glatte Oberfläche der Rolle wird dadurch auf das „Spiegelbild", die RP-Modelloberfläche, abgebildet. Die Seiten hingegen werden nicht mechanisch verfestigt oder eingeebnet, was zur Folge hat, dass diese Bereiche eine wesentlich schlechtere Oberflächenqualität besitzen. Außerdem drückt die Rolle das überflüssige Material zu den Seitenrändern, was noch zusätzlich die Qualität der Oberfläche der Seitenflächen verschlechtert.

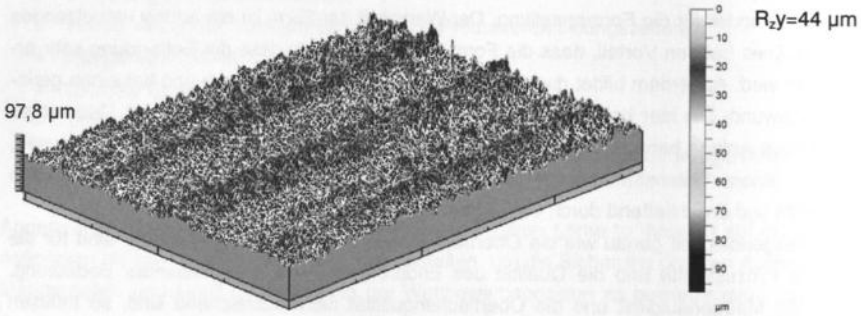


Abbildung 1: Oberseite des Versuchwürfels (Ausschnitt: 2 mm x 2,65 mm)

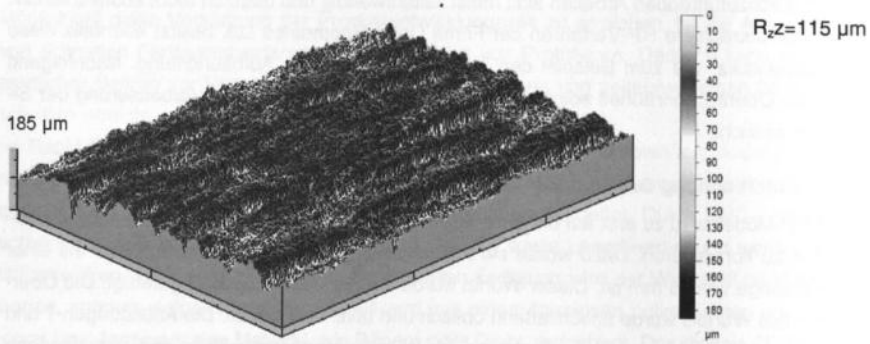


Abbildung 2: Seitenfläche des Versuchwürfels (Ausschnitt: 2 mm x 2,65 mm)

So unterschiedliche Oberflächenrauhigkeiten sollten auch mit verschiedenen Bearbeitungsstrategien nachbearbeitet werden. Denn die Deckfläche muss nicht erst mit groben Korn geschliffen werden, wohingegen die Seitenflächen mit groben Korn bearbeit werden sollten, um die hohen Rauhigkeiten abzutragen. Das bedeutet, dass speziell diese Seitenflächen nachbearbeitet werden müssen.

3. Versuche zur Verbesserung der Oberflächenrauhigkeit

Es gibt verschiedene Möglichkeiten ein Kunststoffbauteil so nachzubearbeiten, dass eine glatte (geschliffene) oder sehr glatte (polierte) Oberfläche entsteht. Unterschiedliche Nachbearbeitungsschritte sollten hierbei angewendet werden, um den maximalen Erfolg zu gewährleisten. Bei einer so hohen Rauhigkeit von R_z=115 µm ist es falsch, gleich die Oberfläche polieren zu wollen. Beim Polieren wird die Oberfläche schließlich plastische verformt und soll zu einer glatten Oberfläche fließen. Grundsätzlich sollten mehrere Bearbeitungsverfahren angewendet werden, da jede Nachbearbeitung nur einen bestimmten Fortschritt hinsichtlich der Oberflächenverbesserung schafft. Folgende mechanische Bearbeitungsverfahren sind möglich [7]:

- Schleifen,
- Strahlen,
- Polieren und
- Entgraten.

In der Literatur sind Beispiele zu finden, in denen die Oberfläche eines RP-Werkstückes durch Strahlen verbessert wurde [5]. Dort wurde mit Glas gestrahlt und eine Verbesserung der Oberflächenrauhigkeit erreicht. Ein baugleiches Modell wurde in diesem Beispiel von Hand nachgeschliffen und der R_a-Wert von dem glasgestrahlten Bauteil mit dem geschliffenen verglichen. Das glasgestrahlte Modell ist ca. um den Faktor 5 schlechter als das geschliffenen Modells. Der Vorteil des Strahlens gegenüber dem Schleifen liegt in der Bearbeitungszeit, da das gestrahlte Bauteil wesentlich schneller fertig gestellt werden kann. Außerdem können auch Stellen, zum Beispiel kleine Vertiefungen in der Oberfläche am Modell, erreichen werden, welche für Schleifpapier unerreichbar sind. Neben Glas kann auch mit Korund, Nussschalen oder Kunststoff gestrahlt werden. Das Strahlen verbessert die Oberflächenrauhigkeit nur bis zu einem bestimmten Punkt. Dann müssen entweder die Prozessparameter neu eingestellt werden oder aber ein neues Bearbeitungsverfahren wie zum Beispiel das Polieren angewendet werden.

Aus diesem Grund, soll dieses Verfahren genauer auf die Anwendbarkeit der Oberflächenrauheitsverbesserung bei RP-Modellen untersucht werden. Die folgenden Versuche sollen klären, welche Prozessparameter die beste Oberflächenrauhigkeit erzeugen.

3.1. Versuchsplanung

Der erste Schritt bei der statistischen Versuchsplanung ist das präzisieren der Versuchsfrage [6]. Dabei soll geklärt werden, welche Ergebnisse zu erwarten sind und welche Einflussgrößen es gibt. Die Zielgröße und Messgröße sind ebenfalls zu definieren.
Die zu beantwortende Versuchsfrage ist:
Wie müssen die Einflussgrößen verändert werden, damit die Oberflächenrauheit minimiert wird?
Aus dieser Fragestellung geht hervor, dass die Einflussgrößen sehr genau abgegrenzt werden müssen. Die Einflussgrößen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Auflistung der Einflussgrößen (gegliedert nach der Signifikanz)

als signifikant angenommen	als nicht signifikant angenommen
Strahlzeit	Temperatur
Strahldruck	Luftfeuchte
Strahlmittel	Probenalter
Winkel zwischen Strahlmittel und Versuchsprobe (konst. 90°)	etc.
Entfernung zwischen Strahlgut und Düse (konst. 100 mm)	
geometrische Oberfläche der Versuchsprobe (ebene Fläche: 50 mm x 50 mm)	

Natürlich gibt es noch weiterer Einflussgrößen, die aber alle als nicht signifikant angesehen werden und darum nicht weiter aufgeführt sind. Die Einflussgrößen, die variiert werden, sind die Strahlzeit, der Strahldruck und das Strahlmittel. Die anderen Einflussgrößen werden konstant gehalten.
Die Zielgröße ist die Oberflächenrauheit, welche durch die Messgröße R_a quantifiziert wird.

3.2. Versuchsplan

Während der Versuchsplanung werden die Einstellwerte (Stufen) für die Faktoren bestimmt. Hier soll die Strahlzeit und der Strahldruck in 2 Stufen variiert werden. Das Strahlmittel hingegen besitzt 3 Stufen - Glas, Korund und Nussschale. Für 2-stufige Versuchspläne ist es wichtig die Parameter in einem sinnvollen Bereich anzugeben. Dabei ist zu beachten, dass bei wenig Vorkenntnissen ein großer Stufenabstand und bei guten Vorkenntnissen ein kleiner Stufenabstand sinnvoll ist und der kleinste Stufenabstand muss mindestens die zweifache Einstellgenauigkeit aufweisen [6].
Die sich daraus ergebenen Faktoren und Stufenabstand sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Faktoren und ihr Stufenabstand

Stufe	Strahldauer	Strahldruck	Strahlgut
1 (-)	0,5 min.	1,5 bar	Glas
2 (+)	2 min.	4,5 bar	Korund
3 (0)	-	-	Nussschalen

So ergibt sich ein Versuchsplan mit 12 Versuchen, die randomisiert werden, also in einer zufälligen Reihenfolge abgearbeitet werden, um die zufällig auftretenden Einflussfaktoren weitgehend zu minimieren.

3.3. Versuchsdurchführung und Auswertung

Für die Versuchsdurchführung wurde ein Probekörper hergestellt, der stehend in der Objet Eden330 gefertigt wurde. Die senkrechte Fertigung war nötig, damit die Seitenflächen die hohe Oberflächenrauhigkeit aufweisen. Abbildung 3 zeigt diesen Versuchkörper, der nach der Fertigung entsprechend den Versuchsnummern in einzelne Platten zerschnitten worden ist. Diese Platten wurden anschließend unter den im Versuchsplan angegebenen Parametern gestrahlt.

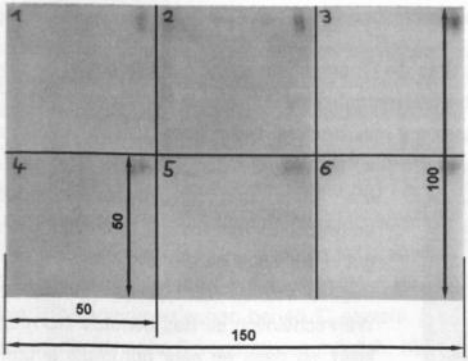


Abbildung 3: Versuchsplatte

Die Parameter der weiteren Einflussgrößen wurden konstant gehalten. Die Strahlstrategie bestand darin, dass je Durchgang sechs Bahnen horizontal und anschließend sechs Bahnen vertikal gestrahlt worden sind. Dies wurde bis zum Ende der Strahldauer getan. Durch diese Strategie soll ein gleichmäßiger Abtrag bzw. Einebnung der Oberfläche angestrebt werden.

3.4. Auswertung

Die Messgröße zur Bewertung der Oberflächenrauheit ist der R_a-Wert, der Normkonform bestimmt wurde. Es wurden jeweils drei Messungen der Rauhigkeit R_a vorgenommen, wovon der Mittelwert gebildet wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

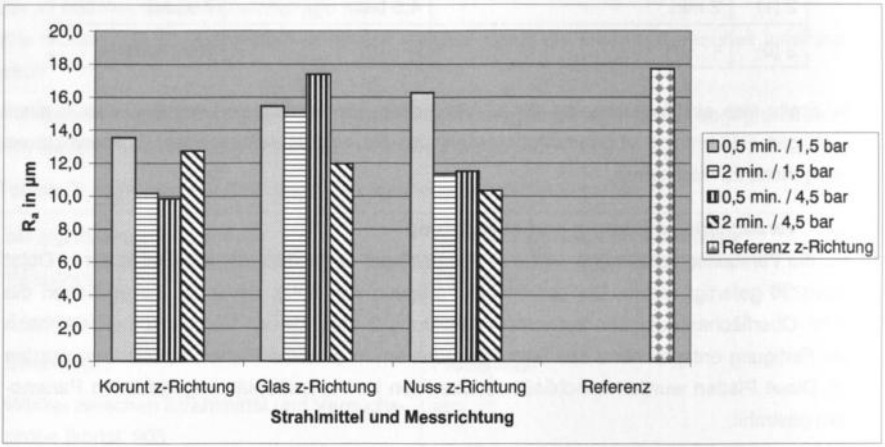


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse

s ist zu erkennen, dass das Strahlmittel Glas die Oberflächenrauheit nicht so positiv beeinusst wie Korund und Nuss. Die beste Oberflächenrauhigkeit von einem R_a-Wert von 12±0,3 µm wird bei 4,5 bar und einer Strahldauer von 2 min. erreicht. Unter dem Lichtmikroskop ist zu sehen (Abbildung 5), dass Glas mehr die Täler des Treppenstufeneffektes auswäscht. Weiterhin ist Glas nicht sehr gut in der Lage ist, die Erhöhungen abzutragen, weil es nicht abrasiv genug ist. Wahrscheinlich ist das benutzte Korn zu klein, so dass es sehr gut in die einzelnen Rauheiten eindringen kann und diese ebenfalls abträgt und damit vertieft.

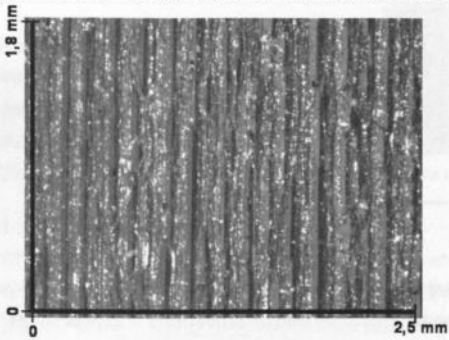


Abbildung 5:
Glas bei 4,5 bar und 0,5 min. Strahldauer

Während das Strahlen mit Korund bei den Parametern Strahldruck von 4,5 bar und einer Strahldauer 0,5 min. einen R_a-Wert von 9,8±0,3 µm erzielt, kann das Strahlen mit geschredderten Nussschale bei einem Strahldruck von 4,5 bar und einer Strahldauer von 2 min. einen R_a-Wert von 10,3±0,5 µm erzielen. Somit erzeugt das Strahlen mit Korund die beste Oberflächenrauhigkeit bei sehr geringer Strahldauer. Dies ist durch die hohe Abrasivität begründet.

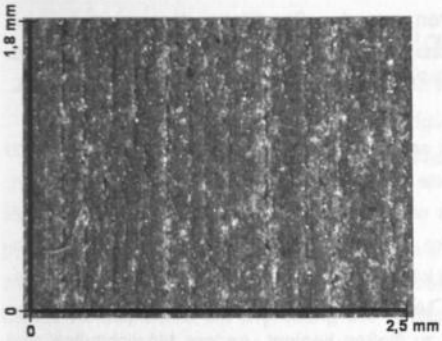


Abbildung 6: Korund bei 4,5 bar und 0,5 min. Strahldauer

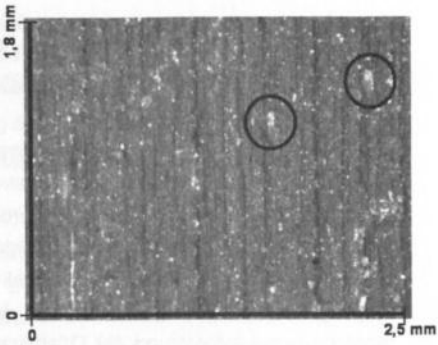


Abbildung 7: Nuss bei 4,5 bar und 2 min. Strahldauer

Durch die unterschiedliche Korngröße von Korund mit wenigen µm und den geschredderten Nussschalen mit bis zu 2 mm Korngröße kommen auch sehr unterschiedliche Oberflächen zustande, die sich nicht nur durch ihren R_a-Wert unterscheiden. Während Korund ein so kleines Korn besitzt, dass er auch in die Täler eindringt und sich dort festsetzt, schlägt das Nussstrahlmittel regelrechte kleine Löcher in die Oberfläche der Versuchsobjekte. In Abbildung 6 kann die dunkel eingefärbte Oberfläche des mit Korund gestrahlten Testobjektes sehr gut gesehen werden. Die Einschläge des Nusskorns auf der Oberfläche sind in Abbildung 7 zu erkennen. Werden nun Prototypen bei hohen Drücken nussgestrahlt, kann es dazu kommen, dass Ecken und schmale Stege abbrechen oder zumindest beschädigt werden. Darum sollte Nuss mit weniger als 4,5 bar gestrahlt werden.

Das RP-Material besitzt eine recht hohe Härte, wodurch das Strahlen erschwert wird. Bei einem duktilen Werkstoff könnte ohne das Abtragen von Material eine glatte Oberfläche erzeugt werden. Vielleicht besteht eine Möglichkeit die Oberfläche besser zu glätten darin, das RP-Matrial zu erwärmen, so dass es mit groben Korn, zum Beispiel Nuss, gestrahlt wird und dadurch nicht abtragend, sondern lediglich plastisch verformt wird. Die Wärmebeständigkeit des RP-Materials ist schon bei 48 °C erreicht. Somit ist das Erweichen des Materials schon bei relativ geringen Temperaturen möglich. Könnten nun ein flächiger Druck appliziert werden, so würden die Rauheitsberge in die Täler fließen können.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die mit der Objet Eden330 gefertigten RP-Modelle müssen noch nachbearbeitet werden, damit sie einer glatten Oberfläche genügen, um sie im Vakuumgießprozess weiter verarbeiten zu können.

Es konnte hier gezeigt werden, dass das Strahlen des RP-Modells eine nachweisbare Verbesserung der Oberflächenrauheit bringt. Ein Ergebnis ist, dass Korund nicht mit Strahlsauer von viel mehr als 30 sek. appliziert werden sollte. Ein weiteres effektives Strahlmittel sind geschredderte Nussschalen. Diese sind nicht in der gleichen Art und Weise abrasiv wie der

Korund, sondern schlagen größere Stücken aus der Oberfläche. Insgesamt ist eine Oberflächernrauheitsverbesserung durch Korund als Strahlmittel von ca. 17,7±0,3 µm auf 9,8±0,3 µm zu verzeichnen. Somit verbessert Korund die Oberflächenrauhigkeit um ca. 45%, Nuss um ca. 42% und Glas nur um 33%.

Eine weitere Verbesserung sollte angestrebt werden, um die weiteren Bearbeitungsschritte so gering wir möglich zu halten. Eine optimierte Oberflächenrauheit könnte erreichte werden, wenn das Material nicht abgetragen werden würde, sondern nur plastisch verformt würde. Dadurch würde zum Beispiel die Wandstärke kleineren Schwankungen aus dem Nachbearbeiten unterliegen. Eine solche Möglichkeit könnte das Strahlen mit geschredderten Nussschalen oder Kunststoffen bieten, wenn das Modell soweit aufgewärmt würde, bis es unter leichter Druckeinwirkung an der Oberfläche zu fließen beginnt. Andere Möglichkeiten sind das stufenweise Schleifen des Models mit anschließendem Polieren von Hand, um so die gewünschte Oberflächenrauheit zu erzielen. Außerdem könnte das Flammpolieren eine Möglichkeit darstellen, die Rauhigkeit zu verbessern. Diese drei Möglichkeiten des Schleifens, Strahlen eines erwärmten Modells und des Flammpolierens werden in weiteren Versuchsreihen untersucht.

5. Literaturangaben

[1] Kaschka, U.: Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid Tooling-Prozeßketten, Shaker Verlag, 1999

[2] Langen, M.: Einsatz des Rapid Prototyping und Rapid Tooling im Rahmen eines Simultaneous Engineering in der Spritzgießverarbeitung, Aachen: Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 1998

[3] Krause, F.-L, Franke, H.-J., Gausemeier, J., (Hrsg.): Innovationspotenziale in der Produktentwicklung, Berliner Kreis, Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung e.V., München ; Wien: Hanser, 2007

[4] Rosochowski, a., Matuszak, A.: State of the Art: Rapid Tooling, Journal of Materials Processing Technology 106, 2000, page 191-198

[5] Gebhardt, A., Rapid Prototyping: Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung, 2., völlig überarbeitete Auflage, München Wien: Carl Hanser Verlag, 2000

[6] Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung, 2., stark überarbeitete Auflage, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986

[7] Müller, K.-P.: Praktische Oberflächentechnik: Vorbehandeln - Beschichten - Beschichtungsfehler - Umweltschutz, 4., überarbeitete Auflage, Braunschweig / Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2003

Kooperatives zweihändiges Interaktionsschema für virtuelle Bedienelemente

Thanh Nguyen Doan, Wolfgang Steger, Ralph Stelzer
Technische Universität Dresden

Kurzfassung

Im Rahmen von Forschungsarbeiten zur Anwendung der Virtuellen Realität im Produktentwicklungsprozess wird das sogenannte virtuelle Bedienkonzept entwickelt. Kerngedanke dieses Konzeptes ist die Erprobung der Bedienfunktionen virtueller Prototypen durch Verwendung von Datenhandschuhen. Mit diesen wird ein 3D- Handmodell gesteuert, das wiederum mit speziellen virtuellen Bedienelementen interagiert. Der Beitrag stellt einen Ansatz vor, mit dem auch die zweihändige Interaktion mit Bedienelementen möglich ist.

1. Einleitung

Virtuelle Realität (VR) wird zunehmend eingesetzt, um in Entwicklung befindliche Produkte und Prozesse frühzeitig und realitätsnah zu erproben. Rechnerinterne Modelle repräsentieren die Eigenschaften der Produkte immer besser. Neben Design Reviews mit Geometriemodellen gewinnen Untersuchungen an Bedeutung, die die spätere Nutzung von Produkten simulieren. Für diese Untersuchungen sind Interaktionstechniken erforderlich, um beispielsweise Bedienungs- oder Wartungssituationen bereits an virtuellen (nicht gegenständlichen) Prototypen nachzubilden und bewerten zu können [1].

Dazu sind zunächst entsprechende Geräte erforderlich, die Nutzerinteraktionen erfassen können. Für Bedienszenarios sind spezielle Handschuhe geeignet, über die Position und Orientierung der Hände sowie die Stellung der einzelnen Finger erfasst werden können. Die Handschuhe steuern ein 3D- Handmodell, das in der VR- Szene mit den dargestellten grafischen Objekten interagieren kann. Um dem Benutzer dabei keine Einschränkungen aufzuerlegen, ist von der Interaktion mit zwei Händen auszugehen, womit Objekte wie in der Realität manipuliert werden können.

Im Folgenden wird eine Definition für virtuelle Bedienelemente gegeben, über die in VR-Szenen Benutzerinteraktionen in Steuersignale für die virtuelle Maschine umgesetzt werden. Danach werden unterschiedliche Lösungsansätze für die zweihändige Interaktion in VR vorgestellt und eine Lösung beschrieben, die insbesondere den Ansprüchen der virtuellen Bedienelemente gerecht wird. Auf einige Aspekte der Implementierung wird abschließend eingegangen.

2. Virtuelles Bedienelement

Wesentlich für Maschinen und Anlagen ist die Mensch- Maschine- Schnittstelle, über die der Bediener Parameter der Maschinensteuerung verändern oder auswählen kann und Funktionen aktivieren oder deaktivieren kann. Der Bediener wirkt durch bestimmte geometrisch und funktionell angepasste Einheiten, die Bedienelemente, auf die Maschine. Beispiele für Bedienelemente sind

- Taster, Schalter,
- Stellrad, Lenkrad,
- Schalthebel,
- Touchpad.

Jedes Bedienelement erzeugt ein oder mehrere Ausgangssignale. Ein Bedienelement ist charakterisiert durch:

- Art des Ausgangsignals: analog oder diskret, kontinuierlich oder diskontinuierlich, Codierung über mechanische oder elektrische physikalische Größe
- Art der Bedienung: Berührung, berührungslose Bedienung
- Art der Rückkopplung: visuell, akustisch, Kraft-Weg
- Art der Bewegung: Freiheitsgrade, Anschläge, Schaltpunkte, Rastpositionen

Bedienelemente bestimmen maßgeblich Ergonomie, Sicherheit und Design von Maschinen. Für den Bediener sind besonders Anordnung und Gestaltung der Elemente wichtig:

- Die Anordnung wird bestimmt durch Erreichbarkeit, Häufigkeit der Benutzung, Reihenfolge der Benutzung, Vermeidung gegenseitiger Beeinflussung.
- Die Gestaltung muss die eindeutige Identifikation erleichtern; das Steuersignal muss in der geforderten Genauigkeit und Schnelligkeit generiert werden.

Innerhalb dieser Arbeit erfolgt eine Beschränkung auf manuell betätigte Bedienelemente. Gleichfalls nicht relevant sind zur Mensch- Maschine- Schnittstelle gehörende Ausgabegeräte, die Zustandsinformationen der Maschine anzeigen.

Für das virtuelle Bedienkonzept wurde das virtuelle Bedienelement definiert, welches Eigenschaften und Funktionalität eines realen Bedienelements abbildet und als geometrisches 3D-Objekt in der virtuellen Welt repräsentiert wird. Mit Datenhandschuhen kann man das virtuelle Bedienelement handhaben wie das reale (Abbildung 1).

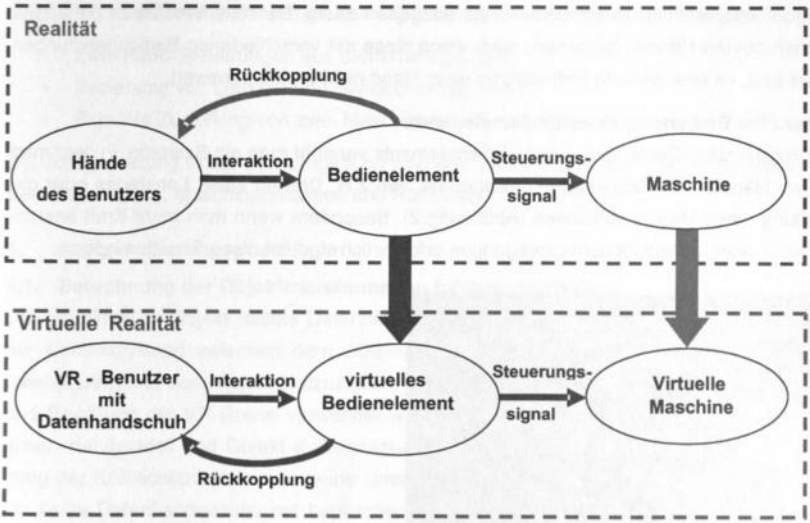


Abbildung 1: Bedienung einer Maschine über reale und virtuelle Bedienelemente

3. Zweihändige Interaktionen im VR

Nach [2] kann man manuelle Interaktionen von Menschen in einhändige (*unimanuell*) und zweihändige Interaktion (*bimanuell*) unterscheiden. Abhängig von der Rolle der Hände bei der Durchführung der Aktion bzw. der Anzahl der manipulierten Objekte trennt man weiter in symmetrische und asymmetrische zweihändige Interaktion. In einer symmetrischen Interaktion besitzen die beiden Hände eine identische Rolle und führen dieselbe Tätigkeit aus, z.B. Drehen eines Lenkrads, beidarmiges Stoßen einer Hantel. Bei der asymmetrischen Interaktion haben die Hände unterschiedliche Aufgaben und jede Hand bekommt unterschiedliche Rollenzuweisungen [3].

Da sich die Hände im Fall der zweihändigen Interaktion gegenseitig beeinflussen und unterstützen, kann man auch von kooperativer Interaktion sprechen. Wesentlich ist, dass bei der zweihändigen, kooperativen Interaktion für die Kontrolle der Hände zwei Mechanismen wirksam sind. Zum einen wird jede Hand visuell kontrolliert, zum anderen ist durch das Raumgefühl des Menschen eine präzise Positionseinschätzung der Hände relativ zueinander gegeben. Das bewirkt, dass die Interaktion mit zwei Händen u.U. mehr Genauigkeit erreicht und weniger Zeit beansprucht als die Interaktion mit einer Hand [4].

Reale Bewegungsvorgänge sind durch die direkte, zweihändige Interaktion in VR-Umgebungen unmittelbar abbildbar, wobei Datenhandschuhe eine wichtige Rolle spielen. B.Jung [5] beschreibt beispielsweise ein virtuelles Konstruieren mit Gestik und Sprache, bei dem beide Hände und Sprache für die Bearbeitung konstruktiver Aufgaben eingesetzt werden. Es gibt weitere Anwendungen von zweihändiger Interaktion für unterschiedliche Szenarien, z.B. zur Arbeit in einer Responsive Workbench [6] oder für Montageaufgaben [7].

Im Unterschied zum vorhergehenden Szenario liegt ein anderes kooperatives Schema vor, wenn man zwei Bedienelemente gleichzeitig bedienen muss. Typische Situationen sind:

- Zwei-Hand-Steuerungen aus Sicherheitsgründen,
- Bedienung von Lenkrad und Gangschaltung im Kfz,
- Parallele Zustellung von zwei Maschinenachsen (Abbildung 3).

Bei der Umsetzung in der VR- Umgebung sind hier vor allem Aspekte der Zeitparallelität von Bedienbewegung, Maschinenreaktion und Rückkopplung zu beachten.

4. Implementierungsgrundlagen

4.1. Berechnung der Objekttransformation infolge Interaktion

Um ein virtuelles Objekt mittels Datenhandschuh zu manipulieren, ist als initiales Ereignis der Kontaktzustand zwischen dem 3D-Handmodell (das synchron zum Datenhandschuh bewegt wird) und dem Objekt festzustellen. Die Software EON Studio, die zur Visualisierung und Erstellung der VR-Szene verwendet wird, bietet die Möglichkeit, bei der Kollision zwischen Handmodell und Objekt Kollisionspunkte, Kollisionsnormale und im Fall einer Bewegung des Kollisionspunktes auch seine Linear- und Winkelgeschwindigkeit bereitzustellen.
Da keine Datenhandschuhe mit haptischer Rückkopplung zur Verfügung stehen, kann die Kraftwirkung der Hände auf das Objekt nicht gemessen werden.

Die Berechnung der Objekttransformationen infolge Kollision mit dem bewegten Handmodell erfolgt unter folgenden Beschränkungen bzw. Annahmen:

- Das virtuelle Bedienelement bewegt sich nicht, bevor es die Hand kontaktiert.
- Das Gewicht von Hand und Bedienelement wird nicht berücksichtigt.
- Bei der Kollision mit der Hand wird die Bewegungsenergie von der Hand ohne Verlust als Impuls an das Bedienelement übertragen.
- Der Kontakt zwischen Hand und Objekt ist reibungsfrei und unelastisch.

Eine Hand bewegt sich mit einer Lineargeschwindigkeit $\mathbf{V_h}$ und der Winkelgeschwindigkeit: ω_h. Sie kontaktiert das Bedienelement mit den Fingergliedern an **n** Punkten: $\mathbf{P_1}$ bis $\mathbf{P_n}$.
Die Geschwindigkeit am Kontaktpunkt $\mathbf{P_i}$ beträgt

$$\mathbf{Vp_i} = \mathbf{V_{hi}} + \omega_{hi} \times \mathbf{Rp_i} \quad (1)$$

Wobei $\mathbf{Rp_i}$ der Abstand von Kontaktpunkt $\mathbf{P_i}$ zum Schwerpunkt des betreffenden Fingergliedes ist.
Unter der Annahme, dass weder Reibung noch elastische Deformation zwischen Hand und Objekt bestehen, bewegt sich der kontaktierte Punkt des Objekts nach der Kollision mit der Geschwindigkeit $\mathbf{V_{Ni}}$. $\mathbf{V_{Ni}}$ entspricht dem Anteil von $\mathbf{V_{Pi}}$ in Kontaktnormalrichtung.
Die Geschwindigkeit $\mathbf{V_{Ni}}$ kann in zwei Vektoranteile $\mathbf{V_{Ti}}$, $\mathbf{V_{Ri}}$ aufgeteilt werden. Diese beziehen sich auf den Schwerpunkt des Objekts.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das virtuelle Bedienkonzept von einem zweihändigen, kooperativen Interaktionsansatz ausgehen muss. Da stets Wechselbeziehungen zwischen beiden Händen bestehen, auch wenn diese mit verschiedenen Bedienhandlungen befasst sind, ist eine isolierte Betrachtung einer Hand nicht empfehlenswert.

Kooperative Bedienung eines Bedienelements

Unter kooperativer Bedienung eines Bedienelements versteht man ein Szenario, in dem man mit zwei Händen ein Bedienelement handhabt, wie z.B. Drehen eines Lenkrades oder die Zustellung eines Maschinentisches (Abbildung 2). Besonders wenn man mehr Kraft anwenden muss, oder größere Relativbewegungen erforderlich sind, ist diese Situation typisch.

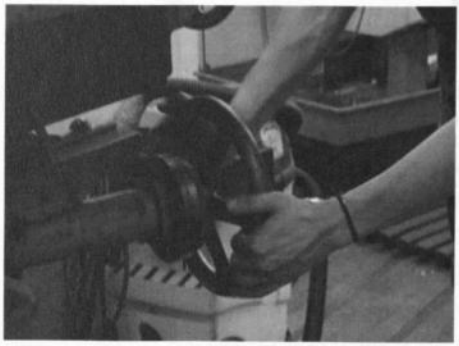


Abbildung 2: Zweihändige Bedienung eines Bedienelements

Mit Blick auf das virtuelle Bedienelement sind die Kontakte und Bewegungen beider Hände auszuwerten, um die Transformation des Bedienelementes zu ermitteln.

Kooperative Bedienung von zwei Bedienelementen

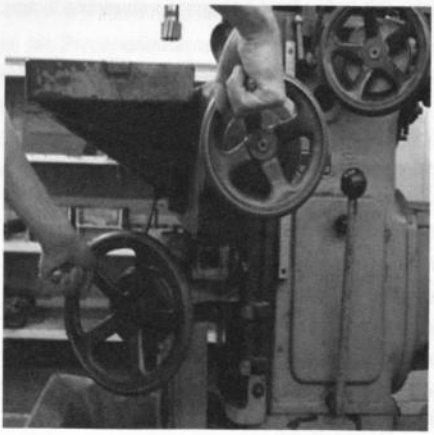


Abbildung 3: Zweihändige Bedienung von zwei Bedienelementen

Im Unterschied zum vorhergehenden Szenario liegt ein anderes kooperatives Schema vor, wenn man zwei Bedienelemente gleichzeitig bedienen muss. Typische Situationen sind:

- Zwei-Hand-Steuerungen aus Sicherheitsgründen,
- Bedienung von Lenkrad und Gangschaltung im Kfz,
- Parallele Zustellung von zwei Maschinenachsen (Abbildung 3).

Bei der Umsetzung in der VR- Umgebung sind hier vor allem Aspekte der Zeitparallelität von Bedienbewegung, Maschinenreaktion und Rückkopplung zu beachten.

4. Implementierungsgrundlagen

4.1. Berechnung der Objekttransformation infolge Interaktion

Um ein virtuelles Objekt mittels Datenhandschuh zu manipulieren, ist als initiales Ereignis der Kontaktzustand zwischen dem 3D-Handmodell (das synchron zum Datenhandschuh bewegt wird) und dem Objekt festzustellen. Die Software EON Studio, die zur Visualisierung und Erstellung der VR-Szene verwendet wird, bietet die Möglichkeit, bei der Kollision zwischen Handmodell und Objekt Kollisionspunkte, Kollisionsnormale und im Fall einer Bewegung des Kollisionspunktes auch seine Linear- und Winkelgeschwindigkeit bereitzustellen.
Da keine Datenhandschuhe mit haptischer Rückkopplung zur Verfügung stehen, kann die Kraftwirkung der Hände auf das Objekt nicht gemessen werden.

Die Berechnung der Objekttransformationen infolge Kollision mit dem bewegten Handmodell erfolgt unter folgenden Beschränkungen bzw. Annahmen:

- Das virtuelle Bedienelement bewegt sich nicht, bevor es die Hand kontaktiert.
- Das Gewicht von Hand und Bedienelement wird nicht berücksichtigt.
- Bei der Kollision mit der Hand wird die Bewegungsenergie von der Hand ohne Verlust als Impuls an das Bedienelement übertragen.
- Der Kontakt zwischen Hand und Objekt ist reibungsfrei und unelastisch.

Eine Hand bewegt sich mit einer Lineargeschwindigkeit $\mathbf{V_h}$ und der Winkelgeschwindigkeit: $\boldsymbol{\omega}_h$. Sie kontaktiert das Bedienelement mit den Fingergliedern an **n** Punkten: $\mathbf{P_1}$ bis $\mathbf{P_n}$.
Die Geschwindigkeit am Kontaktpunkt $\mathbf{P_i}$ beträgt

$$\mathbf{Vp_i} = \mathbf{V_{hi}} + \boldsymbol{\omega}_{hi} \times \mathbf{Rp_i} \quad (1)$$

Wobei $\mathbf{Rp_i}$ der Abstand von Kontaktpunkt $\mathbf{P_i}$ zum Schwerpunkt des betreffenden Fingergliedes ist.
Unter der Annahme, dass weder Reibung noch elastische Deformation zwischen Hand und Objekt bestehen, bewegt sich der kontaktierte Punkt des Objekts nach der Kollision mit der Geschwindigkeit $\mathbf{V_{Ni}}$. $\mathbf{V_{Ni}}$ entspricht dem Anteil von $\mathbf{V_{Pi}}$ in Kontaktnormalrichtung.
Die Geschwindigkeit $\mathbf{V_{Ni}}$ kann in zwei Vektoranteile $\mathbf{V_{Ti}}$, $\mathbf{V_{Ri}}$ aufgeteilt werden. Diese beziehen sich auf den Schwerpunkt des Objekts.

Der Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{V_{Ti}}$ bewirkt eine lineare Bewegung des Objekts auf der Verbindungslinie zwischen Kontaktpunkt und Objektschwerpunkt, $\mathbf{V_{Ri}}$ eine Rotation um die auf dieser Linie im Schwerpunkt stehende Achse (Abbildung 4).

Wenn zwischen Handmodell und Bedienelement an mehreren (**n**) Punkten Kontakt besteht, werden die resultierende Translation $\mathbf{O_T}$:

$$O_T = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{f} * V_{Ti} \qquad (2)$$

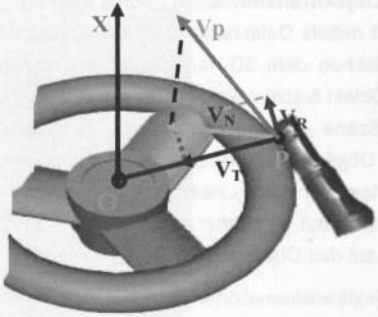


Abbildung 4: Berechnung der Objekttransformation für einen Kontaktpunkt

Die resultierende Rotation $\mathbf{O_R}$ für das Objekt wird folgt berechnet:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{|V_{Ri}|}{f * OP_i}\right) \qquad (3)$$

$$O_R = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n}\theta_i \qquad (4)$$

In (2) und (3) ist **f** die Framerate der Simulation.

Mit diesen Vektoren kann nun die Transformationsmatrix des Objektes (= Bedienelement) aktualisiert werden. Sofern ein oder mehrere Freiheitsgrade des Bedienelements mit Komponenten der Transformation übereinstimmen, wird das Bedienelement in diese Richtung oder um diese Achse bewegt.

Für die Implementierung des Konzeptes wird die Software EON Studio 5.5 mit dem EON SDK 5.0 von EON Reality mit MS Visual Studio C++ 6.0 als Entwicklungsumgebung benutzt. Um das Handmodell zu steuern, werden Datenhandschuhe von 5DT mit 14 Sensoren für Fingerkrümmung und –Spreizung angewendet.

5. Interaktionsschema

Für die Interaktion mit Bedienelementen in VR- Szenen können unter Implementierungsgesichtspunkten zwei Ansätze gewählt werden. Im ersten Fall betrachtet man die beiden Hände einzeln und berechnet im Fall einer Interaktion mit einem Bedienelement die durch die Handbewegung entstehenden Transformationen, wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Im Fall der Interaktion beider Hände mit dem gleichen Bedienelement ergäbe sich das Problem, nach den erforderlichen Berechnungen zwei Transformationen auf das Bedienelement anwenden zu müssen. Die Wirkung der Rotationen ist abhängig von der Reihenfolge der Ausführung. Diese lässt sich nicht eindeutig festlegen, was eine potentiell nicht korrekte Bewegung ergibt.

Günstiger ist der in [8] vorgeschlagene Weg, die Hände nicht mehr logisch getrennt zu betrachten. Kontaktpunkte werden unabhängig von Ihrer Zugehörigkeit zu einer der Hände einheitlich betrachtet und ergeben eine Transformation für das Bedienelement. Damit ist eine verallgemeinerte Betrachtungsweise gegebene, bei der es unerheblich ist, ob ein Bedienelement mit einer oder mit beiden Händen betätigt wird.

Eine weitere Verallgemeinerung des zweiten Ansatzes, die Hände nicht logisch zu trennen, führt zur Möglichkeit auch mit mehreren Bedienelementen zu interagieren. Dabei sind jeweils die Kontaktpunkte, die mit einem Bedienelement in Berührung sind, als separate Teilmenge zu behandeln. Die aus einer Teilmenge berechnete Transformation lässt sich dann auf das jeweilige Bedienelement anwenden. Mit diesem Ansatz können sowohl Interaktionen einer Hand mit zwei Bedienelementen (z.B. Joystick mit Schaltknopf) als auch zweihändige Interaktionen mit mehreren Bedienelementen (beispielsweise beidhändiges Führen eines Lenkrades und Betätigung des Lenkradschalters für die Hupe) behandelt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zurzeit ist die Interaktion mit Bedienelementen mit einer Hand möglich. Mit dem beschriebenen Ansatz kann die Implementierung auf zwei Handschuhe erweitert werden. Die Hinzunahme der zweiten Hand äußert sich dabei nur durch eine größere Anzahl potentiell auftretender Kontaktpunkte. Die existierenden Algorithmen und logischen Abläufe bleiben unverändert. Damit wird eine effiziente Erweiterung der Implementierung möglich.

7. Literaturverzeichnis

[1] R.Stelzer, W. Steger, Thanh Nguyen Doan, 2006. Entwicklung eines virtuellen Bedienkonzepts, in: Brökel, K., Grote, K.-H., Stelzer, R.: 4. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Shaker 2006.

[2] Guiard Y,1987. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model. The Journal of Motor Behavior, 19 (4).

[3] S. Pinho, A. Bowman, C. Maria, S. Freitas,2002: Cooperative object manipulation in immersive virtual environments: framework and techniques. VRST 2002: Hong Kong, China, page 171-178.

[4] A.Kotranza, J.Quarles, B.Lok, 2006. Mixed Reality: Are two Hand better than one ?. VRST '06, November 1-3, 2006, Limassol, Cyprus.

[5] B. Jung, S. Kopp, M.E. Latoschik, T. Sowa & I.Wachsmuth,2000: Virtuelles Konstruieren mit Gestik und Sprache. KI – Künstliche Intelligenz 2/00,Themenheft zum Schwerpunkt "Intelligente virtuelle Umgebungen", April. 2000, Seite 5-11.

[6] D.Cutler, B. Fröhlich, P. Hanrahan,1997. Two-handed direct manipulation on the Responsive Workbench. Proceedings of the '97 Symposium on Interactive 3D Graphics, pages 107-114.

[7] H. Sun, B. Hujun,2002. Two-Handed Assembly Immersive task planning in Virtual Reality. Virtual Reality (UK), 6, Seite. 11–20.

[8] K. Funahashi, T.Yasuda,S. Yokio, J. Toriwaki,. A Model for Cooperative manipula-tion of virtual object with both hands. Transactions of Information Processing Society of Japan. Vol.39, No.5(19980515) Seite. 1334-1342.

Integrierte Finite Element Analysen in CAD-Systemen – ein Vergleich

Alexander Troll, Bernd Roith, Frank Rieg
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Kurzfassung

In der Industrie findet eine Vielzahl von Finite Element Programmen Anwendung, wobei es sich sowohl um in CAD-Suiten integrierte Module, als auch um eigenständige Simulationssoftware handelt.

Es galt festzustellen, wie übereinstimmend die Ergebnisse aktueller FEA-Tools tatsächlich sind. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein nicht direkt für die Berechnung geschulter Konstrukteur die Simulationen durchführen soll. Das Hauptaugenmerk der Untersuchung lag auf dem Vergleich der Ergebnisse für vorgegebene Berechnungs-beispiele. Es sollte festgestellt werden, ob ein mit Grundkenntnissen in der FEA ausgestatteter Konstrukteur mit den Resultaten aus nur einem Programm in der Lage ist eine fundierte Aussage über die Bauteilfestigkeit zu treffen. Dabei sollte die maximale Vergleichsspannung als Bewertungsgrundlage herangezogen werden.

Die Vergleichsstudie wurde mit sechs Berechnungsprogrammen, drei integrierten FEA-Modulen und drei Standalone-Programmen, durchgeführt. Verwendet wurden eine Bauteilgeometrie, die auch analytisch berechnet werden konnte und vier praxisnahe Beispiele. Die Ergebnisse für die maximalen Verschiebungen und Vergleichsspannungen wurden auf den größten aufgetretenen Wert normiert und dann untereinander verglichen.

Es traten nicht zu vernachlässigende Unterschiede beim Vergleich der Ergebnisse auf. Da bei den normierten Spannungen Differenzen von mehr als 50% zwischen einzelnen Programmen auftraten, ist davon auszugehen, daß es ohne Durchführung von Vergleichsrechnungen mit mehren Programmen zu Fehlauslegungen kommen kann.

1. Einleitung

In der heutigen Zeit verlangt der Markt nach immer kürzeren Entwicklungszyklen für Konsum- und Investitionsgüter. Gleichzeitig sollen jedoch die Kosten für Produktion und Entwicklung innerhalb der Firmen minimiert werden. Um diese Vorgaben umzusetzen kommen immer mehr computergestützte Simulationen zum Einsatz. Diese dienen, in Form der Finiten Elemente Analyse (FEA), teils als Ergänzung zum klassischen Festigkeitsnachweis, manchmal auch als vollwertiger Ersatz. Die Simulationen sollen zusammen mit experimentellen Methoden der Verifizierung, also Prototypen- und Nullserientests die Zeit bis zur Marktreife verringern. Zweckmäßigerweise werden diese Berechnungsstudien frühzeitig im Produktentwicklungsprozess durchgeführt. Um den gewünschten zeitlichen Vorteil zu erzielen, müssen daher die Simulationen Zeit und Kosten sparend erfolgen, bei gleichzeitig hoher Ergebnisgüte und Verlässlichkeit. Dies wird in vielen Fällen durch den Einsatz von in Computer Aided Engineering Programmen (CAD) integrierten FEA-Modulen erreicht.

2. Stand der Technik

2.1. FEA und Bauteilfestigkeit

Die grundlegende Idee der Bauteilfestigkeit ist das Ermitteln der im Bauteil herrschenden Spannungen σ_i und τ_{ij} und deren Vergleich mit einer zulässigen Spannung [1]. Im Rahmen der klassischen Festigkeitsrechnung werden hierfür die auf das Bauteil wirkenden Belastungen analysiert, daraus die herrschenden Spannungen berechnet und aus diesen eine Vergleichspannung σ_V errechnet, welche zur Prüfung des Versagenskriteriums $\sigma_V \leq \sigma_{Zul}$ mit der zulässigen Maximalspannung σ_{Zul} herangezogen wird. Die Vergleichsspannung σ_V wird dabei meist über die Gestaltänderungsenergie-Hypothese nach von Mises [2] berechnet.

Die Auswertung einer FE-Analyse, geschieht ebenfalls in den meisten Fällen durch die Bewertung der maximalen auftretenden von Mises-Spannung, jedoch ergibt sich systemimmanent ein entscheidender Unterschied. Bei der klassischen Berechnung ergeben sich, basierend auf den Vorgaben und Rechenwegen, eindeutig nachweisbare und reproduzierbare Ergebnisse. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ergeben sich im Rahmen der computergestützten Festigkeitsanalyse diverse Ungenauigkeiten, aus denen sich einzig und allein der Schluß ziehen lässt, daß die erhaltenen Vergleichsspannungen nicht nur schwer reproduzierbar, sondern auch von Programminterna abhängig sind. Als grundlegendes Beispiel sei hier die Spannungsberechnung angeführt. Da die primären Ergebnisse der FEA die Verschiebungen in den Knoten sind müssen die herrschenden Spannungen aus diesen mittels eigener Routinen generiert werden. Die Ergebnisse sind abhängig vom verwendeten Modell, und den Algorithmen zur Spannungsberechnung.

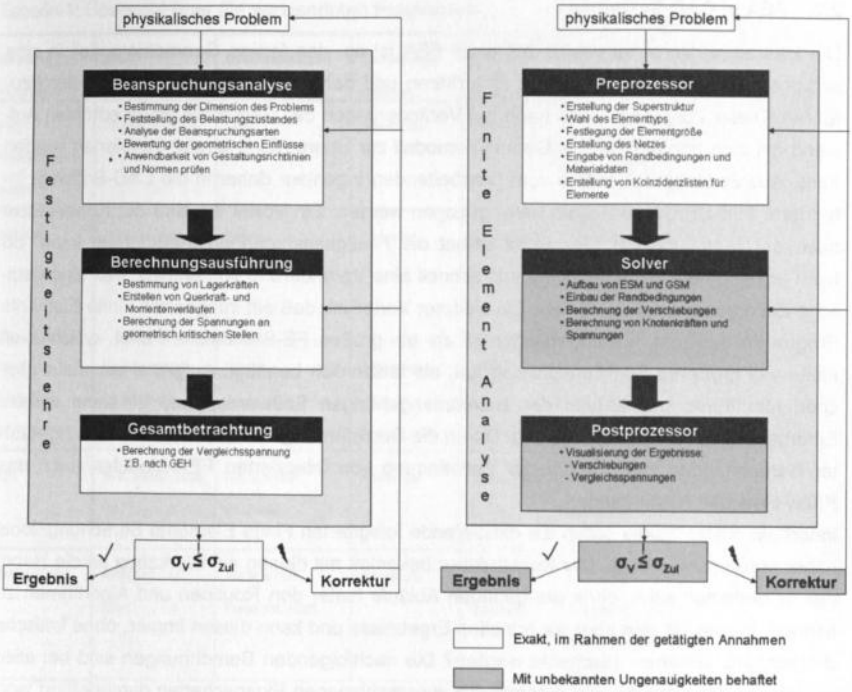


Abbildung 1: Ablauf von analytischem Festigkeitsnachweis und FEA

Um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von FE-Analysen zu steigern, gibt es verschiedene in der Literatur beschriebene Ansätze. Diese beschäftigen sich wie Kurowski [3] mit dem Einfluss der Elementordnung am Beispiel eines Elementtyps, oder mit der Gegenüberstellung verschiedener Elementgrundtypen [4]. Koch [5] stellt den Bezug zwischen dem vorliegenden CAD-Modell, dessen Vernetzung und dem zu wählenden Elementtyp dar um eine praktische Hilfestellung anzubieten. Eine Studie über die wichtigsten Eingangsparameter und wie diese zu dokumentieren sind, findet sich bei Maus [6].

Trotz dieser Hilfen bei der Erstellung und der Durchführung der Analyse bleibt das wichtigste Kriterium für die Richtigkeit eines Festigkeitsnachweises auf Basis einer FEA die Vergleichsspannung nach von Mises.

2.2. FEA in CAD-Systemen

Die klassische Vorgehensweise bei einer FEA ist es, das fertige Geometriemodell in eine entsprechende Spezialsoftware zu importieren und darin die Festigkeitsrechnung durchzuführen. Diese Vorgehensweise kann bei Veränderungen der Geometrie einen erhöhten Aufwand mit sich bringen, da das Geometriemodell zur Überprüfung erneut transferiert werden muß. Aus Zeitaspekten sollten vom bearbeitenden Ingenieur daher in die CAD-Software integrierte Finite Element Pakete herangezogen werden. Ein Vorteil ist, daß der Konstrukteur nach der Erstellung der Geometrie selbst die Festigkeitsrechnung durchführen kann. So kann er bei einem negativen Ergebnis schnell eine Veränderung vornehmen, was eine deutliche Zeitersparnis mit sich bringt. Ein weiterer Vorteil ist, daß ein integriertes Finite Elemente Programm meistens kostengünstiger ist als ein großes FE-Standalone-Paket, welches oft einen viel größeren Funktionsumfang hat, als tatsächlich benötigt. Aufgrund der meist gleichen Menüführung innerhalb der zusammengehörigen Softwaremodule ist keine weitere Einarbeitung in die Bedienung nötig. Durch die Durchführung vorher teils extern durchgeführter Berechnungen steigt durch die Verwendung von integrierten FEA-Modulen auch das Know-How des Ausführenden.

Innerhalb dieser Studie sollen die existierende integrierten Finite Elemente Berechungstools näher untersucht werden. Der Konstrukteur bekommt mit diesen ein Werkzeug an die Hand, das er bedienen kann, ohne die genauen Abläufe hinter den Routinen und Algorithmen zu kennen. Wie exakt sind aber die erzielten Ergebnisse und kann diesen immer, ohne kritische Betrachtung, Glauben geschenkt werden? Die nachfolgenden Berechnungen sind bei allen integrierten Modulen mit den automatisch vorgeschlagenen Eigenschaften durchgeführt worden. Dies bezieht sich z.B. auf Geometrievereinfachung, Netzeigenschaften und Solverparameter.

2.3. Übersicht über die verwendeten Programme

Bei dem vorliegenden Vergleich kamen, wie aus Tabelle 1 ersichtlich, sowohl in CAD-Systeme integrierte Simulationstools als auch reine FEA-Packete zum Einsatz. Diese Kombination wurde gewählt, um einen Vergleich der Modullösungen mit spezialisierten Anwendungen zu ermöglichen. Dafür wurden die aktuellen CAD-Suiten der Firmen PTC [7], Dassault [8] und UGS [9] ausgewählt.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Programme

Hersteller Programm	Pre- /Postprozessor	Geometrieimport	Vernetzungs-methode	Solver	Verfügbare Elementtypen	Vorgabe von Standardeinstellungen
PTC Pro/ENGINEER Wildfire 2	ProMECHANICA	Direkt	p-Methode	Intern	Tetraeder mit höherem Elementansatz	ja
UGS NX4	Modul erweiterte Simulation	Direkt	h-Metode	NX-Nastran 4.1	Lineare und quadratische Tetraeder, extrudierte Quads	ja
Dassault Systèmes Catia V5 R16	Modul Scenario for structures	Direkt	h-Methode	Intern	Lineare und quadrati-sche Tetraeder	ja
MSC	MSC.Patran 2005 R2	IGES, STEP, Parasolid	h-Methode	MSC.MARC	Lineare und quadratische Tetraeder	ja
ABAQUS Inc.	ABAQUS CAE 6.6-1	IGES, STEP, Parasolid, ACIS	h-Methode	ABAQUS Standard	Lineare und quadratische Tetraeder; weitere Typen	ja
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg Z88 V12	MSC.Patran 2005 R2, Pro/MECHANICA	Inputdateien aus Nastran Cosmos und ABAQUS	h- Methode (durch Geometrieimport)	Iterativer Solver	Lineare und quadratische Tetraeder; weitere Typen	ja

Aus dem Bereich der eigenständigen Rechenprogramme für die Durchführung von Simulationen wurden zwei Pakete als Repräsentanten ausgewählt. Dabei handelte es sich um Produkte von ABAQUS Inc. (Dassault Systèmes) [10] und der MSC Software Corporation [11]. Im vorliegenden Fall sollten diese Softwarepakete zum Abgleich mit den CAD-Modulen verwendet werden. Daher wurden bei diesen Analysen Einstellungen gewählt, die sich den integrierten Lösungen annähern. Dies bezieht sich hauptsächlich auf den Elementtyp.
Zusätzlich wurde das Open Source Programm Z88 V12, welches unter der Leitung von Herr Prof. Dr.-Ing. F. Rieg am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth entwickelt worden ist, in den Vergleich mit eingebunden [12]. Es bietet die Möglichkeit aus Pro/ENGINEER die dort erstellte Netzgeometrie einzulesen und zu berechnen.
Im weiteren Verlauf dieser Studie werden die einzelnen Programme anonymisiert und als Software 1 bis 6 bezeichnet.

3. Vergleichstudie

3.1. Aufgabenstellung

Es sollte anhand von praxisnahen Berechnungsbeispielen nachvollzogen werden, ob die verwendeten FEA-Tools Berechnungsergebnisse lieferten, die für eine qualifizierte Aussage über die Bauteilfestigkeit herangezogen werden können. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben ist das wichtigste Kriterium für die Richtigkeit eines Festigkeitsnachweises auf Basis einer FEA die Vergleichsspannung nach von Mises. Unabhängig von dem verwendeten Programm sollten Konstrukteure bei gleichen Aufgabenstellungen (Modell, Lasten und Randbedingungen) ähnliche, im Idealfall gleiche, Ergebnisse für den globalen Maximalwert von σ_V erhalten. Dies galt es zu überprüfen, denn nur so ist es möglich, daß ein Konstrukteur ohne Hintergrundwissen über die Finite Element Analyse und deren Fehlerbehaftung zu einem richtigen Ergebnis kommt. Daher sollte für die errechneten Ergebnisse keine Plausibilitätsbetrachtung durchgeführt werden.

3.2. Berechnungsbeispiele

Fünf verschiedene Beispiele wurden gewählt. Bei diesen wurden verschiedene Randbedingungs- und Lastentypen berücksichtigt. Bei der ersten Beispielgeometrie handelt es sich um einen standardisierten IP-Träger. Der Träger wurde mit einer linearen Streckenlast auf einer Endkante belastet und an der gegenüberliegenden Seite fest eingespannt. Der Balken wurde ausgewählt, da es sich um eine analytisch nachzurechnende Struktur handelt, an deren Beispiel die Abweichung zwischen FEA und klassischer Berechnung gut abzulesen ist.

Des Weiteren wurde eine Kegelspannbuchse mit anliegendem Druck und Kräften berechnet. Bei dem dritten Beispiel handelt es sich um eine Kurbelwelle bei der die Lagerung entsprechend der technischen Anwendung angesetzt wurde. Als Last wurde eine Flächenlast aufgegeben. Als weiteres Simulationsmodel wurde ein Dieselkolben unter Drucklast berechnet.

Als letztes Berechnungsbeispiel wurde ein Lüfterrad simuliert. In der Mittenbohrung des Lüfterrads ist das Festlager angebracht. Druck wurde auf jeden Flügel des Rades aufgebracht.

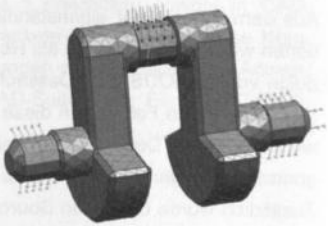


Abbildung 2: Kurbelwelle mit Lagern und Last

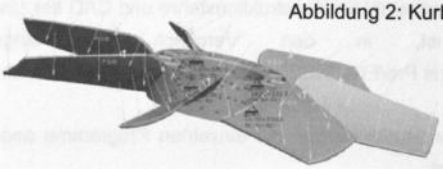


Abbildung 3: Lüfterrad mit Lagern und Lasten

3.3. Vorgehensweise

Die entsprechenden Geometrien wurden in den jeweiligen CAD-Systemen von Grund auf neu modelliert, so sollten Fehler aus der Übertragung der Modelle in ein anderes System unterbunden werden. Anschließend wurden die entsprechenden Geometrien in die Untermodule zum Simulieren übertragen, den Modellen das entsprechende Material zugewiesen, diese unter Verwendung der Standardeinstellungen vernetzt und die oben beschriebenen Randbedingungen aufgebracht. Bei den beiden Standalone-Systemen wurden die Geometrien der Berechnungsbeispiele mit Hilfe der Parasolidschnittstelle von Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 importiert. Im Fall von Z88 wurde eine mit Pro/MECHANICA erstellte Nastrandatei eingelesen und konvertiert.

Den Abschluss bildete der Berechnungsschritt. Zu den Standardeinstellungen hinsichtlich der Netzeigenschaften gehört auch die Methodik der Berechnung, d.h. ob die Simulation mit Hilfe der h-Methode oder der p-Methode durchgeführt wurde [13]. Bei den Softwarepaketen, die mit der h-Methode arbeiten, wurden die Berechnungen mit zwei verschiedenen Elementen durchgeführt. Zum einen mit einem Tetraeder mit linearen Berechnungsansatz (TET4), zum anderen mit Tetraedern mit parabolischen (quadratischen) Ansatz (TET10) mit 10 Knoten. Bei der p-Methode ist auf den Elementtyp bzw. den Polynomgrad kein Einfluss genommen worden.

3.4. Ergebnisse der Berechungen

Die von den einzelnen Programmen erzielten Werte können der Tabelle 2 entnommen werden. Es wurden für die einzelnen Berechnungsbeispiele der Elementtyp, die Anzahl der Knoten und Elemente im Modell sowie die erzielten maximalen Verschiebungen und Vergleichsspannungen normiert aufgelistet. Die Grundlage der Normierung war der Maximalwert innerhalb aller verglichenen Softwarepakete. Um die Ergebnisse besser zu veranschaulichen wurden in nachfolgenden Diagrammen 4 bis 7 die normierten Spannungen und normierten Verschiebungen aufgetragen. Abbildung 4 und 5 zeigen die Ergebnisse für lineare Elemente. Die analytischen Ergebnisse für den Balken ergaben eine normierte Verschiebung von 0.82 und eine normierte Spannung von 0.92. Die Berechnungen der FEA-Analysen zeigen Abweichungen von bis zu 50% bezogen auf die Verschiebung bei einem Mittelwert von 0.86 für alle Programme bezogen auf den Maximalwert. Bei der ermittelten Spannung rechneten alle Programme bis auf Programm 1 deutlich zu niedrig, bei einer Abweichung vom analytischen Wert zum Mittelwert von 13%. Die große Streuung innerhalb der Ergebnisse setzt sich bei den anderen Beispielen fort.

Tabelle 2: Berechnungsergebnisse für alle Geometriebeispiele

Programm	1[1]	2		3		4		5		6	
Methode	**p**	**h**	**h**	**h**	**h**	**h**	**h**	**h**	**h**	**h**	**h**
Element	**tetra**	**tet4**	**tet10**	**tet4**	**tet10**	**tet4**	**tet10**	**tet4**	**tet10**	**tet4**	**tet10**
IP-Träger											
Elemente	211	664	664	646	646	2422	2422	34864	34864	31737	31737
Knoten		272	1477	260	1423	858	4979	8442	56827	7846	52340
Versch.	1,00/1,00	0,82	1,00	0,83	0,99	0,90	1,00	0,50	1,00	0,98	1,00
v. Mises	1,00/0,48	0,65	0,40	0,60	0,88	0,69	0,36	0,71	0,85	0,81	1,00
Spannbuchse											
Elemente	1482	29051	28978	5403	5403	33220	33220	45617	45617	13787	14014
Knoten		7679	49191	2167	11792	8727	56309	11100	11100	4017	25124
Versch.	0,33/0,20	0,26	0,20	0,16	0,15	0,27	0,23	0,12	1,00	1,00	0,29
v. Mises	0,59/0,22	1,00	1,00	0,14	0,11	0,37	0,18	0,19	0,82	0,84	0,26
Kurbelwelle											
Elemente	1140	11052	11052	3897	3897	47736	47736	90309	89940	47088	123296
Knoten		2829	18423	1218	7319	11127	75744	18732	134302	10019	177520
Versch.	1,00/0,98	0,85	0,96	0,77	0,96	0,95	1,00	0,59	0,60	0,60	0,63
v. Mises	1,00/0,95	0,31	0,46	0,20	0,35	0,45	0,51	0,40	1,00	0,23	0,34
Kolben											
Elemente	3888	12261	12261	5359	5359	63272	316675	63272	63272	15070	214778
Knoten		3185	20818	1601	9950	13533	215679	13533	96341	3610	311614
Versch.	1,00/1,00	0,67	0,77	0,57	0,73	0,77	0,70	0,77	0,70	0,596	0,65
V .Mises	1,00/1,00	0,53	0,73	0,46	0,85	0,58	0,84	0,58	0,96	0,47	0,88
Lüfterrad											
Elemente	10970	17567	17567	25240	29624	130541	222783	35205	35205	49073	229613
Knoten		5890	34868	8842	59968	34495	130541	10849	65840	14608	375055
Versch.	1,00/0,80	0,27	0,89	0,38	0,97	0,53	0,90	0,35	1,00	0,42	0,90
V .Mises	1,00/1,00	0,26	0,85	0,20	0,77	0,77	0,91	0,38	0,94	0,43	0,94

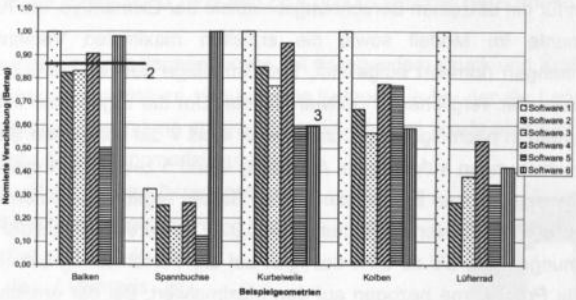


Abbildung 4: Normierte Verschiebungen bei Verwendung von linearen Tetraedern

[1] Da Software 1 die p-Methode nutzt ist hier eine Änderung des Elementansatzes nicht möglich. Die Werte für Verschiebung und von Mises-Spannung wurden daher jeweils einmal auf den maximalen Wert für TET4 (linker Wert) und einmal auf den für TET10 normiert (rechter Wert).

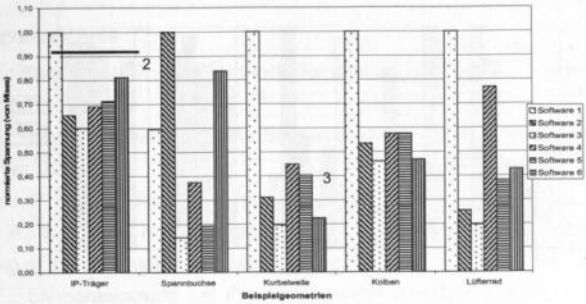


Abbildung 5: Normierte von Mises-Spannungen bei Verwendung von linearen Tetraedern[23]

Aus den Abbildungen 6 und 7 für die normierten Verschiebungen und von Mises Spannungen bei quadratischem Elementansatz ist bei allen Programmen eine hohe Übereinstimmung bei den Verschiebungen für den IP-Träger zu entnehmen.
Umso gravierender wiegen die Unterschiede bei den Ergebnissen für die Vergleichsspannung bei Software 5 und 6, welche über 50% höher als der analytische Wert sind.

In einigen Fällen gibt es Erklärungsansätze für die stark differierenden Werte bei einzelnen Beispielen. Im Fall der Spannbüchse wurden bei Software 5 und 6 die Lasten von Hand entsprechend gängiger Regeln [2] auf die Einzelknoten aufgebracht, da beide Programme nicht über die Option "Kraft auf Fläche verfügen". Gleiches galt im Fall der Kurbelwelle. Hier wurde die Flächenkraft bei Software 5 und 6 durch einen Druck ersetzt, wobei der grundlegende Unterschied in Kauf genommen wurde. Während sich bei der Spannbuchse trotzdem für alle Werte große Unterschiede ergaben lieferten beide Programme für die Kurbelwelle, ohne die anderen Programme zu betrachten, annähernd gleiche Werte für die Verschiebungen bei stark differierenden Spannungen.

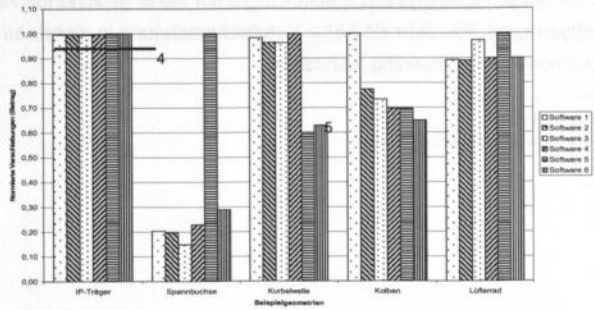


Abbildung 6: Normierte Verschiebungen bei Verwendung von quadratischen Tetraedern

---

[2] Normierte Werte für die analytische Berechnung.

[3] Bei Software 5 und 6 wurde anstatt der Flächenlast ein Druck angesetzt.

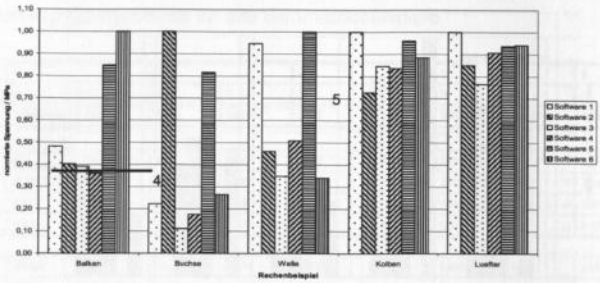


Abbildung 7: Normierte Spannungen bei der Verwendung von quadratischen Tetraedern

In diesem Rahmen ergab sich die Erkenntnis, dass über die internen Vorgänge der Lastverteilung innerhalb der anderen Programme keine Informationen zugänglich sind. Bei Flächenlasten die elementweise wirken, also bei Druck, ergeben sich hingegen bei der Verwendung von quadratischen Elementen relativ übereinstimmende Ergebnisse, so zu sehen am Beispiel des Lüfterrads, welches nur mit Druck beaufschlagt wurde.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Da besonders bei den integrierten FEA-Modulen keinerlei Informationen über die interne Arbeitsweise der Solver und der Routinen zur Spannungsberechnung vorliegen, kann keine fundierte Aussage über die Gründe für Abweichungen zwischen den Programmen oder gar über die Richtigkeit von erzielten Werten getätigt werden. Hier gilt es in weiteren Untersuchungen die maßgeblichen Einflussfaktoren zu identifizieren.

Die Berechnungsstudie zeigte große Abweichungen zwischen den Ergebnissen für die Vergleichsspannung, in einigen Fällen mehr als 50%. Da die Vergleichspannung zur Verifizierung der Bauteilfestigkeit herangezogen wird, ist davon auszugehen, daß ein Konstrukteur nur durch eine einmalige FE-Analyse in einem Programm keine gesicherten Aussagen über die Festigkeit tätigen kann. Vielmehr sind eine Vergleichsrechnung in mehreren Programmen sowie eine experimentelle Verifizierung anzuraten.

---

[4] Normierte Werte für die analytische Berechnung.

[5] Bei Software 5 und 6 wurde anstatt der Flächenlast ein Druck angesetzt.

5. Literaturverzeichnis

[1] Rieg, F.; Kaczmarek M., Taschenbuch der Maschinenelemente. Leipzig, Hanser Verlag, 2006

[2] Rieg, F., Hackenschmidt, R.; Finite Elemente Analyse für Ingenieure. München, Hanser Verlag, 2000

[3] Kurowski, P. M.; A closer look at model meshing. Machine Design, 2004, 82, 82-88.

[4] Ramos A., Simoes J. A.; Tetrahedral versus hexahedral finite elements in numerical modeling of the proximal femur. Medical Engineering & Physics, 2006, 28, 916-924.

[5] Koch F.; Elementauswahl bei Finiten Elemente Analysen. Aachen, Shaker Verlag, 2003.

[6] Maus R., Weber C.; Dokumentation und Vergleich von FEM-Simulation. CAD-CAM Report, 2005, 10, 50-53.

[7] Parametric Technology Corporation; Simulation and Analysis. Needham, 2005.

[8] Dassault Systèmes; Catia V5 Documentation. Suresnes, 2005.

[9] UGS Corp.; NX 4 Hilfebibliothek. Plano, 2005.

[10] Abaqus Inc.; Abaqus/CAE user`s manual. Providence, 2006.

[11] MSC.Software Cooperation; Guideline MSC.Patran 2005 r2. Santa Ana, 2005.

[12] Rieg F.; Handbuch für Z88 Version 12.0. Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Bayreuth, 2006.

[13] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L.; The Finite Element Method. Oxford, Butterworth Heinemann, 2002.

Simulationsstudie zur Erhöhung der Modellabbildungsgenauigkeit durch Variation der Integrationsordnung in der Finiten Elemente Analyse

Martin Zimmermann, Bernd Roith, Alexander Troll, Frank Rieg

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Kurzfassung

Der ständig wachsende Einfluss der rechnergestützten Produktentwicklung führt gleichermaßen, neben der erwünschten effektiveren Gestaltung von Entwicklungsvorgängen, zu zahlreichen Problemen der Numerik und Rechentechnik. Derartige Probleme besitzen neben den klassischen fachdisziplinären Aufgaben eine entsprechende Relevanz.

In diesem Beitrag soll die elementspezifische numerische Integration im Rahmen einer Finiten Elemente Analyse (FEA), sowie deren Einfluss auf die Bildung der Elementsteifigkeitsmatrix dargestellt werden. Der Algorithmus der numerischen Integration wird ausschließlich durch die Wahl des Integrationstypus und der Integrationsordnung bestimmt. Zur Darstellung der Aussagen über die Relevanz der Integrationsordnung kann auf BATHE [1] verwiesen werden. Dabei wird von der Integrationstheorie über die Darstellung des typischen Integranden in der Methode der Finiten Elemente hin zu einem Test im Programmsystem Z88 gearbeitet. Letztendlich soll eine Abhängigkeit zwischen der Elementsteifigkeit des einzelnen Elementes und der verwendeten Integrationsordnung skizziert werden. Daraus wird abgeleitet, wie und ob die Integrationsordnung als Einflussfaktor die Elementsteifigkeit einzelner Finiter Elemente beeinflusst. Weiterhin wird eine Aussage darüber getroffen, ob und wann eine Erhöhung der Integrationsordnung sinnvoll erscheint.

1. Numerische Integration

Die Methode der numerischen Integration ist eine Verfahrensweise, die im Allgemeinen als Quadraturmethode bezeichnet wird. Bei der gewöhnlichen Quadraturmethode wird das zu lösende Integral $I(a,b)=\int_a^b f(\underline{x})dx$ unter Akzeptanz eines Fehlers $E(a,b)=I(a,b)-I_{Q_f(x)}(a,b)$ in Form des Funktionales:

$$I_{Q_f(x)}(a,b)=\int_a^b w(\underline{x})\cdot f(\underline{x})dx \qquad \textbf{Gl. 1}$$

ausgedrückt.

Die verschiedenen Integrationsmethoden unterscheiden sich nunmehr durch die Wahl der Wichtungsfunktionen $w(\underline{x})$, die in der abgeleiteten Integrationsregel nicht explizit in Erscheinung treten. Neben den bekannten Verfahren, wie etwa der Newton-Cotes-Quadratur wird hier das für eine FEA zweckmäßige Gauß-Legendre-Verfahren näher betrachtet. Dieses Verfahren ist repräsentativ für die Vorschrift der Gauß-Quadratur. Dabei wird die Gleichung 1 für den dreidimensionalen Raum als Summe geschrieben:

$$I_{Q_f(x)}(-1,1) = \sum_{ijk} w_{ijk} \cdot f(\overset{i}{x}_0, \overset{j}{x}_1, \overset{k}{x}_2). \qquad \text{Gl. 2}$$

Weiter generieren sich die für mehrdimensionale Integrationen notwendigen Wichtungskoeffizienten aus den eindimensionalen Wichtungen.

$$w_{ijk} = w_i \cdot w_j \cdot w_k = \prod_{\zeta} w_{\zeta} \qquad \text{Gl. 3}$$

2. Integration im Rahmen einer FE-Berechnung

Wird das Integrationsintervall per Verfahrensdefinition auf [-1,1] festgesetzt und die Klasse der Funktionen auf Polynomfunktionen beschränkt, so erhält man unter der Voraussetzung $I(-1,1) = I_{Q_f(x)}(-1,1)$ die Bedingungen für die n Wichtungen w_{ijk} und die n Stützstellen $\overset{m}{x}_{\alpha}$ (m-te Stützstelle der α-ten Koordinate). Es wird z.B. in EVANS [3] gezeigt, dass man die 2n Unbekannten aus der Lösung eines linearen Gleichungssystems mit 2n Gleichungen bestimmen kann. Weiter wird herausgestellt, dass die anzuwendenden Stützstellen die Nullstellen der untereinander orthogonalen Legendre-Polynome sind. Wir betrachten den eindimensionalen Fall von Gleichung 2 mit einem Polynomansatz für $f(x)$ vom Grade n. Damit kann ein Polynom vom Grade 2n-1 mit n Stützstellen absolut exakt integriert werden. Da es sich bei den Elementansätzen verfahrensbedingt um Polynomansätze handelt, ermöglicht diese Form der numerischen Integration die Berechnung der exakten Lösung. Abbildung 1 zeigt die Einbindung des Integrationsvorganges in den Prozess der Modellbildung.

Aus diesem Grund kann bei Analyse der Elementformulierung die minimal notwendige Integrationsordnung, um rein formal richtige Integrationsergebnisse zu erhalten, a priori anhand des maximal auftretenden Polynomgrades festgelegt werden. Das geeignete Vorgehen zur Durchführung einer derartigen Analyse wird in Absatz 3 gezeigt.

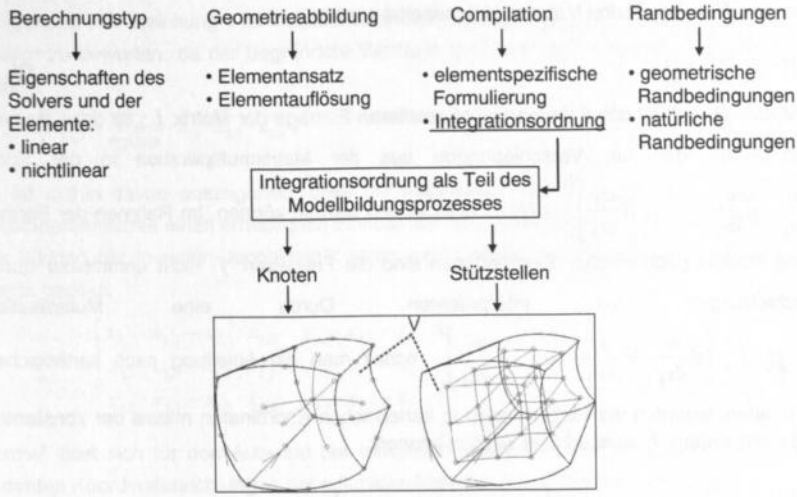


Abbildung 1: Einordnung des Integrationsvorganges als elementarer Bestandteil von FE - Modellen

Ein anderer Aspekt, begründet durch vorhandene Anwendungsgebiete, wird durch die gezielte Unterintegration dargestellt. Dabei dient dieses Verfahren unter anderem zur Vermeidung von Locking-Effekten bei Schalen [2].

Fortfolgend soll das Integrationsproblem im Rahmen der FEA dargestellt werden. Dabei kann bei verschiebungsbezogenen Finiten Elementen davon ausgegangen werden, dass die Verschiebungen als Polynome über die Elemente interpoliert vorliegen. Die Aufgabe besteht in der volumetrischen Integration der Einträge der Steifigkeitsmatrix [5]:

$$\underline{\underline{K}} = \iiint \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{C}}\,\underline{\underline{B}} \det(\underline{\underline{J}}) dr_0 dr_1 dr_2 \,. \qquad \text{Gl. 4}$$

3. Analyse des Integranden

Aus Gleichung 4 ableitend muss der höchste Grad des Integranden $\underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{C}}\,\underline{\underline{B}} \det(\underline{\underline{J}})$ in den natürlichen Koordinaten festgestellt und anhand dessen die notwendige Integrationsordnung abgeleitet werden. Interessant ist dabei die Matrix $\underline{\underline{B}}$, die FEA spezifisch analysiert werden soll. Im Realfall vermittelt diese per Matrixmultiplikation einen Freiheitenvektor $\underline{f}$ auf einen Verzerrungsvektor $\underline{\varepsilon}$.

Die Verschiebungen ergeben sich aus $\underline{u} = \underline{\underline{L}} \cdot \underline{f}$. Dabei konstituieren sich die Einträge der Interpolationsmatrix $\underline{\underline{L}}$ aus Polynomfunktionen der natürlichen Koordinaten.

Die Matrix $\underline{\underline{B}}$ kann auf drei Matrizen aufgespaltet werden:

$$\underline{\underline{B}} = \underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{-1} \cdot \underline{\underline{H}} \,. \qquad \text{Gl. 5}$$

Die Matrix $\underline{\underline{H}}$ enthält dabei die partiell abgeleiteten Einträge der Matrix $\underline{\underline{L}}$, so dass die partiellen Ableitungen der Verschiebungen aus der Matrixmultiplikation in der Form $\left[\partial\frac{u_1}{\partial r_1} \quad \partial\frac{u_1}{\partial r_2} \quad \ldots\ldots \quad \partial\frac{u_3}{\partial r_3}\right]^T = \underline{\underline{H}} \cdot \underline{f}$ entnommen werden können. Im Rahmen der Formulierung strukturmechanischer Elementtypen sind die Freiheiten $\underline{f}$ nicht unmittelbar durch Verschiebungen zu interpretieren. Durch eine Multiplikation $\underline{\underline{J}}^{-1} \cdot \underline{\underline{H}} \cdot \underline{f} = \left[\partial\frac{u_1}{\partial x_1} \quad \partial\frac{u_1}{\partial x_2} \quad \ldots\ldots \quad \partial\frac{u_3}{\partial x_3}\right]^T$ erzielt man die Ableitung nach kartesischen Koordinaten, wodurch die Verzerrungen in kartesischen Koordinaten mittels der konstanten Verzerrungsmatrix $\underline{\underline{E}}$ ausgedrückt werden können:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{-1} \cdot \underline{\underline{H}} \cdot \underline{f} = \underline{\underline{E}} \cdot \left[\frac{1}{\det(\underline{\underline{J}})} \cdot \underline{\underline{J}}^{adj}\right] \cdot \underline{\underline{H}} \cdot \underline{f} = \frac{1}{\det(\underline{\underline{J}})} \cdot \underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{adj} \cdot \underline{\underline{H}} \cdot \underline{f} \,. \qquad \text{Gl. 6}$$

Die Transponierte der Verzerrungen ergäbe sich durch äquivalentes Vorgehen. Der Integrand nimmt damit eine analysierbare Gestalt an:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{C}}\underline{\underline{B}} \det(\underline{\underline{J}}) &= \left[\frac{1}{\det(\underline{\underline{J}})} \cdot \left[\underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{adj} \cdot \underline{\underline{H}}\right]^T\right] \cdot \underline{\underline{C}} \cdot \left[\frac{1}{\det(\underline{\underline{J}})} \cdot \underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{adj} \cdot \underline{\underline{H}}\right] \cdot \det(\underline{\underline{J}}) \\ &= \frac{1}{\det(\underline{\underline{J}})} \cdot \left[\underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{adj} \cdot \underline{\underline{H}}\right]^T \cdot \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{E}} \cdot \underline{\underline{J}}^{adj} \cdot \underline{\underline{H}} \end{aligned} \,. \qquad \text{Gl. 7}$$

Es ist also die möglichst fehlerfreie Integration der Einträge von $\underline{\underline{J}}^{adj}$, $\underline{\underline{H}}$ und $\det(\underline{\underline{J}})$ über das Element von Nöten.

4. Jacobimatrix, inverse Jacobimatrix und Jacobideterminante

Für die Matrix $\underline{\underline{H}}$ gilt, dass die Einträge aus den partiellen Ableitungen von $\underline{\underline{L}}$ gewonnen werden können. Somit enthalten sie die Linearkombinationen der partiellen Ableitungen der Formfunktionen.

Mit der Definition der Jacobimatrix zu $J_{u,v} = \frac{\partial x_v}{\partial r_u}$ ergibt sich ein weiterer Aspekt, der für die notwendige Integrationsordnung bedeutend ist. Dabei wird deutlich, dass sich der Polynomgrad der Koordinateninterpolation durch die partielle Ableitung um 1 in der entsprechenden Koordinate vermindert.

Ausgehend von Gleichung 4 ist insbesondere auch die Jacobideterminante als Einflussfaktor kritisch zu bewerten, da der begründete Verdacht auf Erzeugung hoher Polynomgrade besteht:

$$\det(\underline{\underline{J}}) = \sum_{ijk} \underline{\underline{\varepsilon}}_{ijk} \cdot x_{1,i} \cdot x_{2,j} \cdot x_{3,k} \,. \qquad \text{Gl. 8}$$

Es ist mithin davon auszugehen, dass die maximale Ordnung der Polynomfunktion der Jacobideterminante einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtpolynomgrad haben wird.
Zur Bildung der inversen Jacobimatrix seien zunächst die einzelnen Terme der adjunkten Matrix gezeigt:

$$\underline{\underline{J}}^{adj} = \begin{bmatrix} x_{2,2} \cdot x_{3,3} - x_{2,3} \cdot x_{3,2} & x_{2,3} \cdot x_{3,1} - x_{2,1} \cdot x_{3,3} & x_{2,1} \cdot x_{3,2} - x_{2,2} \cdot x_{3,1} \\ x_{1,3} \cdot x_{3,2} - x_{1,2} \cdot x_{3,3} & x_{1,1} \cdot x_{3,3} - x_{1,3} \cdot x_{3,1} & x_{1,2} \cdot x_{3,1} - x_{1,1} \cdot x_{3,2} \\ x_{1,2} \cdot x_{2,3} - x_{1,3} \cdot x_{2,2} & x_{1,3} \cdot x_{2,1} - x_{1,1} \cdot x_{2,3} & x_{1,1} \cdot x_{2,2} - x_{1,2} \cdot x_{2,1} \end{bmatrix}. \qquad \text{Gl. 9}$$

Formal lässt sich für den Aufwand der Integration ableiten, dass der Polynomgrad in bestimmten Koordinatenrichtungen der adjunkten Matrix maximal verdoppelt vorliegt.
Es sei darauf aufmerksam gemacht, dass die Jacobideterminante lediglich einer Variabilität unterliegt, wenn verzerrte Kontinua vorliegen. Dann sind die infinitesimalen Integrationsvolumina (differentieller Integrationsbereich) über dem Element als nicht konstant vorauszusetzen.

5. Zusammenfassung zu den Einflussfaktoren

Allgemeine Aussagen, welchen Polynomgrad ein entsprechender Eintrag der Elementsteifigkeitsmatrix enthält, sind von komplexer Natur. Sie können exemplarisch mithilfe eines geeigneten Algorithmus bestimmt werden. Die Erstellung eines derartigen Algorithmus erfolgte zur Prüfung des resultierenden Polynomgrades bei hexaedrischen, isoparametrischen 20 Knoten Kontinuumselementen mit quadratischem Ansatz.
Führt man die entscheidende Operation nach Gleichung 7 aus, so erhält man eine Steifigkeitsmatrix mit Einträgen, die einen maximalen Polynomgrad von 5 in den natürlichen Koordinatenrichtungen aufweisen. Somit ist anhand des höchsten auftretenden Polynomgrades nach dieser Betrachtung eine Integrationsordnung von 3 notwendig, um dieses Element zu integrieren. Dies ist deckungsgleich mit empfohlenen Einstellungen für dieses Element.
Um diese Aussagen anhand eines reproduzierbaren Beispiels zu untersuchen, wird sich des mit offener Quelle zur Verfügung stehenden FE-Systems Z88 [4] bedient. Es ist der direkte Eingriff in die Integrationsroutinen gewährleistet. Als Elementauswahl wird der Hexaeder mit quadratischem Ansatz, ein Serendipity-Element [5], ausgewählt. Ziel der Bestrebungen ist der Erhalt einer Information über das Verhalten des Verschiebungsergebnisses mit steigender Integrationsordnung.

6. Implementationsvariation von Z88 als experimentelle Basis

Für die hier durchgeführten Integrationsexperimente wurde das Z88-System dahingehend erweitert, dass die Wahl der Integrationsordnung frei zur Verfügung steht. D.h. die Steifigkeitsmatrix jedes Elementes kann mit einer beliebigen Integrationsordnung aufgestellt werden. Dazu wurden die entsprechenden Stützstellen und Gewichte errechnet und in Form einer Eingabedatei dem Z88-System beigelegt. Die notwendigen Integrationsdaten stehen nunmehr zu Anfang des *„solverspezifischen"* Compilationsprozesses für jeden Elementtyp zur Verfügung (Abbildung 2).

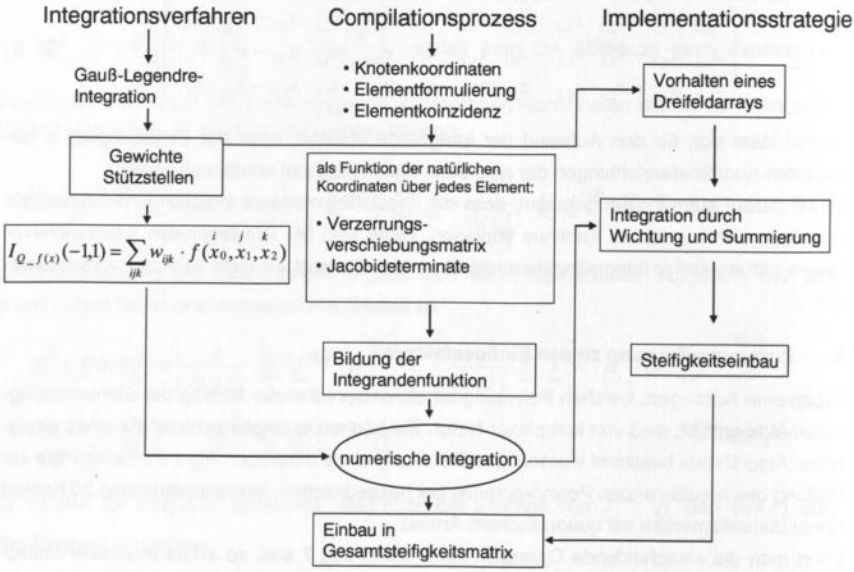


Abbildung 2: Integration als Bestandteil des Compilationsprozesses der Steifigkeitsmatrix

Die Integrationsordnung bestimmt die Einträge der Gesamtsteifigkeitsmatrix und somit den zu betreibenden Rechenaufwand des Compilationsprozesses. Im Folgenden sei das Kernstück für den Aufbau der Elementsteifigkeitsmatrix von Hexaedern mit quadratischem Ansatz des Programms Z88 aufgezeigt (Abbildung 3). Daran ist der steigende Rechenaufwand aufgrund der auszuführenden Schleifenstrukturen (Variable ***intore*** enthält die Integrationsordnung, Variable ***gew*** das Dreifeldarray) deutlich erkennbar.

```
/*-----------------------------------------------------------------
        * Elementsteifigkeitsmatrix aufstellen
        *-----------------------------------------------------------------*/
        for(i = 1;i <= 3600;i++)
          se[i]= 0.;
        for(lx = 1;lx <= intore;lx++)
          {
          r= ((gew[intore-1])[0])[lx-1];
          for(ly = 1;ly <= intore;ly++)
            {
            s= ((gew[intore-1])[0])[ly-1];
            for(lz = 1;lz <= intore;lz++)
              {
              t= ((gew[intore-1])[0])[lz-1];
        /*=================================================================
        * Matrix b der partiellen Ableitungen & Jacobi Determinante holen
        *=================================================================*/
              iret= hb88(&det,&r,&s,&t);
              if(iret != 0) return(iret);
              wt= ((gew[intore-1])[1])[lx-1] *
                  ((gew[intore-1])[1])[ly-1] *
                  ((gew[intore-1])[1])[lz-1] * det;
              for(j = 1;j <= 60;j++)
                {
                for(k = 1;k <= 6;k++)
                  {
                  db[k]= 0.;
                  for(l = 1;l <= 6;l++)
                    {
                    db[k]= db[k] + d[(k-1)*6 + l] * b[(l-1)*60 + j];
                    }}
                for(i = j;i <= 60;i++)
                  {
                  stiff= 0.;
                  for(l = 1;l <= 6;l++)
                    {
                    stiff+= b[(l-1)*60 + i] * db[l];
                    }
                  se[i+ne*(j-1)]= se[i+ne*(j-1)] + stiff * wt;}}}}}
```

Abbildung 3: Quellcodeauzug aus der Elementsteifigkeitsroutine (Hexaeder mit 20 Knoten)

7. Experimentelle Praxis

Um den Einfluss der Integrationsordnung an zwei überschaubaren Beispielen zu untersuchen, wird sich zweier Referenzstrukturen bedient (Abbildung 4):

- Einzelelement mit quadratischem Ansatz
- Probebalken aus Hexaedern mit quadratischem Ansatz

Am Einzelelement soll eine Variation der Elementsteifigkeit durch die Erhöhung der Integrationsordnung untersucht werden. Dazu dient ein Hexaeder mit 20 Knoten und dem quadratischen Serendipity-Ansatz. Insbesonders interessiert hierbei, ob es zu Variationen der Elementsteifigkeit zwischen einer gewählten Integrationsordnung 3 oder höheren Ordnungen kommt.

Die fortschreitende Methode soll am Beispiel eines Balkens präsentiert werden, dessen Biegelinie durch drei Parabelstücke approximiert werden soll. Hierbei wird gezeigt, dass eine Verzerrung nicht unmittelbar mit einer geometrischen Fehldiskretion zusammenhängen muss, sondern dass auch Verzerrungen im Inneren des Kontinuums als kritisch bewertet werden können.

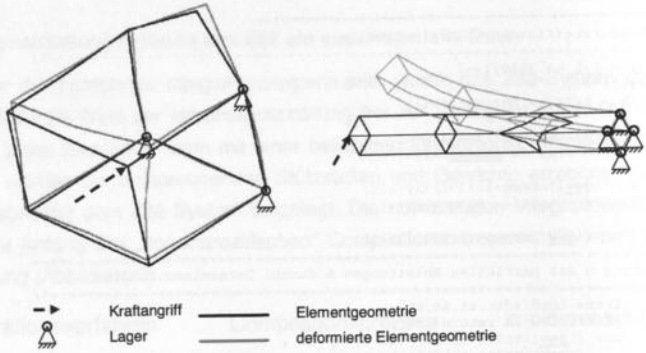


Abbildung 4: Elementgeometrien und Elementdeformationen (Modul Z88O)

Allein durch die Verzerrung der Elemente wird eine im Vergleich zu unverzerrten Elementen veränderte Lösung erhalten. Mit der Verzerrung der Elemente werden die möglichen Verformungszustände der Elemente verändert. Dabei wird, um nachweishaltige Ergebnisse zu erzielen, die Vernetzung für das Balkenbeispiel sehr grob gewählt. Der Einfluss einzelner Elemente wirkt sich damit dominant aus.

7.1. Ergebnisdarstellung der Berechnung eines verzerrten Elementes

Im Folgenden soll ein Auszug der Analyseergebnisse am Einzelelement aufgeführt werden, dabei wird die Verschiebungslösung und damit die Steifigkeitsmatrix betrachtet. Dargestellt ist eine spezielle Verschiebungslösung bei einem kraftbelasteten Knoten. Diese wird bei verschiedenen Integrationsordnungen (Diagramm 1) ermittelt.

Die Darstellung zeigt anhand der Tendenz der Ergebnisse, dass sich mit steigender Integrationsordnung die Steifigkeitskeitsmatrix stabilisiert. Weiter zeigt sich eine deutliche Differenz der Verschiebungsantwort von der in Theorie ausreichenden Integrationsordnung 3 zur Integrationsordnung 4. Die Untersuchungen an einem Balken zeigen dabei tendenziell gleiches Verhalten. Zwischen Integrationsordnung 3 und Integrationsordnung 4 können Abweichungen der Verschiebungslösungen von 4% beobachtet werden.

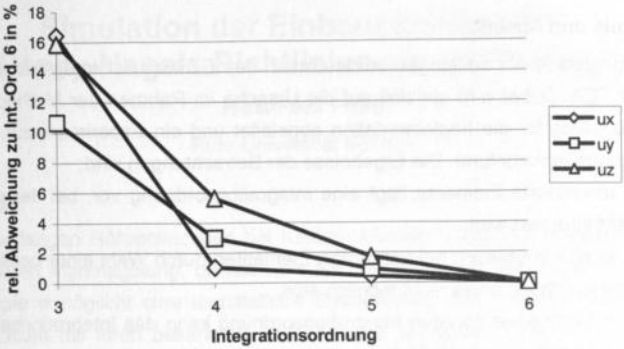


Diagramm 1: Darstellung des Einflusses der Integrationsordnung auf die Verschiebungslösung einer Einzelelementsteifigkeit

7.2. Auswertung der Untersuchungen

Mit den Ausführungen aus Absatz 7.1 kann nachgewiesen werden, dass das verzerrte Probeelement unterschiedliche Steifigkeiten in Abhängigkeit der gewählten Integrationsordnung aufweist und diese mit steigender Integrationsordnung gegen ein konstantes Ergebnis konvergieren.

Die auftretenden Differenzen durch die durchgeführte Integration sind auf Elementsteifigkeitsebene nachweisbar. Ihre Dominanz kann als steigend betrachtet werden, je stärker die Elemente verzerrt sind. Bei dem hier sehr stark verzerrten Probeelement kann deutlich gezeigt werden, dass die nach Theorie ermittelte Integrationsordnung von 3 erheblich differierende Ergebnisse zu den höheren Ordnungen aufweist. Bei unverzerrten Elementen erfolgte eine derartige Beobachtung nicht.

Damit liegt die Vermutung nahe, dass bei derartigen Elementen Einträge in der Steifigkeitsmatrix vorliegen, die nicht nur Polynomfunktionsanteile enthalten. Die Gleichung des Integranden betrachtend (Gl. 7), liegt es weiterhin nahe, dass es sich um gebrochen rationale Polynomanteile handelt. Diese könnten durch die Divisionsoperation mit der Jacobideterminante entstehen.

Derartige Erscheinungen sind vor allem dort zu erwarten, wo stark beanspruchte verzerrte Elemente auftreten. Dies kann in der Rechenpraxis als mögliche Fehlerquelle interpretiert werden. Verzerrte Elemente an kritischen Stellen können die Gesamtstruktur beeinflussen.

8. Ergebnis und Ausblick

Die hier dargestellten Abhandlungen verdeutlichen den Einfluss der Integrationsordnung im Rahmen der FEA. Dabei wird speziell auf die Ursache im Rahmen der Methode hingewiesen, die Bedeutung für die Implementation abgeleitet und ein Experiment zur Bestätigung der Vermutungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Betrachtungen sind:

- Für unverzerrte Elemente liegt eine Integrationsordnung vor, bei der das Element ***exakt*** integriert wird.
- Die exakte Integration bei verzerrten Elementen durch Wahl einer bestimmten Integrationsordnung muss nicht möglich sein.
- Durch Wahl einer höheren Integrationsordnung kann das Integrationsergebnis verbessert werden (gezielte Unterintegration ausgeschlossen).
- Zu geringe Integrationsordnungen können zu Fehlerquellen führen, die die Einzelelementsteifigkeit beeinflussen.

Daraus ableitend entsteht ein Einfluss auf praktische Berechnungen, bei der die Steifigkeit einzelner Elemente die gewünschten Ergebnisse beeinflusst. Stark belastete Strukturbereiche mit verzerrten Elementkonturen und geringen Elementauflösungen können betroffen sein. Eine konsequente Erhöhung der Integrationsordnung in einem Modell macht aufgrund des drastisch steigenden Rechenaufwandes gegen die Größe des Gesamtfehlers keinen Sinn. Daher gilt es vielmehr, die Integrationsordnung lediglich bei stark verzerrten Elementen, gekoppelt an ein geeignetes Kriterium, zu variieren. Durch eine selektive Anpassung der Integrationsordnung in einem Gesamtmodell kann daher dem Fehler der numerischen Integration stark verzerrter Elementgeometrien entgegengewirkt werden.

9. Quellenverzeichnis

[1] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. 2. Auflage, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2002.

[2] Bischoff, M.: Theorie und Numerik einer dreidimensionalen Schalenformulierung. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Baustatik, 2000.

[3] Evans, G.: Practical Numerical Integration. New York Toronto Singapore: John Wiley & Sons, 1993.

[4] Rieg, F.: Z88. V12, Finite Elemente Berechnungsprogramm, Bayreuth, 2006.

[5] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. 2. Auflage, München Wien: Carl Hanser Verlag, 2003.

Simulation der Einbausituation des Nancy-Nagels Richtlinien zur Vorbiegung

Hans-Peter Prüfer

Ruhr-Universität Bochum

Kurzfassung

Frakturen der langen Röhrenknochen bei Kindern können erfolgreich mit der Technik der elastisch-stabilen Marknagelung, oft auch als Nancy-Nagel bezeichnet, behandelt werden. Diese Therapie ermöglicht eine unmittelbare Stabilisierung des Patienten und hilft damit, lange Liegezeiten mit ihren bekannten Nachteilen zu vermeiden. Darüber hinaus werden Schädigungen der Wachstumsfugen vermieden, so dass es auch nicht zu Störungen des Knochenwachstums kommt. Zur Durchführung der Therapie müssen die als gerades Rundmaterial vorliegenden Stahldrähte C-förmig vorgebogen werden. Obwohl dieser Biegevorgang signifikant die mechanischen Eigenschaften der Fixierung bestimmt, gibt es nur sehr grobe Anhaltspunkte, in welcher Weise die Biegung vorzunehmen ist. In diesem Beitrag werden die typischen Eigenschaften der Nancy-Nagelung vorgestellt. Auf der Basis einer nichtlinearen FEM-Analyse werden Konzepte entwickelt, welche zu reproduzierbaren Vorgehensweisen bei der Vorbereitung der Nägel führen.

Abstract

Elastic intramedullary nailing represents a successful technique in the treatment of pediatric shaft fractures. Besides the advantage of immediate stabilization a significantly shortened hospital stay is observed. The biomechanical properties of the Prévot-nail depend on the mechanical preparation of the nail, especially its bending. Although the Prévot-nailing is considered as a well established therapy there are only a few hints with respect to the amount of bending. This paper presents a concept for the numerical simulation of the elastic stable intramedullary nailing, which will provide the orthopedists with worksheets for reproducible procedures.

1. Ausgangssituation

Frakturen der langen Röhrenknochen bei Kindern lassen sich bei hinreichender Stabilität konservativ durch Ruhigstellung behandeln. Bei instabilen Frakturen, z.B. lange Schrägfrakturen, sind Osteosyntheseverfahren von Vorteil, weil sie eine unmittelbare Stabilisierung ermöglichen, wodurch Sekundärschäden durch lange Liegezeiten vermieden werden. Das bei Erwachsenen in der Regel verwendete bekannte Verfahren der Marknagelung nach Küntscher kann jedoch nicht auf kindliche Frakturen übertragen werden, da hierbei die Wachstumsfugen durchbohrt werden müssen und so Störungen des Knochenwachstums eintreten können. Als alternative Technik wurde in den 80er Jahren von Prévot und Métaizeau [1] am Kinderkrankenhaus in Nancy die so genannte elastisch-stabile Marknagelung entwickelt – im Folgenden kurz als Nancy-Nagel bezeichnet.

2. Vorgehensweise

Die Farkturbehandlung beginnt prinzipiell mit der Reposition der Bruchstücke. Anhand der Länge des Knochens und den Maßen des Markraums werden zwei Nägel katalogmäßig ausgewählt und C-förmig vorgebogen. Mit einem kurzen Hautschnitt wird ein Zugang zum Knochen geschaffen. Anschließend wird ein Loch in den Knochen gebohrt, welches in seiner Ausrichtung ungefähr der späteren Verlaufsrichtung des Nagels entsprechen soll, wobei insbesondere die Wachstumsfuge nicht beschädigt werden darf. Der Nagel wird mittels eines Handgriffs unter Drehbewegungen bis zur Stelle der Fraktur eingebracht, anschließend wird die Frakturstelle mit leichten Hammerschlägen überwunden, bis schließlich der Nagel auf der gegenüberliegenden Seite verrastet werden kann. Das überstehende freie Ende wird gekürzt und mit einer Schutzkappe versehen. Es dient nach der Heilung als Angriffspunkt für die Extraktion. Das Verfahren wird in [2] hinsichtlich seiner mechanischen und konstruktiven Grundlagen ausführlich dargestellt.

3. Probleme

Die beschriebene Vorgehensweise weist eine deutliche Komplexität auf, die insbesondere durch eine Vielzahl von Einflussgrößen bedingt ist. Zu nennen sind Durchmesser und Länge des Nagels, Gestaltung der Vorbiegung, Positionierung und Eintrittswinkel der Bohrungen im Knochen. Die Festlegung dieser Größen wird bestimmt durch die Knochengeometrie und die Lage sowie Art der Fraktur. Trotz der erfolgreichen Anwendung der Nancy-Nagelung sind die Probleme wohlbekannt und werden auch von Métaizeau in einer durchaus aktuellen Veröffentlichung [3] angesprochen. Die folgenden Darstellungen (Abb. 1) zeigen typische Probleme infolge fehlerhaft applizierter Bohrungen oder nicht geeigneter Vorbiegung.

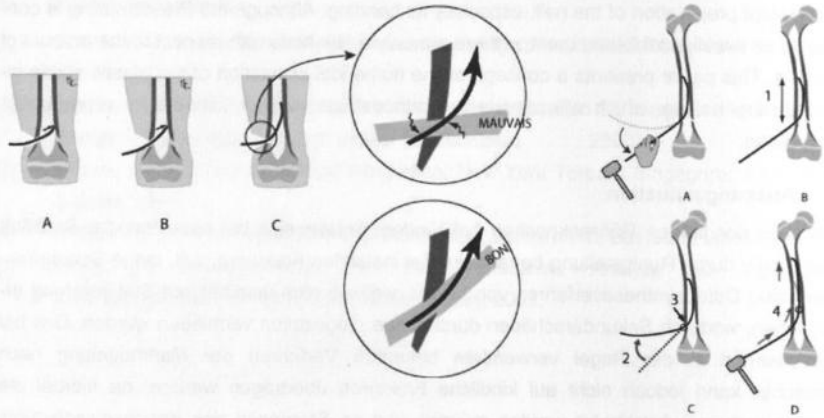


Abb. 1: Typische Probleme [3]

Auf diese Komplexität mag es auch zurückzuführen sein, dass die Nancy-Nagelung keineswegs so oft angewendet wird wie es ihre grundsätzlich guten Eigenschaften erwarten lassen. Obwohl durchaus nach wie vor zum Thema der elastisch-stabilen Marknagelung publiziert wird, gelten nach Auskunft des einzigen Anbieters des Materials in Deutschland [4] die Nancy-Nägel inzwischen beinahe als historisches Produkt. Unterlagen zur Operationstechnik sind zwar noch verfügbar [5], Werkzeuge und Materialmuster sind dagegen zur Zeit nicht erhältlich.

4. Experimentelle Untersuchungen

Lippeck und Schlacht haben sich in ihrer grundlegenden Arbeit [2] neben einer systematischen Begründung des Verfahren auch mit Messungen befasst, die zuverlässige Aussagen über die mechanischen Eigenschaften der Nancy-Nagelung für verschiedene Frakturtypen liefern konnten. Diese Ergebnisse sollten als Referenz für eine nachgeschaltete numerische Simulation dienen, die sich jedoch aufgrund der zum damaligen Zeitpunkt nicht hinreichenden Fähigkeiten der FEM-Systeme als undurchführbar erwies.

5. Numerische Simulation

Entsprechend der therapeutischen Vorgehensweise gliedert sich die numerische Simulation der Nancy-Nagelung in drei Phasen:

- Vorbiegung des Nagels
- Positionieren des Nagels im Markraum des Knochens
- Belastung des Nagels in situ

5.1. Vorbiegung

Eine exakte Beschreibung des Biegevorgangs liegt bekanntlich nicht vor. Für die Modellierung wurde daher ein pragmatischer Ansatz gewählt. Zunächst wird der Nagel in seiner Ausgangsform symmetrisiert. Dadurch kann an der Symmetrieebene eine Fesselung angebracht werden, mit der die Starrkörperbewegung des Nagels verhindert wird. Die Biegung selbst wird in einem ersten stark vereinfachenden Ansatz über einer viertelkreisförmigen Schablone vorgenommen, die als nichtverformbare Kontaktfläche aufgefasst wird. Die Schablone repräsentiert dabei das nicht näher spezifizierte Biegewerkzeug.

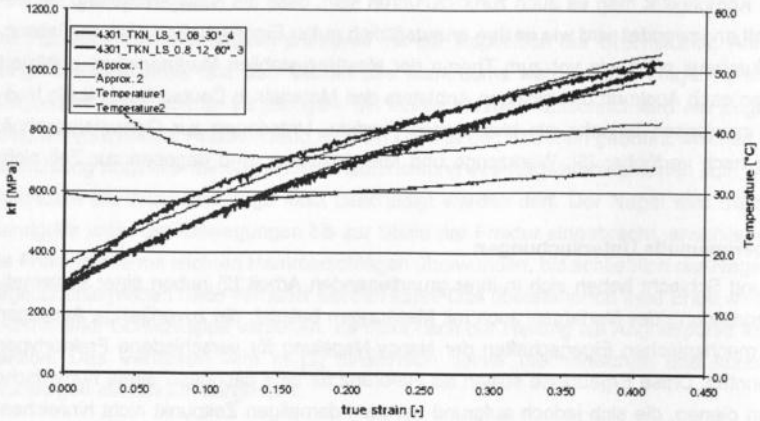


Abb. 2: Materialdaten [6]

Um eine bleibende Verformung zu erreichen, wird ein plastisches Materialgesetz benötigt. Es wird hier durch die Vorgabe von Dehnspannungen und zugehörigen wahren Dehnungen erreicht. Da für das verwendete Material (Implantatstahl, 1.4441) keine verlässlichen Daten zu erhalten waren, wurde ersatzweise Material mit vergleichbarem Verhalten (1.4301, [6]) betrachtet.

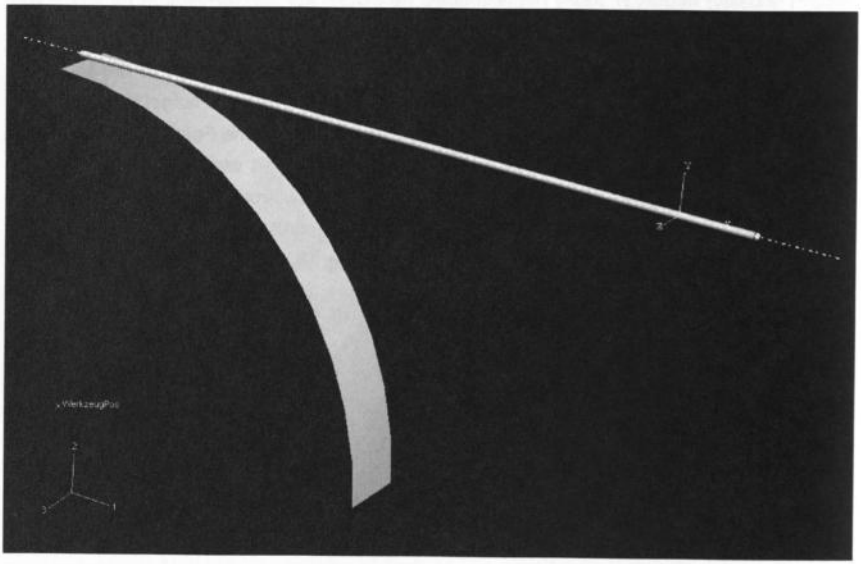


Abb. 3: FE-Modell des symmetrischen Nagels und der Schablone

In der Realität wird die Biegung dadurch erreicht, dass der Operateur den Nagel mit beiden Händen greift und ihn mittels der Einleitung von Querkräften und Momenten in die gewünschte Form bringt. Mechanisch ist dies recht einfach durch Aufbringen von Punktlasten am freien Nagelende zu realisieren. Nimmt man dabei große Verformungen an, so folgen die Kräfte der Verlagerung. Hier liegt ebenso wie bei der Verwendung des plastischen Materialgesetzes eine Nichtlinearität vor, die typischerweise durch Inkrementierung der Randbedingungen gelöst wird. Ist die gewünschte Last erreicht, kann sie in einem weiteren Lastschritt wieder zurückgenommen werden. Bei vollständiger Entlastung bleibt dann der Anteil der plastischen Verformung bestehen.

Dieses intuitive Vorgehen liefert zwar tendenziell korrekte Ergebnisse, eignet sich jedoch nicht für die Erstellung von Arbeitsblättern für die Erzeugung einer geforderten Form. Menschen sind nicht in der Lage, ohne Messgeräte eine definierte Kraft aufzubringen.

Ersatzweise wird daher die Biegung über eine Weganregung erzeugt. Dieses Vorgehen hat den Vorzug, dass man für die praktische Anwendung die Biegeschablone auf einem Grundbrett mit Anschlägen bzw. Anschlagsmarkierungen montieren kann, so dass die Verformung definiert ist. Innerhalb der FEM ist dieses Prinzip schwieriger zu modellieren. Die einfache Überlegung, an Knoten entsprechend einer Lasteinleitung eine Verlagerung aufzuprägen, ist nicht realisierbar, weil eine Entlastung dabei nur durch die Zurücknahme der Verlagerung zu erreichen wäre. Das aber würde einer vollständigen erzwungenen Rückbiegung entsprechen.

Dieses Problem kann mit einer komplexeren Alternative beseitigt werden. Die Verlagerung wird nicht einem Knoten bzw. Bereich aufgeprägt, sondern indirekt mittels einer nichtverformbaren Fläche. Wird sie zum freien Ende des Nagels bewegt, so tritt Kontakt ein, und der Nagel wird entsprechend der Komponentenzerlegung der Bewegung verlagert. Sobald die Kontaktfläche ihre Endposition erreicht hat, kann sie wieder zurückgezogen werden. Der Nagel wird dieser Bewegung folgen, solange elastische Verformungsanteile vorhanden sind. Danach wird sich die Fläche ablösen und keinerlei Rückwirkungen mehr auf den Nagel haben.

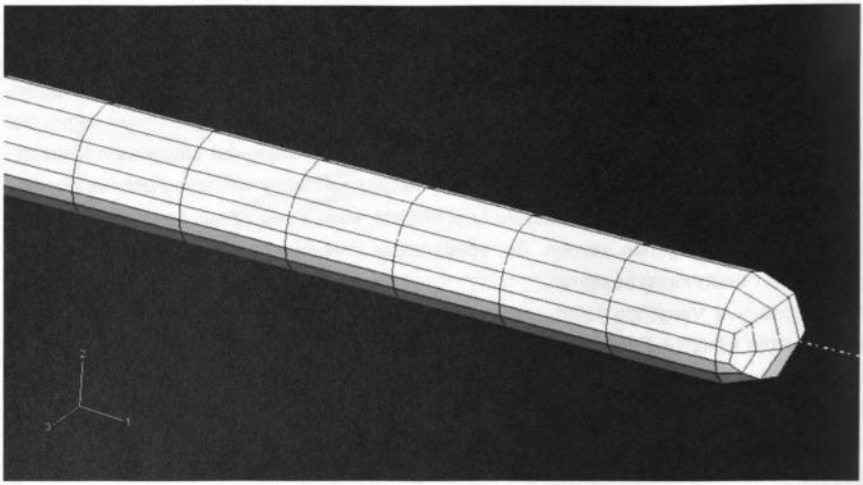


Abb. 4: Elementierung des freien Nagelendes

Die halbkugelige Gestaltung des Nagelendes ist erforderlich, um Konvergenzschwierigkeiten des Kontaktalgorithmus zu vermeiden. Gibt man nun die eingeprägte Verlagerung der Kontaktfläche vor, so ergibt sich die Verformung des Nagels als Resultat. Die Umkehrung dieser Beziehung liefert im Wesentlichen das gewünschte Arbeitsblatt. Die folgenden Bilder zeigen den Verlauf des Biegevorgangs für einen Nagel mit Durchmesser 2mm, Länge 400mm (symmetrisiert 200mm).

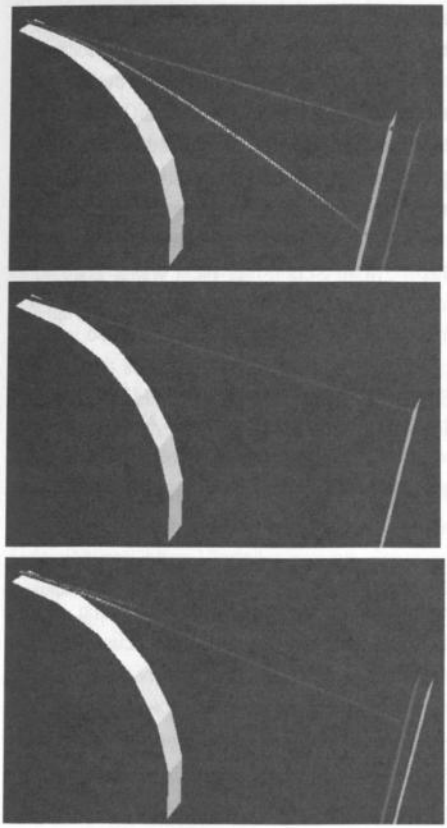


Abb. 5: Vorbiegung

Die drei Darstellungen in Abb. 5 verdeutlichen das Prinzip. In der Ausgangsposition oben erkennt man die viertelkreisförmige Scha-blone sowie rechts die bewegliche Kontaktfläche, deren Zustellung indirekt die gewünschte Biegung erzeugt. In den folgenden Darstellungen bleibt dieser Zustand zur Verdeutlichung eingeblendet.

Das mittlere Bild zeigt das Ende der Zustellung der beweglichen Fläche. Die maximale Biegung ist erreicht; die bewegliche Fläche wird zurückgezogen. Nach Abschluss dieses Vorgangs ist das Nagelende wieder frei, und man kann im unteren Bild die bleibende Verformung erkennen.

5.2. Nagelpositionierung

Bei der Positionierung handelt es sich um einen kinematischen Vorgang mit elastischen Anteilen. Eine realistische Modellierung erweist sich als sehr aufwendig, weil einerseits mehrere Kontakte zwischen verformbaren Komponenten – Nagel, Knochen – zu berücksichtigen sind und andererseits die vorverformte Nagelgeometrie fast frei im Markraum zu positionieren ist. Dies beinhaltet nicht nur translatorische, sondern auch rotatorische Freiheitsgrade einschließlich der durch den Operateur ausgeführten Bewegung, die ihrerseits nicht exakt vorhersagbar ist, da sie von der patientenindividuellen Knochengeometrie und der Lage und Art der Fraktur abhängt.

Daher musste eine vereinfachte Vorgehensweise gefunden werden.

Wie schon bei der Biegung wird auch hier Symmetrie des Nagels vorausgesetzt. Dementsprechend sollte auch die Frakturlage symmetrisch angenommen werden. Anstelle

einer den realen Verhältnissen angepassten Positionierung wird der vorgebogene Nagel in der Simulation zwischen zwei knochenartigen Ersatzstrukturen gehalten. Dazu wird für das freie Nagelende ein Kontaktkörper definiert, der die elastischen Eigenschaften der compacta hat und im Wesentlichen raumfest gefesselt ist. Ein weiterer Kontaktkörper mit den gleichen Materialeigenschaften wird nun zum Scheitelpunkt der Biegung verschoben. Sobald hier Kontakt eintritt, führt der Nagel eine Starrkörperbewegung bis zum Kontakt mit dem oben definierten Körper. Bei weiterer Verlagerung werden elastische Verformungen des Nagels und der beiden Knochenersatzkörper auftreten. Die Verlagerung des beweglichen Kontaktkörpers wird weitergeführt, bis der Abstand der beiden Körper den Abmessungen des Markraums entspricht. Aus Platzgründen kann dieser zweite Schritt hier nicht weiter ausgeführt werden.

5.3. Nagelbelastung

Auf die Simulation der Belastung des Nagels „unter Betriebsbedingungen" wird im Rahmen der hier angestellten Untersuchungen verzichtet, obwohl gerade hierbei ein Abgleich mit den Messergebnissen aus der Arbeit von Lippeck und Schlacht möglich wäre. Praktisch steht dem jedoch die erhebliche Vereinfachung des Simulationsmodells im Wege, die zur Zeit eine echte Verifikation ausschließt.

6. Auswertung

Die Abhängigkeit der maximalen Verlagerung des freien Nagelendes in y-Richtung, die im Wesentlichen der Scheitelhöhe der Biegelinie entspricht, von der maximalen Zustellung der beweglichen Kontaktfläche („Hand") ist in erster Näherung linear. Dies gilt insbesondere für den Scheitelhöhenbereich zwischen 5mm und 25mm. Der kindliche Femur weist typisch damit korrespondierende Markraumdurchmesser in der Umgebung von 15mm auf [2], so dass hier in der Tat linear interpoliert werden kann.

Tabelle 1: Scheitelhöhen (alle Einheiten mm)

Zustellung	5	6	8	10	12	15
Höhe	0.05	1.6	7.04	12.6	17.9	25.2

7. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der FEM-Analysen kann man demonstrieren, dass sich Arbeitsblätter erstellen lassen, die dem Orthopäden Hinweise geben, in welcher Weise ein Nancy-Nagel in Abhängigkeit von den Dimensionen des Markraums vorverformt werden sollte. Aus Gründen der Einfachheit wurden die Untersuchungen auf den symmetrischen Fall beschränkt, welcher im Wesentlichen auch den experimentellen Untersuchungen zugrunde lag. Ein späterer Abgleich mit dem Messergebnissen ist damit grundsätzlich auch möglich.

Als problematisch haben sich die Grenzen der numerischen Modellierung herausgestellt. Eine realitätsnahe Beschreibung der von einen Menschen vorgenommenen Biegung ist mit den zur Zeit verfügbaren Softwareprodukten kaum möglich, da sich die Handkraft, insbesondere bei der Einleitung von Momenten, nicht befriedigend erfassen lässt. Einen weiteren offenen Punkt stellt die Simulation der Nancy-Nagelung unter Betriebsbedingungen dar: Hier müssten zusätzlich muskuläre Reaktionen berücksichtigt werden; ein verspannter Knochen ist keinesfalls als starres System mit den üblichen mechanischen Fest- und Loslagern zu betrachten.

In den nächsten Untersuchungen ist vor allem das Biegewerkzeug näher zu betrachten, über das bislang keine Informationen vorliegen. Anstelle des aus Gründen der vereinfachten Modellierung genutzten Viertelkreises als Schablone sind Formen vorstellbar, bei denen das Resultat der Biegung weniger einem parabolischen Bogen als vielmehr einer Korbbogenkontur nahe kommt, welche weit mehr den Darstellungen zur Operationstechnik entspricht.

8. Dank

Es soll nicht versäumt werden, den mittelbar und unmittelbar Beteiligten für ihre Unterstützung zu danken. Hier ist an erster Stelle Hans Friedrich Bär zu nennen, dem während seiner medizinischen Ausbildung die interessanten biomechanischen Eigenschaften der Nancy-Nagelung aufgefallen sind, woraus sich letztlich der Anstoß für die in einem durch den Autor betreuten konstruktiven Entwurf durchgeführten Messungen ergab. Den beiden Bearbeitern, André Lippeck und Thorsten Schlacht, gebührt Dank für diese grundlegenden Untersuchungen. Zu danken ist schließlich Ulrich Milz von der Stryker GmbH & Co KG in Duisburg, der durch die Bereitstellung von Datenblättern und persönliches Engagement wertvolle Beiträge zum Gelingen dieser Arbeit erbracht hat.

9. Literatur

[1] Ligier, JN, Métaizeau, JP, Prévot, J, Lascomes, P: Elastic stable intramedullary nailing of femoral shaft fractures in children.
Z. Kinderchir. 1985, 40, pp. 209-212

[2] Lippeck, A., Schlacht, T.: Konstruktionssystematische und experimentelle Untersuchungen eines nicht-linearen Osteosyntheseverfahrens.
Konstruktiver Entwurf, Ruhr-Universität Bochum, 1995

[3] Métaizeau, JP: L'embrochage des fractures du membre chez l'enfant.
Maîtrise Orthopédique 116, September 2002

[4] http://www.stryker.de/

[5] Stryker GmbH Co KG: Metaizeau Pediatric Nailing System. Operative Technique.
Firmenbroschüre Stryker Trauma, Ref No B0 200 001

[6] Heinemann, G.: Virtuelle Bestimmung des Verfestigungsverhaltens von Bändern und Blechen durch verformungsinduzierte Martensitbildung bei metastabil rostfreien austenitischen Stählen.
Diss. ETH Zürich 2004

Leichtbau durch Einsatz von Topologieoptimierung

Andreas Dörnhöfer[1], Frank Rieg[1], Hans-Rainer Kröninger[2]

1. Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

2. BMW Group

Kurzfassung

Die Erschließung neuer Leichtbaupotentiale gewinnt für die Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung – Leichtbau trägt entscheidend zur Reduzierung des CO_2-Flottenverbrauchs bei. Neben dem Stoffleichtbau ist der Formleichtbau ein bedeutender Ansatz, um gewichtsoptimierte Konstruktionen zu generieren. Eine Methode zur Entwicklung optimaler Bauteilgeometrien ist die Topologieoptimierung. Deren Integration in einer virtuellen Prozesskette zusammen mit CAD, FEA und Gießsimulation reduziert zudem die Entwicklungszeit bei der Konstruktion von gewichtsreduzierten Gussbauteilen. Die gesamte Prozesskette wird anhand des konkreten Beispiels eines Lenkhilfepumpenhalters betrachtet.

1. Einleitung

Gestiegene Komfort- und Sicherheitsansprüche stellen im Automobilbau eine immer größere Herausforderung im Hinblick auf ein geringes Fahrzeuggewicht dar. Da nach [4] durch Gewichtsreduktion bei Kraftfahrzeugen eine signifikante CO_2-Emissionsminderung erreicht werden kann, ist die Generierung weiteren Leichtbaupotentials aus ökologischen und ökonomischen Gründen jedoch unumgänglich. Um eine gleichbleibende oder sogar steigende Funktionalität von Bauteilen mit der Reduktion von Gewicht zu verbinden, ist neben Stoffleichtbau, der eine Substitution des verwendeten Werkstoffes vorsieht, auch Formleichtbau möglich [3]. Letzterer zeichnet sich durch eine für den Anwendungsfall und die Belastung optimale Geometrie des Bauteils aus.

Neben der Gewichtsreduktion rückt bei der Konstruktion von Kraftfahrzeugen besonders die Verkürzung der Entwicklungszeiten, der Time to Market, in den Vordergrund. Ziel der modernen Produktentwicklung ist es, die notwendige Anzahl an Iterationen entlang der Phasen des Planungs- und Konstruktionsprozesses [8] zwischen Konstruktion und Versuch und damit die gesamte Entwicklungszeit zu reduzieren. Dies gelingt nur durch Anwendung der virtuellen Produktentwicklung in einer intelligenten Prozesskette.

Ein Mittel zur Annäherung an die optimale Bauteilgeometrie im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung und Simulation ist die Methode der Topologieoptimierung. Am konkreten Fallbeispiel eines gegossenen Lenkhilfepumpenhalters eines Fahrzeugs der BMW Group wird die komplette Prozesskette bei Anwendung der Topologieoptimierung durchlaufen. Zusätzlich zum Formleichtbau kommt hierbei auch der Stoffleichtbau durch Materialsubstitution zum Tragen. Die dargestellten Arbeiten werden im Rahmen des Projekts „Metallverbunde" durch die Bayerische Forschungsstiftung gefördert.

2. Grundlagen der Optimierung

Optimierung im engeren Sinn ist nach der Definition des Begriffs ein „Teilgebiet der numerischen Mathematik, das sich mit der optimalen Festlegung von Größen, Eigenschaften, zeitlichen Abläufen u. a. eines Systems unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Nebenbedingungen befasst" [6]. Bei der Konstruktion von optimierten Bauteilen besteht die Aufgabe darin, eine Zielfunktion zu definieren und diese unter Veränderung von Designvariablen zu minimieren oder zu maximieren. Zielfunktion kann z. B. die Eigenfrequenz oder die Steifigkeit des Bauteils sein. Dieser Prozess geschieht unter Berücksichtigung von Randbedingungen, die die Restriktionen der Optimierung darstellen [7]. Eine Lösung des Problems ist mit folgenden Strategien möglich:

- Diskrete Suche
- Mathematische Programmierung
- Heuristische Algorithmen
- Optimalitätskriterien

Zur Formoptimierung von Bauteilen werden besonders die mathematische Programmierung und die Optimalitätskriterien verwendet. Der Unterschied liegt dabei in der Strategie zum Erreichen des Optimierungsziels. Optimierungsverfahren zum Bauteilentwurf basieren auf der Finite Elemente Analyse (FEA) und werden als CAO-Verfahren (Computer Aided Optimization) bezeichnet [5]. Je nachdem, welche Parameter zur Optimierung verändert werden können, lassen sich drei Typen der Optimierung unterscheiden, die auch an verschiedenen Stellen der Prozesskette zum Einsatz kommen [2]:

- Topologieoptimierung: Die Steifigkeit der Finiten Elemente (FE) des Bauteilmodells wird in Form einer Dichtefunktion angepasst.
- Gestaltoptimierung: Die Knotenkoordinaten an der Oberfläche des FE-Netzes werden verschoben.
- Sickenoptimierung: Die Knotenkoordinaten an der Oberfläche des FE-Netzes von Blechteilen werden in Gestalt von Sicken verschoben.

Topologieoptimierung geht von einem Bauraum mit nur begrenzt kreativ-konstruktiver Vorarbeit aus und kommt in einem frühen Stadium der Prozesskette zum Einsatz, während die Gestaltoptimierung zur Spannungsreduktion am Ende der Prozesskette eingesetzt wird.

3. Topologieoptimierung als Teil der Prozesskette

Der Schritt der Topologieoptimierung darf bei der Entwicklung von Bauteilen unter dem Aspekt des Formleichtbaus nicht nur separiert betrachtet werden. Er ist vielmehr im Hinblick auf die Verkürzung der Produktentwicklungszeiten als Teil einer virtuellen Prozesskette zu sehen. Das dabei verwendete Verfahren ICROS (Intelligent CROss-linked Simulations) verknüpft zielgerichtet vorhandene Simulationsprogramme [1]. Ein Beispiel für die Anwendung von ICROS für die Konstruktion von Leichtbau-Gussteilen mittels Optimierungsverfahren ist in Abbildung 1 dargestellt. Entlang dieser Prozesskette findet die Entwicklung vom zur Verfügung stehenden Bauraum bis zum gussoptimierten Bauteil statt.

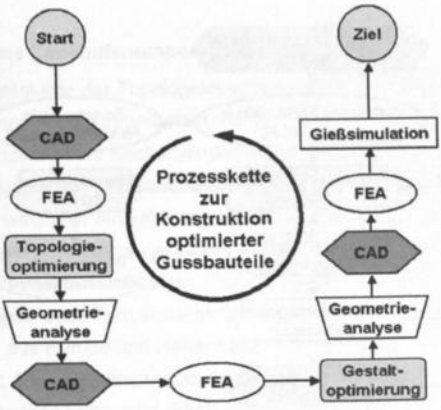


Abbildung 1: Prozesskette zur Konstruktion optimierter Gussbauteile

Neben 3D-CAD-Systemen kommen FE-Software mit Solver, Prä- und Postprozessor, das CAO-Paket mit Topologie- und Gestaltoptimierung, Werkzeuge zur Geometrieanalyse sowie die Gießsimulation zum Einsatz. Dabei müssen die generierten Daten je nach Prozessschritt in verschiedenen Formaten zwischen Programmpaketen ausgetauscht werden. Der Durchlauf und die Übergabe erfolgen z. T. iterativ. Als Beispiel dafür kann die Topologieoptimierung mit nachgeschalteter Geometrieanalyse genannt werden, bei der die Iteration durch eine konstruktive Bewertung des Ergebnisses gesteuert wird. Eine detaillierte Darstellung der Abläufe zeigt die Teilprozesskette nach Abbildung 2, entlang derer das Fallbeispiel konstruiert wurde. Die gewählte Software steht exemplarisch für geeignete Systeme. Nach der Erstellung des Bauraummodells im CAD-System Pro/ENGINEER erfolgt der Import in den FE-Präprozessor ABAQUS/CAE und hier die Vernetzung und der Aufbau des gesamten Berechnungsmodells.

Nach Testläufen können Optimierungsziele und Randbedingungen für die Optimierung im Präprozessor des Topologieoptimierungsprogramms TOSCA berücksichtigt werden. TOSCA führt bis zum gewählten Konvergenzkriterium Berechnungsschleifen mit dem Solver von ABAQUS durch. Nach Ende des Optimierungslaufs können die Ergebnisse in TOSCA.smooth optisch aufbereitet und in Rhinoceros analysiert werden. Hält die optimierte Form nicht der konstruktiven Bewertung stand, so wird der gesamte Schritt der Topologieoptimierung erneut unter veränderten Randbedingungen durchlaufen.

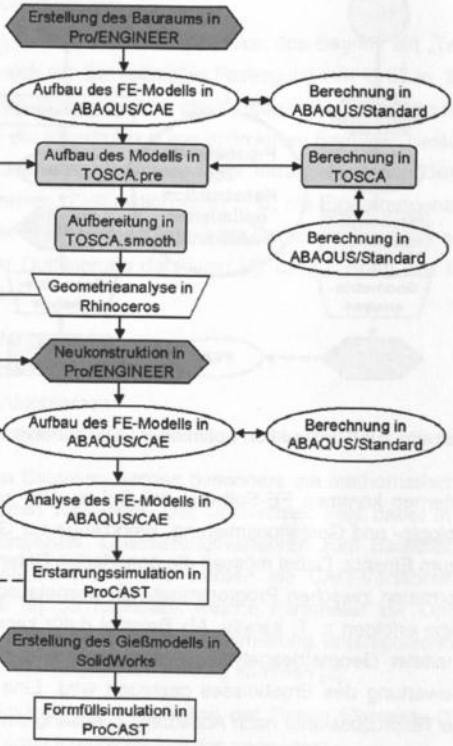


Abbildung 2: Detaillierte Teilprozesskette

Erst bei positiver Bewertung kommt es zum Export der Daten und zur Neukonstruktion des Bauteils durch den Konstrukteur in Pro/ENGINEER. Eine direkte Verwendung der exportierten Daten aus der Optimierung in den späteren Prozessschritten ist aufgrund von Exportschwierigkeiten und schlechter Übertragbarkeit der Optimierungsergebnisse derzeit nur eingeschränkt möglich. Anstelle der Gestaltoptimierung zur Senkung der Kerbspannungen des neukonstruierten Bauteils kommt bei der Teilprozesskette nach Abbildung 2 eine manuell durchgeführte Iteration, bestehend aus Finite Elemente Analyse mit verschiedenen Lastfällen und anschließender Veränderung der Neukonstruktion zum Einsatz. Für die gusstechnische Auslegung des Bauteils schließen sich Erstarrungs- und Formfüllsimulation in ProCAST an. Die optimale Anschnittposition kann hierbei in mehreren Iterationsschritten aus CAD-Konstruktion und Simulation festgelegt werden. Eine Übergabe von Daten zu auftretenden Eigenspannungen nach dem Guss aus der Erstarrungssimulation in die FEA ist möglich.

4. Optimierung eines Lenkhilfepumpenhalters

Um die erläuterte Prozesskette der Topologieoptimierung in der Praxis an einem konkreten Bauteil anzuwenden, wird in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner BMW Group der vordere Lenkhilfepumpenhalter eines Sechszylinder-Reihenmotors betrachtet. Die Lenkhilfepumpe, die den Druckaufbau für die Servolenkung gewährleistet, ist mit zwei Haltern an der Ölwanne befestigt und wird über eine Riemenscheibe angetrieben. Die Auslegung des Halters erfolgt nach mehreren Anforderungen: Zum einen muss er der statischen Last des Riemens und dynamischen Lasten standhalten. Dies können z. B. Beschleunigungen aufgrund von Riemenschwingungen sein. Zum anderen muss sichergestellt werden, dass die Eigenfrequenz des Systems aus Pumpe und Halter bei der Anbindung an den Motor in einem unkritischen Bereich liegt. Die Lenkhilfepumpe, die in erster Näherung als ein Einmassenschwinger betrachtet werden kann, wird durch die Vibrationen des Motors und des Riemens im Betrieb zu Schwingungen angeregt. Diese können bei Annäherung an die Eigenfrequenz zum Bauteilversagen führen. Aufgrund dessen ist das vorrangige Optimierungsziel eine erste Eigenfrequenz von mindestens 380 Hz für das Gesamtsystem aus Lenkhilfepumpe, Haltern, Ölwanne und Bedplate. Ein FE-Gesamtmodell der genannten Komponenten ist in Abbildung 3 dargestellt. Ölwanne und Bedplate sind zur Minimierung der Rechenzeit gekürzt, der Pumpenrotor ist als Zusatzmasse punktförmig im Pumpengehäuse modelliert, um die Abbildungsgenauigkeit des Modells zu erhöhen. Aus Bauraumgründen durchläuft nur der vordere Halter, der der Riemenscheibe zugewandt ist, die Prozesskette der Topologieoptimierung, der hintere Halter wird in Stahlblech ausgeführt.

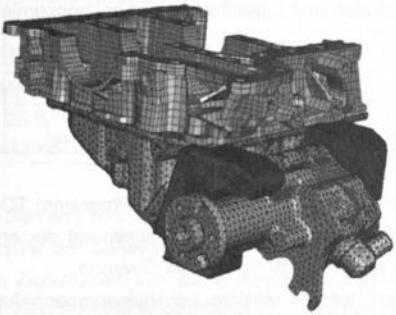


Abbildung 3: FE-Gesamtmodell

Der Ursprungsbauraum des vorderen Halters, der den Ausgangszustand vor der Optimierung widerspiegelt, ist in Abbildung 4 dargestellt. Er liegt als CAD-Modell in Pro/ENGINEER vor und wird in den FE-Präprozessor ABAQUS/CAE exportiert. Dort erfolgt der Einbau in das Gesamtmodell sowie die Vernetzung mit sehr hoher Elementdichte. Der Grund dafür liegt im Verfahren der Topologieoptimierung begründet. Dabei werden einzelne Elemente des Bauraums ausgeblendet. Je höher die Elementanzahl im Bauraum, desto größer wird die Güte der Optimierungsläufe. Zur Begrenzung des Rechenaufwands kommen für den Optimie-

rungsschritt Tetraeder mit linearem Elementansatz zur Anwendung. Zur Abschätzung der Größenordnung der ersten Eigenfrequenz des Gesamtmodells mit unoptimiertem Bauraum und zum Test der Funktionsfähigkeit des FE-Modells wird vor der Topologieoptimierung eine Eigenfrequenzanalyse mit ABAQUS durchgeführt. Als Werkstoffe für den Lenkhilfepumpenhalter kommen in den Simulationen zum Vergleich je eine herkömmliche Aluminium- und Magnesiumgusslegierung sowie eine Magnesiumlegierung mit Partikelverstärkung zum Einsatz. Stoffleichtbau wird durch Substitution der Aluminiumlegierung mit einer der beiden Magnesiumvarianten mit geringerer Dichte realisiert.

Abbildung 4: Bauraum des vorderen Lenkhilfepumpenhalters

Für den Extremfall, dass der vordere Halter den kompletten Bauraum einnimmt, ergeben sich erste Eigenfrequenzen, die deutlich über der Zielvorgabe von 380 Hz liegen. Sie sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften und Eigenfrequenzen bei unoptimiertem Bauraum

	E-Modul	Dichte	1. Eigenfrequenz
Al-Legierung	72.000 N/mm²	2,69 g/cm³	459 Hz
Mg-Legierung	45.000 N/mm²	1,74 g/cm³	432 Hz
Verstärkte Mg-Legierung	54.500 N/mm²	1,92 g/cm³	444 Hz

Die eigentliche Topologieoptimierung erfolgt mit dem Programm TOSCA unter Ansteuerung des ABAQUS-Solvers. Optimierungsziel ist die Maximierung der ersten Eigenfrequenz des Gesamtmodells aus Haltern, Pumpe, Bedplate und Ölwanne.

Als Designvariable existiert nur der vordere Lenkhilfepumpenhalter mit einem definierten Zielvolumen. Die Flanschflächen um die Verschraubungen sind bei allen Optimierungsläufen eingefroren. Nach 30 bis 40 Iterationsschritten wird mit TOSCA in Verbindung mit dem ABAQUS-Solver ein Optimierungsergebnis erreicht. Dieses kann mit dem Postprozessor TOSCA.post betrachtet werden (Abbildung 5, unten). Eine Beurteilung der Ergebnisse in diesem Stadium nur schwer möglich, da noch keine scharfe Berandung des Bauteils existiert. Erst ein Export der Daten und die Verarbeitung im Programm TOSCA.smooth, das eine optische Grenze der Oberfläche je nach gewählten Parametern setzt sowie eine Verrundung durchführt, gestattet die Sichtkontrolle des Optimierungslaufs (Abbildung 5, rechts). Die Wahl der Verrundungsparameter hat großen Einfluss auf das Ergebnis und muss daher je nach

gewünschtem Zielvolumen und Erfahrung des Konstrukteurs in einem iterativen Prozess durchgeführt werden. Eine abschließende Analyse des tatsächlich erreichten Zielvolumens bei komplexeren Modellen ist erst nach dem Export in ein CAD/Analyse-Programm wie Rhinoceros möglich.

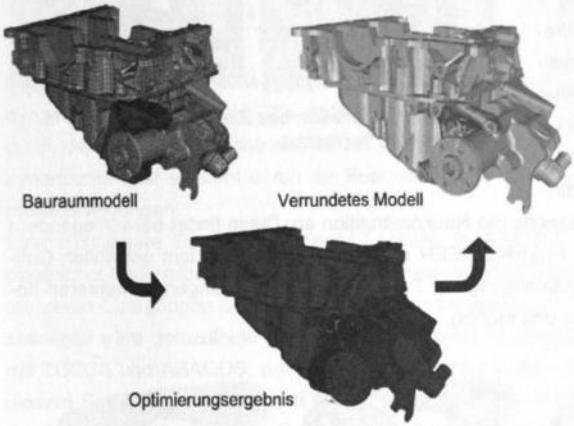


Abbildung 5: Vom Bauraummodell über das Optimierungsergebnis zum verrundeten Modell

Hier können die Daten des vorderen Pumpenhalters vom Restmodell separiert, visualisiert und bezüglich Volumen und Oberfläche analysiert werden. Ein Beispiel für das optimierte Bauteil in diesem Stadium findet sich in Abbildung 7, links. Als variabler Parameter während der Optimierung in TOSCA dient bei festgelegten Lastfällen und Optimierungszielen neben dem Werkstoff in erster Linie das Zielvolumen. Dieses wird für die Optimierung des Pumpenhalters zwischen 25 % und 30 % des Bauraumvolumens gewählt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Eigenfrequenzen des Bauteils nach der Topologieoptimierung

	Verst. Mg-Legierung	Verst. Mg-Legierung	Mg-Legierung	Al-Legierung
Zielvolumen	25 %	30 %	30 %	30 %
1. Eigenfrequenz	413 Hz	421 Hz	405 Hz	438 Hz

Mit 30 % des Bauraumvolumens wird bereits bei der Verwendung einer unverstärkten Magnesiumlegierung mit 405 Hz der Zielwert von 380 Hz überschritten. Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass bei einem Zielvolumen von 25 % jedoch eine statisch bestimmte Aufteilung des Gesamtbauraums in zwei Einzelteile stattfindet. Da dies nicht gewünscht ist, kommt für die nachfolgenden Prozessschritte nur noch ein Zielvolumen von 30 % zur Anwendung. Zusätzlich können bei dem Topologieoptimierungsschritt mit TOSCA auch zahlreiche gusstechnische Fertigungsrandbedingungen berücksichtigt werden. Diese bringen bei dem komplexen Gesamtmodell jedoch nur zum Teil ein zufriedenstellendes Ergebnis. Eine Berücksichtigung findet daher durch den Konstrukteur direkt beim Prozessschritt der Neukonstruktion statt.

Das nach zahlreichen Iterationen der Topologieoptimierung erhaltene Bauteil für die weitere Verwendung in der Prozesskette mit Zielvolumen 30 % ist in Abbildung 7 links dargestellt. Die Eigenfrequenzen des Systems mit optimiertem Lenkhilfepumpenhalter und verschiedenen Werkstoffen sind in Tabelle 2 aufgeführt. An den Schritt der Topologieoptimierung schließt sich in der Prozesskette die Neukonstruktion an. Diese findet bei vorliegendem Beispiel mit dem CAD-System Pro/ENGINEER unter Orientierung an dem gewählten Optimierungsergebnis sowie Berücksichtigung der Fertigungsrandbedingungen in mehreren Iterationen statt (Abbildung 7, Mitte und rechts).

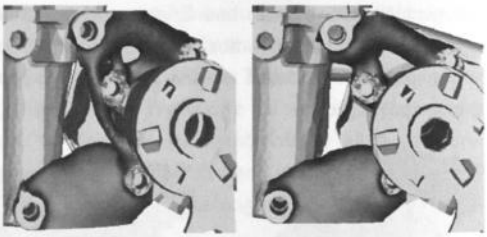
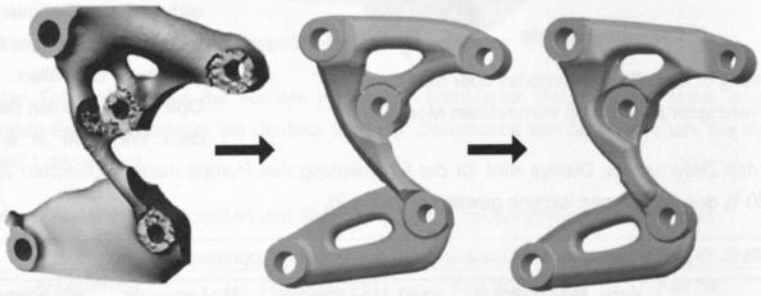


Abbildung 6: Variation des Zielvolumens von 30 % (links) auf 25 % (rechts)



Optimiertes Bauteil Neukonstruktion V1 Neukonstruktion V4

Abbildung 7: Vom optimierten Bauteil zur Neukonstruktion

Zur Ermittlung der Eigenfrequenz der Neukonstruktion wird das Bauteil aus dem CAD-System wieder zurück in den FE-Präprozessor ABAQUS/CAE exportiert, dort in das Gesamtmodell eingebaut und vernetzt. Die Berechnung für unverstärktes Magnesium liefert mit 384 Hz für die Neukonstruktion gegenüber 405 Hz für das Optimierungsergebnis einen deutlich niedrigeren Wert, der jedoch immer noch über der Mindestanforderung von 380 Hz liegt (Tabelle 3). Grund dafür ist neben der Berücksichtigung der Fertigungsrandbedingungen die unvermeidbare Geometrieabweichung im Vergleich zum Ergebnis der Topologieoptimierung sowie eine weitere manuelle Reduktion des Zielvolumens auf 24 % des Originalbauraums bei der Neukonstruktion. Durch die Verwendung partikelverstärkten Magnesiums könnte die Eigenfrequenz um 8 Hz angehoben werden, wobei aufgrund der etwas höheren Dichte des Werkstoffs die Masse des Bauteils um 12 g zunehmen würde.

Tabelle 3: Bauteilmasse und Eigenfrequenz der Neukonstruktion

	Al-Legierung	Mg-Legierung	Verstärkte Mg-Legierung
Bauteilmasse	173 g	111 g	123 g
1. Eigenfrequenz	414 Hz	384 Hz	392 Hz

In der Prozesskette schließt sich die Analyse des Bauteils mit verschiedenen statischen bzw. dynamischen Lastfällen an. Die statische Hauptbelastung des Lenkhilfepumpenhalters wird durch die Kraft des Riementriebs auf die Riemenscheibe der Lenkhilfepumpe verursacht, die dynamische Last entsteht durch die Beschleunigung der Pumpenmasse aufgrund von Riemenschwingungen.

Eine nichtlineare Berechnung dieser Lastfälle in ABAQUS unter Verwendung elastisch-plastischer Materialgesetze mit einem Magnesiumhalter zeigt in der Neukonstruktion V1 an mehreren Übergängen unzulässig hohe Spannungsspitzen. Der nächste Schritt in der Prozesskette wäre demzufolge die Durchführung einer Gestaltoptimierung der Neukonstruktion mit TOSCA und ABAQUS, bei der die Außenkontur spannungssenkend angepasst wird. In diesem Beispiel wird jedoch auf diesen Prozessschritt verzichtet und die Spannungsspitze durch Verwendung größerer Radien manuell gesenkt. Ergebnis ist die Neukonstruktion V4 (Abbildung 7).

Den Übergang zur Bauteilfertigung im Guss stellen in der Prozesskette die Erstarrungs- und Formfüllsimulation dar (Abbildung 8). Beide wurden beim Projektpartner Neue Materialien Fürth GmbH mit dem Programmpaket ProCAST durchgeführt. Ziel dieser Schritte in der Prozesskette ist die optimale gusstechnische Auslegung des Bauteils. Gerade bei den verwendeten Leichtmetallgusswerkstoffen kommt der Füllungssimulation eine große Bedeutung zu. Ziel dieser Prozessschritte ist eine geeignete Anschnittpositionierung für eine optimale Formfüllung des Bauteils.

Abbildung 8: Simulation der Formfüllung mit ProCAST [Neue Materialen Fürth]

5. Zusammenfassung

Durch die Anwendung der Topologieoptimierung in einer virtuellen Prozesskette nach der ICROS-Methode konnte an dem Fallbeispiel Lenkhilfepumpenhalter eine Gewichtsreduktion um 76 % gegenüber dem ursprünglichen Bauraummodell erzielt werden. Die Substitution der Aluminiumgusslegierung durch einen verstärkten oder unverstärkten Magnesiumwerkstoff würde als Beispiel des Stoffleichtbaus eine weitere Verringerung des Bauteilgewichts bewirken. Für den Einsatz im Fahrzeug ist die Eigenfrequenz der gesamten Baugruppe die entscheidende Auslegungsgröße des Bauteils. Diese Auslegungsgrenze wird auch nach der Optimierung und der Materialsubstitution ebenso wie der Festigkeitsnachweis bei verschiedenen Lastfällen erfüllt. Die aufgezeigte Prozesskette ist ein geeignetes Mittel zur Verbesserung der Eigenschaften von Leichtbaukonstruktionen. Mit einem strukturierten und konsistenten Ablaufplan von der ersten CAD-Konstruktion bis zur Gießsimulation erlaubt sie die Einsparung von Entwicklungszeit aufgrund der Reduzierung von Iterationen zwischen Konstruktion und Versuch. Große Bedeutung kommt dem Austausch der Daten zwischen den verschiedenen Schritten und Programmpaketen der Prozesskette zu. Hier zeigt sich Bedarf für zukünftige Entwicklungen und Verbesserungen. So ist der Übergang von der Topologieoptimierung zur Neukonstruktion derzeit nur durch erneute Neumodellierung des Bauteils durch den Konstrukteur unter qualitativer und fachlicher Bewertung der Ergebnisse möglich. Eine automatisch ablaufende Prozesskette und damit ein automatisierter Bauteilentwurf in Abhängigkeit von Bauraum und Belastung ist daher noch nicht möglich.

6. Literatur

[1] Alber, B.; Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Bauteilentwicklung mit Hochleistungskunststoffen - Intelligent vernetzte Simulationen mit anschließender Versuchsverifikation. In: 33. Tagung DVM-Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, Bd. DVM Berichtsband 133, e.V., D. V. f. M. (Hrsg.). Steyr, Österreich: 2006, S. 13-22.

[2] Allinger, P.: TOSCA Basis Seminar. FE-Design GmbH, Karlsruhe: 03/2006.

[3] Haldenwanger, H.-G.: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von Pkw-Rohkarosserien. (Diss.) TU Dresden, 1997.

[4] Haldenwanger, H.-G.: Leichtbau und Recycling im Automobilbau. Skriptum zur Vorlesung an der Universität Bayreuth, Bayreuth: 2007.

[5] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. 5. Auflage, Braunschweig: Vieweg-Verlag, 2001.

[6] Kraif, U.: Duden - Fremdwörterbuch. 8. Auflage, Mannheim: Dudenverlag, 2005.

[7] Nickel, N.; Schmidl, M.: Topologie- und Shapeoptimierung in der Produktentwicklung aus der Sicht eines Automobilzulieferers. In: ABAQUS-Anwendertreffen. Fulda: 2003.

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

[9] Rieg, F.; Hackenschmidt, R.: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2003.

Simulationswerkzeuge für die Optimierung von Beveloidverzahnungen

Heiko Alxneit, Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Kurzfassung

Beveloidverzahnungen bieten für Getriebe mit kleinen Achsenkreuzungswinkeln eine kostengünstige Alternative zu Kegel- oder Hypoidverzahnungen. Für eine ganzheitliche Optimierung der Beveloidverzahnungen muss zuerst das Übertragungsverhalten optimiert werden, bevor die Verzahnung, wie bei zylindrischen Zahnrädern üblich, auf den Betriebspunkt optimiert werden kann.

Dazu wurde das Programm SimKoS entwickelt, das alle für eine Optimierung notwendigen Arbeitsschritte ermöglicht. Es erzeugt die für die Kontaktsimulation mit Alkaeos verwendeten Punktewolken, verwaltet die bei der Optimierung benötigten Dateien und steuert an verschiedenen Stellen des Optimierungsprozesses unterstützende Visualisierungen an.

Für die Optimierung des Übertragungsverhaltens mittels Konstruktionsempfehlungen wurde ein Modul zur automatischen Erstellung und Auswertung einzelner Beveloidradpaarungen in einer Parameterstudie in SimKoS integriert. Zur Reduzierung der Anzahl an Simulationen wurden Methoden der statistischen Versuchsplanung angewandt, deren Ergebnisse für die Konstruktionsempfehlungen verwendet werden können. Schon bei leichter Variation der Verzahnungsdaten kann das Übertragungsverhalten deutlich verbessert werden.

Für die weitere Optimierung des Übertragungsverhaltens kann in SimKoS die Flankengeometrie nahezu beliebig korrigiert werden. Mit diesen Korrekturen kann der Übertragungsfehler erneut nachhaltig reduziert werden.

Für ein effizienteres Vorgehen bei der Optimierung wurde eine Abwälzsimulation entwickelt. Sie liefert ideal abwälzende Flanken, die für eine Abschätzung der Korrekturgeometrie herangezogen werden kann und somit die Optimierung des Übertragungsverhaltens deutlich vereinfacht.

1. Einleitung

Getriebe mit kleinen Achsenkreuzungswinkeln sind weit verbreitet. Sie werden sowohl in Industriegetrieben als auch in mobilen Anwendungen eingesetzt, wie z. B. in Schiffs- oder in Fahrzeuggetrieben [1].

Bei Kraftfahrzeugen mit Allradantrieb und längs eingebautem Motor muss die Leistung vom Mittendifferential zum Vorderachsdifferential geleitet werden (vgl. Abb. 1). Dafür gibt es auch Lösungen mit parallelen Wellen, die allerdings den Fußraum für Fahrer oder Beifahrer stark einschränken.

Eine Alternative bietet dabei eine leicht geneigte Welle, die Platz sparend am bis zur Kupplung im Durchmesser zunehmenden Getriebe anliegt. Dies ist z. B. mit Kardangelenken rea-

lisierbar, die jedoch aufgrund ihres Konzepts nachteilige Eigenschaften besitzen, wie z. B. Schwingungsanregung, großer Bauraumbedarf und hohe Anzahl von Bauteilen.
Eine einfache konzeptionelle Lösung bieten kegelige Zahnräder, mit denen der Achsenkreuzungswinkel direkt in der Zahnradstufe erzeugt werden kann. Dazu können Kegelräder verwendet werden, die ihre kegelige Form aufgrund des variablen Moduls über der Zahnbreite erhalten. Die Fertigung von Kegelrädern mit kleinem Achsenkreuzungswinkel ist aber unwirtschaftlich, da aus kleinen Kegelwinkeln große Kegellängen und somit große Wälztrommeln resultieren.

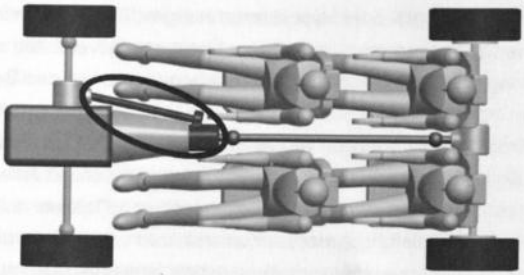


Abb. 1: Beveloidverzahnungen in Kraftfahrzeugen

Um die sich schneidenden Achsen zu realisieren, können konische Stirnräder, auch Beveloidräder genannt, verwendet werden. Diese Zahnräder haben eine kegelige Form aufgrund unterschiedlicher Profilverschiebung über der Zahnbreite. Werden Beveloidräder in Getrieben so angeordnet, dass die Fersen und Zehen jeweils miteinander kämmen, so schneiden sich die Zahnradachsen.
Die zur Herstellung von Beveloidrädern notwendigen Fertigungsverfahren sind heute Stand der Technik.

2. Motivation

Der Einsatz von Beveloidverzahnungen in Getrieben mit kleinen Achsenkreuzungswinkeln wird beeinflusst durch deren Eigenschaften. Den positiven Eigenschaften, wie z. B. der kostengünstigen Herstellung oder dem Ermöglichen kompakter Konstruktionen, stehen grundlegende negative Eigenschaften gegenüber. Da das Verzahnungsgesetz nicht mehr erfüllt wird, ist davon auszugehen, dass im lastfreien Zustand das Übertragungsverhalten während eines Zahneingriffs nicht mehr gleichförmig und der Kontakt der beiden abwälzenden Flanken punktförmig ist.
Die Drehwegschwankungen haben zur Folge, dass angrenzende Bauteile zusätzlich belastet werden sowie zu Schwingungen angeregt werden, die ein erhöhtes Geräuschniveau hervorrufen.

3. Aufgabenstellung

Bisherige Untersuchungen am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design zum Thema Optimierung von Beveloidverzahnungen beschäftigten sich mit der grundlegenden Geometrie [2], [3], mit der Erhöhung der Tragfähigkeit [3], [4] und mit der Reduktion des Schallleistungspegels [4].

Die Optimierung von zylindrischen Stirnrädern auf den Betriebspunkt ist derzeit Stand der Forschung, die Herstellung dieser optimierten Zahnräder Stand der Technik.

Für die ganzheitliche Optimierung konischer Stirnräder muss anders vorgegangen werden. Im Gegensatz zu zylindrischen Stirnrädern ist das Abwälzen im lastfreien Zustand ungleichförmig und der Kontakt punktförmig. Erst wenn das Übertragungsverhalten und der Kontakt von Beveloidverzahnungen im lastfreien Zustand optimiert wurden, kann sich eine weitere Optimierung auf den Betriebspunkt in vollem Umfang auswirken (vgl. Abb. 2).

Abb. 2: Ganzheitliche Optimierung konischer Stirnräder in zwei Stufen

Die Optimierung des Übertragungsverhaltens konischer Stirnräder stellt die erste Stufe einer ganzheitlichen Optimierung dar und kann in zwei Schritte unterteilt werden (vgl. Abb. 3). Zuerst sollen mittels Parameterstudien Konstruktionsempfehlungen erstellt werden. Damit kann der Übertragungsfehler mit einer gezielten Auswahl der Werte einzelner veränderbarer Verzahnungsparameter kosteneffizient reduziert werden. In einem zweiten Schritt soll dann der Übertragungsfehler mittels einer Korrektur der Flankengeometrie minimiert werden.

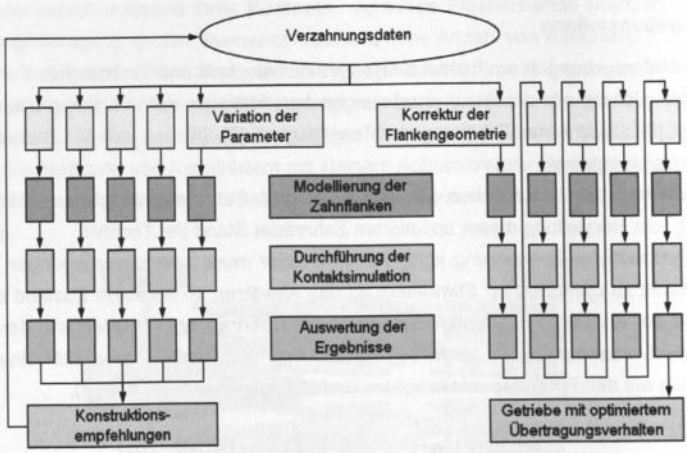


Abb. 3: Vorgehensweise bei der Optimierung des Übertragungsverhaltens konischer Stirnräder

4. Methoden

Das Übertragungsverhalten von Verzahnungen wird bestimmt über die Geometrie der sich im Eingriff befindlichen Flanken. Die für konische Stirnräder typische Klaffung berechnete Wagner in seinem Programm Bevelo [5], das den Abstand der Flanke zum exakten Gegenrad bestimmt. Die Klaffung kann für eine Optimierung der Tragfähigkeit mit einer Hohlkorrektur über der Flankenlinie versehen werden. Die Korrektur über der Flankenlinie ist für die Optimierung des Übertragungsverhaltens von untergeordnetem Interesse, entscheidend wirkt sich die Geometrie in Richtung der Profillinien aus. Da konische Stirnräder im Eingriff keine gemeinsame Berührebene besitzen und der Berührpunkt sich frei im Raum in Abhängigkeit des Wälzwinkels befindet, ist eine analytische Vorgehensweise nicht zweckmäßig. Daher soll der Zahneingriff auf dem Computer simuliert werden.

Aufbauend auf den Verzahnungsdaten müssen die für eine derartige Kontaktsimulation mit dem Programm Alkaeos [6] der Forschungsvereinigung Antriebstechnik notwendige Punktewolken erzeugt werden. Da es für diese Aufgabe keine kommerzielle Software gibt, wurde das Programm SimKoS (Simulationsprogramm für konische Stirnräder) entwickelt.

5. Modellierung der Punktewolken

Ausgehend von den Verzahnungsdaten einer Getriebestufe werden vom Programm SimKoS die Koordinaten von Knoten auf der Zahnflanke berechnet. Die frei wählbare Auflösung ermöglicht dabei ein zielorientiertes Verhältnis von Rechendauer und Genauigkeit und erleichtert somit den Optimierungsprozesses. Für Voruntersuchungen des Übertragungsverhaltens reicht eine geringere Auflösung aus, während für die Verifizierung der Ergebnisse eine höhere Auflösung verwendet werden muss.

Die Punktewolken werden in einer Textdatei als Zahlenkolonnen eines Datenarrays gespeichert. Zusätzlich zu den für die Kontaktanalyse notwendigen Punktewolken der Zahnflanken werden der Kopf- und der Fußbereich modelliert (vgl. Abb. 4). Diese Bereiche werden bei der Zahnkontaktanalyse nicht berücksichtigt und dienen nur der Visualisierung. Sie werden bei der Konvertierung aus dem Array-Dateiformat in das Dateiformat zur Kontaktanalyse ausgeblendet.

6. Datenverwaltung

Die zur Berechnung der Punktewolke verwendeten Daten der beiden Zahnräder werden ebenfalls jeweils in Textdateien abgespeichert. Für den Einbau der Zahnräder in die virtuelle Getriebestufe werden weitere geometrische Größen nach Roth [7] und Zierau [8] berechnet und in Textdateien abgelegt. Für einen besseren Überblick der verwendeten Dateien und deren Abhängigkeiten voneinander wurde in das Programm ein Projektmanager implementiert. Der Projektmanager ermöglicht eine schnelle Dateiauswahl und kontextsensitiven Zugriff auf die Funktionen.

7. Visualisierung

Ein weiteres Modul beschäftigt sich mit der Visualisierung, das sich in vier Aufgabengebiete einteilen lässt. Als erstes soll eine Zahnflanke, ein Zahn, ein Zahnrad oder eine ganze Stirnradstufe zur visuellen Überprüfung graphisch dargestellt werden (vgl. Abb. 4). Zweitens sollen zwei ähnliche Zahnflanken miteinander verglichen werden können (vgl. links). Drittens sollen Korrekturgeometrien auf Flanken nicht nur über Gleichungen beschrieben werden, sondern für ein besseres Verständnis des erzielten Ergebnisses visualisiert werden (vgl. Abb. 10).

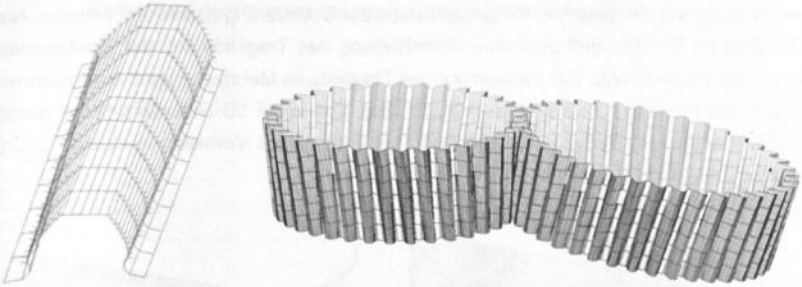


Abb. 4: Visualisierung der Punktewolken eines einzelnen Zahns (links) und zweier Zahnräder im Eingriff (rechts) als 3D-Gitter

Viertens - und wohl der wichtigste Grund für den Einsatz von Visualisierungswerkzeugen - ist die Darstellung der Ergebnisse. Diese liegen nach der Kontaktanalyse in einer wenig anschaulichen Textdatei als Zahlenkolonnen vor. Zum Vergleich der Ergebnisse aus den Parameterstudien sowie für den iterativen Korrekturprozess ist die Visualisierung der Ergebnisse unentbehrlich.

Dazu wurde die freie Software Gnuplot [9] in das Programm SimKoS integriert. Gnuplot ermöglicht die Darstellung von Punktewolken im Raum (vgl. Abb. 6 rechts, Abb. 8 rechts und Abb. 12 rechts) mit zugehörigem Farbverlauf und Echtzeit-Drehbewegung.

8. Parameterstudien

Bei Parameterstudien wird aufgrund der Änderung der Verzahnungsdaten für jede Änderung eines Wertes ein neues Projekt angelegt. In einer ersten mehrdimensionalen Studie wurden als zu variierende Parameter der Modul, das Verhältnis b/d, die Übersetzung, der Schrägungswinkel, der Achsenkreuzungswinkel und die Aufteilung des Profilverschiebungswinkels festgelegt. Bei 6 Parametern á 10 Untersuchungswerten müssen 10^6 Projekte angelegt und jeweils eine Kontaktsimulation durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise lässt sich mit Methoden der statistischen Versuchsplanung wesentlich effizienter gestalten (vgl. [10]). Danach kann die Simulation des Mittenprojekts und zweier Randwerte eines Parameters zur Ermittlung aussagekräftiger Ergebnisse ausreichen.
Um die Durchführung von Parameterstudien zu vereinfachen, wurde ein Modul in SimKoS implementiert, das automatisch Projekte anlegt, die Kontaktsimulation durchführt und anschließend auswertet. Es können auch einzelne Projekte ausgewählt, geändert und um Korrekturgeometrien ergänzt werden.

9. Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung eines einzelnen Projekts erfolgt anhand des Tragbilds und des Übertragungsverhaltens. Die Tragbilder lassen sich als 2D-Darstellung der Flanke mit Farbverlauf der Klaffung oder als 3D-Gitter darstellen. Mit der Darstellung der Farbverläufe sind die Ergebnisse der Kontaktsimulation sehr verständlich und einfach zu deuten [1]. An einer Beispielverzahnung soll die generelle Vorgehensweise der Optimierung geschildert werden. Aus dem Tragbild im Einzeleingriff geht eine Verschiebung des Tragbilds aus der Flankenmitte heraus hin zur Ferse hervor. Der Farbverlauf des Tragbilds im Mehrfacheingriff lässt mehrere Sprünge in der Klaffung erkennen (vgl. Abb. 5). Dies wird in der 3D-Gitterdarstellung bestätigt. Im Diagramm des Übertragungsverhaltens resultiert dieses Verhalten in einem Sprung im Übertragungsfehler von annähernd 800 µrad (vgl. Abb. 6).

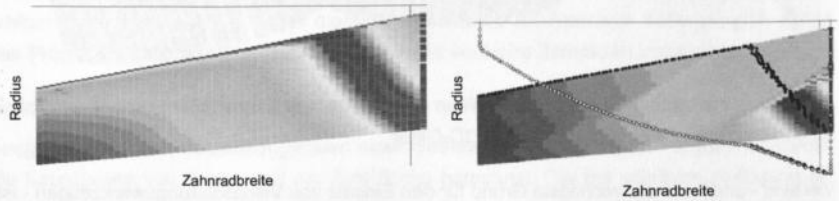


Abb. 5: Tragbilder im Einzeleingriff (links) und im Mehrfacheingriff (rechts) als 2D-Farbverlauf der unkorrigierten Paarung

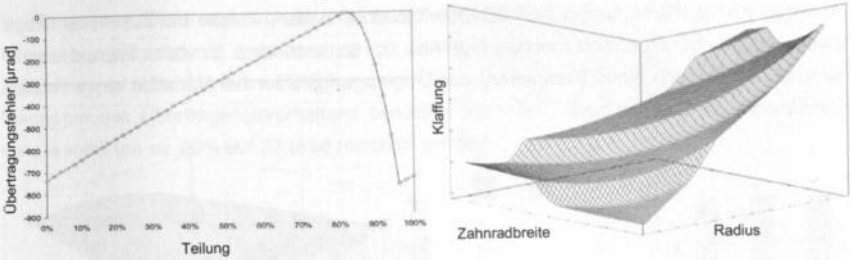


Abb. 6: Übertragungsverhalten (links) und Tragbild im Mehrfacheingriff als 3D-Gitter (rechts) der unkorrigierten Paarung

Aufgrund der Ergebnisse der Parameterstudie wurde nun der Schrägungswinkel in SimKos verändert und damit ein deutlicher Rückgang des Übertragungsfehlers um mehr als 50% auf 360 µrad erreicht (vgl. Abb. 8). Außerdem wurde das Tragbild im Einzeleingriff in die Mitte der Flanke gerückt (vgl. Abb. 7).

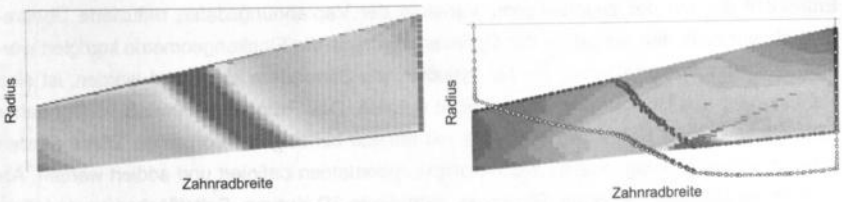


Abb. 7: Tragbilder im Einzeleingriff (links) und im Mehrfacheingriff (rechts) als 2D-Farbverlauf der Paarung mit angepassten Verzahnungsdaten

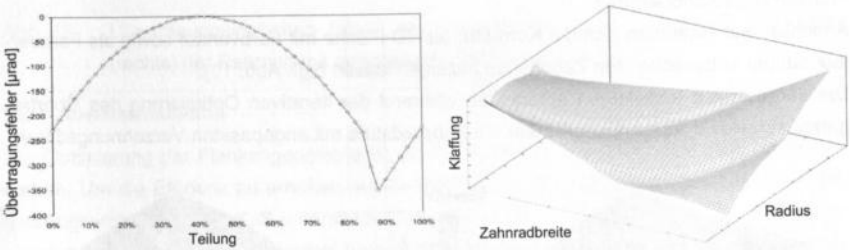


Abb. 8: Übertragungsverhalten (links) und Tragbild im Mehrfacheingriff als 3D-Gitter (rechts) der Paarung mit angepassten Verzahnungsdaten

Das Modul verfügt des Weiteren über eine Schnittstelle zu externen Programmen, die eine Auswertung der statistischen Versuchsplanung übernehmen. Daraus resultieren Effekt- und Korrelationskoeffizienten, mit deren Hilfe Aussagen über den zu erwartenden maximalen Drehfehler möglich sind.

Aus den Korrelationen lassen sich 3D-Oberflächen erstellen, welche die Zusammenhänge zweier Parameter ersichtlich machen (vgl. Abb. 9). So kann es z. B. vorkommen, dass abhängig vom Bereich eines Parameters der Übertragungsfehler bei Variation eines zweiten Parameters zu- oder abnimmt.

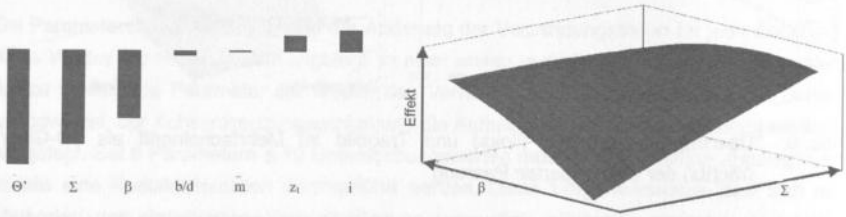


Abb. 9: Auswirkungen einzelner Verzahnungsparameter (links) und Wechselwirkung zweier Parameter

10. Korrektur der Flankengeometrie

Entspricht der mit der zugelassenen Variation der Verzahnungsdaten reduzierte Übertragungsfehler nicht den Vorgaben der Optimierung, muss die Flankengeometrie korrigiert werden. Mit Standardkorrekturen, die bei zylindrischen Stirnrädern eingesetzt werden, ist eine Reduzierung des Übertragungsfehlers nicht möglich. Das Programm SimKoS verfügt daher über ein Modul zur Korrektur der Flanke mit nahezu beliebigen Geometrien. Diese werden erzeugt, indem beliebig viele einzelne Korrekturgeometrien definiert und addiert werden. Als Grundauswahl stehen Ebenen, Ellipsoide, extrudierte 2D-Kurven, Sattelflächen sowie lokale Korrekturen zur Verfügung. Die Korrekturen können über Gleichungen oder über Ziehen von Stützpunkten auf der Vorschaufläche definiert werden. Die einzelnen Korrekturen werden in einem Korrekturbaum aufgelistet, wodurch diese einfach an- und abwählbar sind und den Flanken zugeordnet werden.

Anschließend kann man sich die Korrektur als 3D-Fläche mit Farbverlauf sowie als Farbverlauf auf der entsprechenden Zahnflanke anzeigen lassen (vgl. Abb. 10).

Die dargestellten Korrekturen entstanden während der iterativen Optimierung des Übertragungsverhaltens. Ausgangspunkt war die Zahnradstufe mit angepassten Verzahnungsdaten.

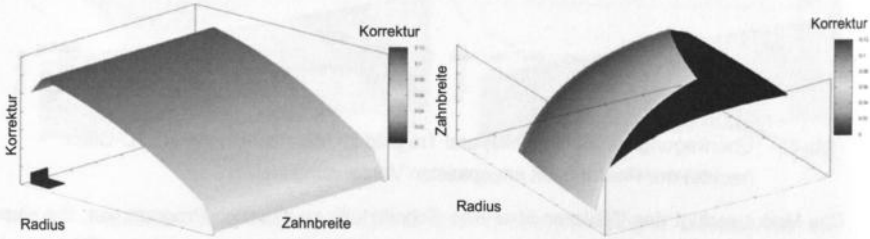


Abb. 10: Darstellung der Korrekturgeometrie als 3D-Fläche (links) und als Farbverlauf auf der Zahnradflanke (rechts)

Das Tragbild im Einzeleingriff bleibt unverändert in der Mitte der Zahnbreite, das Tragbild im Mehrfacheingriff zeigt als Verbesserung den Zahneingriff in der Flankenmitte bezüglich der Zahnhöhe (vgl. Abb. 11). Das 3D-Gitter zeigt keine Sprünge in der Klaffung auf, was das Diagramm des Übertragungsverhaltens bestätigt (vgl. Abb. 12). Der maximale Drehfehler konnte somit um ca. 90% auf 33 µrad reduziert werden.

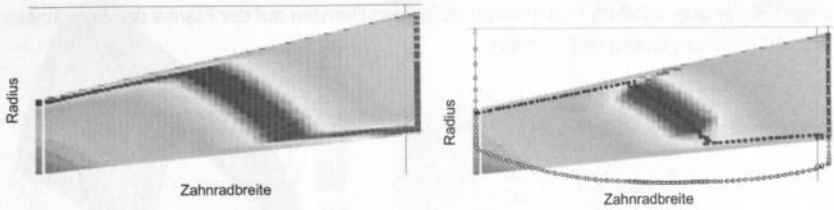


Abb. 11: Tragbilder im Einzeleingriff (links) und im Mehrfacheingriff (rechts) als 2D-Farbverlauf der Paarung mit angepassten Verzahnungsdaten

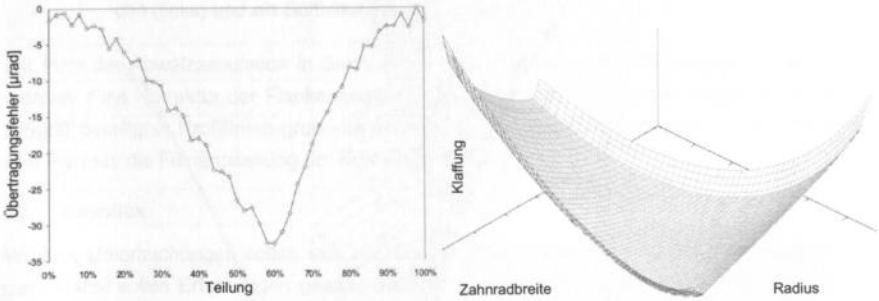


Abb. 12: Übertragungsverhalten (links) und Tragbild im Mehrfacheingriff als 3D-Gitter (rechts) der Paarung mit angepassten Verzahnungsdaten

11. Abwälzsimulation

Die Optimierung der Flankengeometrie ist ein iterativer Prozess und nimmt viel Zeit in Anspruch. Um die Effizienz zu erhöhen, wurde nach einem Werkzeug gesucht, das den Optimierungsprozess mit SimKoS unterstützt. Dazu wurde ein Modul entwickelt, das eine Punktewolke erzeugt, die einem idealen Abwälzverhalten nahe kommt. Dazu wurden die zwei Zahnräder im virtuellen Getriebe eingebaut und ausgerichtet. Das Abwälzen der beiden Zahnräder wird dann unter der Vorgabe simuliert, dass die aus dem Übersetzungsverhältnis berechneten Drehgeschwindigkeiten konstant bleiben, was ein ideales Abwälzverhalten darstellt. In Abb. 13 sind rechts und links (etwas versetzt) die Flanken des Rades 1 und die Gegenflanke von Rad 2 in unterschiedlichen Wälzstellungen dargestellt.

Die daraus resultierende Flanke von Rad 1 kann nur zur Erstellung einer Korrektur herangezogen werden. Dazu wird die Standardflanke mit der aus der Abwälzsimulation verglichen.

Für die Auswertung werden die Abstände der beiden Flanken berechnet und zur qualitativen Abschätzung der Korrekturgeometrie als Farbverlauf auf der Flankenfläche angezeigt (vgl. Abb. 14 links).

Für eine quantitative Abschätzung der Korrekturgeometrie können Schnitte entlang der Profillinien oder der Flankenlinien sowie der Abstand zweier Flankenflächen in 2D-Diagrammen dargestellt werden. Dabei kann man sich nicht nur durch die einzelnen Schnitte in Echtzeit hindurchbewegen, sondern sich auch zu beliebigen Punkten auf der Flanke den berechneten Abstand anzeigen lassen (vgl. rechts).

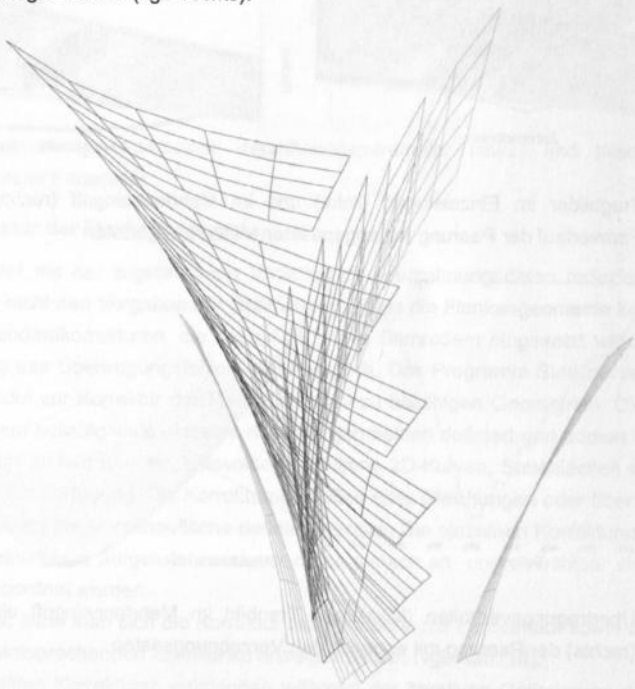


Abb. 13: Darstellung der Gegenflanke in verschiedenen Wälzstellungen

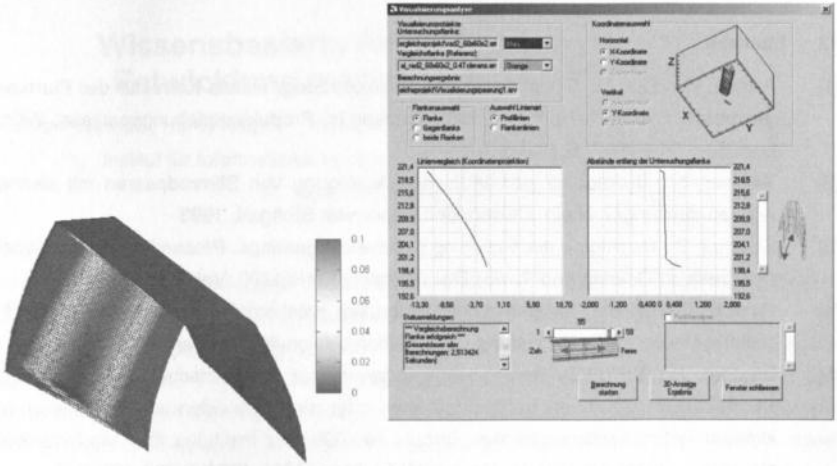


Abb. 14: Darstellung der Abweichung zweier Zahnflanken als Farbverlauf auf Flankenfläche (links) und als Schnittdarstellung (rechts)

Mit Hilfe der Abwälzsimulation in SimKoS kann der Optimierungsprozess deutlich verkürzt werden. Eine Korrektur der Flankengeometrie kann sehr schnell über die Abstände der am Eingriff beteiligten Profillinien grob abgeschätzt werden. Anschließend folgt in einem iterativen Prozess die Feinanpassung der Korrekturgeometrie.

12. Ausblick

Weitere Untersuchungen sollen sich mit den verschiedensten Beveloidradstufen beschäftigen. Dabei sollen Erfahrungen gesammelt werden, inwieweit sich Verzahnungen bezüglich des Übertragungsverhaltens optimieren lassen. Interessant ist dabei, auf welches Maß der Übertragungsfehler über kostengünstige Konstruktionsempfehlungen reduziert werden kann. Die Korrektur der Flankengeometrie berücksichtigt nicht den Fertigungsprozess. Mit einem weiteren Modul zur Fertigungssimulation im Programm SimKoS soll die Werkzeugbahn und die Werkzeugform gezielt beeinflusst werden. Trotz Einschränkung der Korrekturen bei Berücksichtigung von kontinuierlichen als auch diskontinuierlichen Fertigungsverfahren soll das Übertragungsverhalten optimiert werden.

Für eine ganzheitliche Optimierung konischer Stirnräder soll in weiteren Forschungsvorhaben dann der nächste konsequente Schritt in Richtung Optimierung der Tragfähigkeit unternommen werden.

13. Literatur

[1] Alxneit, H.; Binz, H.: Optimierung von Beveloidrädern mittels Korrektur der Flankengeometrie. SimPeP - Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess, Würzburg 14./15.06.2007, S. 318-329

[2] Wagner, M.: Beitrag zur geometrischen Auslegung von Stirnradpaaren mit kleinen Achsenkreuzungswinkeln. Dissertation Universität Stuttgart, 1993

[3] Schimpf, B.: Geometric dimensioning of beveloid gearings. Proceedings of 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris 1999, Vol. 1 S. 571-583

[4] Winkler, T.: Untersuchungen zur Belastbarkeit hohlkorrigierter Beveloidgetriebe für Schiffsgetriebe mittlerer Leistung. Dissertation Universität Stuttgart, 2002

[5] Wagner, M.: BEVELO. Berechnungsprogramm zur geometrischen Auslegung von Stirnrädern in Getrieben mit windschiefen oder sich schneidenden Radachsen bei kleinem Achsenkreuzungswinkel. Bericht Nr. 309 des Institutes für Maschinenkonstruktion und Getriebebau der Universität Stuttgart, 1992. ISBN 3-922-823-25-4

[6] Hemmelmann, J.: Alkaeos. Berechnungsprogramm zur Zahnkontaktanalyse V 2.1 der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., 2002

[7] Roth, K.: Zahnradtechnik - Evolventen-Sonderverzahnungen zur Getriebeverbesserung: Evoloid-, Komplement-, Keilschräg-, Konische -, Konus-, Kronenrad-, Torus-Wälzkolbenverzahnungen, Zahnrad-Erzeugungsverfahren. Berlin: Springer, 1998

[8] Zierau, S.: Die geometrische Auslegung konischer Zahnräder und Paarungen mit parallelen Achsen. Dissertation Universität Braunschweig, 1989

[9] Williams, T.; Kelley, C.; e. a.: Gnuplot. Programm zur Darstellung von Funktionen und Datensätzen V 4.0, 2004. http://www.gnuplot.info/ abgerufen am 15.08.06 16:23

[10] Kleppmann, W: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. München [u.a.] : Hanser, 1998. ISBN 3-446-19271-9

Wissensbasierte Ansätze in der virtuellen Entwicklung mechatronischer Produkte

Milan Marinov[1], Hardy Krappe[1], Manuela Plößnig[2], Alexander Mahl[1], Jivka Ovtcharova[1]

1. Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI), TU Karlsruhe
2. Salzburg Research Gesellschaft

Kurzfassung

Die Entwicklung mechatronischer Produkte ist geprägt durch eine hohe Produktkomplexität und durch die Verknüpfung von Spezialwissen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen.
In dem hier vorgestellten Ansatz spielt die Funktionsstruktur innerhalb des Produktlebenszyklus mechatronischer Produkte eine integrative Rolle. Im Zusammenhang mit der in der Funktionsstruktur abgebildeten Produktsemantik kann die weitere Detaillierung mit Hilfe von M-CAD, E-CAD Systemen oder Softwareentwicklungsumgebungen stattfinden. Auf diese Weise wird die frühzeitige Integration der entwickelten multidisziplinären Komponenten unterstützt. Die Validierung von Funktionseinheiten kann aus verschiedenen Produktentwicklungsphasen heraus geschehen. Durch funktionsbezogene Festlegung von virtuellen Tests, führt diese zu einer systematischen Qualitätssicherung im gesamten Produktlebenszyklus.
Darüber hinaus soll anhand der Verknüpfung von Produktfunktionsmodellen mit den geometrisch assoziierten Teilen und die anschließende Darstellung in einer virtuellen Umgebung, den Konstrukteuren, das Arbeiten mit komplexen mechatronischen Produkten erleichtert werden.
Der mechatronische Entwicklungsprozess kennzeichnet sich durch eine hohe Komplexität, da die erforderlichen interdisziplinären Kompetenzen oft in mehreren Unternehmen verteilt sind. Diese nutzen unterschiedliche Softwarewerkzeuge, haben unterschiedliche Denkweisen und Fachsprachen. Der Inhalt und die Form der Informationen, die sie benötigen, variieren demzufolge sehr stark. Durch Verwendung von Ontologien ist eine wissensbasierte Erfassung und Anpassung der verwendeten Datenmodelle auf die konkreten Bedürfnisse jedes einzelnen Unternehmens möglich. Dadurch wird einerseits die Komplexität der verwendeten Datenmodelle reduziert und andererseits die einheitliche Interpretation und Nutzung der Daten über die Unternehmensgrenzen hinweg sichergestellt.

1. Einführung

In der gegenwärtigen Situation ist die virtuelle Produktentwicklung eine verheißungsvolle Perspektive, da sie frühzeitig, durch eine große Anzahl virtueller Prototypen, die ihrerseits wiederum umfangreichen Testverfahren unterzogen werden, die Erhöhung des Produktreifegrades umsetzt. Wissensbasierte Ansätze schaffen ein gemeinsames Verständnis über die Bedeutung von virtuellen Produktbeschreibungen und bilden die Grundlage für eine rechnergestützte Testspezifikation, -durchführung und -evaluierung. In diesem Rahmen birgt der Einsatz von wissensbasierten Ansätzen in der virtuellen Produktentwicklung beachtliches Potential.

Derzeit läuft am IMI das EU-Projekt ImportNET[1], dessen Schwerpunkt auf der unternehmens- und domänenübergreifenden Kooperation zwischen KMUs durch ontologiebasierten Wissensaustausch in der virtuellen Produktentwicklung liegt. Ziel des Projektes ist es, eine Open-Source Umgebung und entsprechende Methoden zur wissensbasierten, virtuellen Produktentwicklung in KMU-Netzwerke zu erarbeiten. Ein Case-Study aus ImportNET soll als Ausgangspunkt für die theoretischen Betrachtungen dienen.

2. Case-Study „Mobiler Roboter"

Im Rahmen dieses Case Study entwickeln zwei der Projektpartner gemeinsam einen mobilen Roboter. Aufgabe dieses Roboters ist es, Nutzlasten im gefährlichen oder schwer zugänglichen Gelände zu transportieren. Der Roboter soll so konzipiert werden, dass er auch unebenes Gelände, wie z.B. Treppen, meistern kann.

Die Kompetenzen der beteiligten Unternehmen sind folgendermaßen verteilt: Das Unternehmen „M" (aus China) ist für die Entwicklung der *Mechanik* des Roboters, und das Unternehmen „E" (aus Kroatien) ist für die *elektronischen Kommunikationsschnittstellen* verantwortlich. Eine dieser Schnittstellen ist die Programmierschnittstelle des Roboters, mit deren Hilfe die Verbindung zu einem PC hergestellt wird, um das *Steuerungsprogramm* zu übertragen, welches hier zur Vereinfachung als gegeben betrachtet wird. Dieses elektronische Gerät ist keine Neuentwicklung, sondern eine Weiterentwicklung, bzw. eine Anpassungskonstruktion eines bestehenden Produktes: Eines Netzwerk-Switches. Der ursprüngliche Switch wurde für den Büroeinsatz entwickelt.

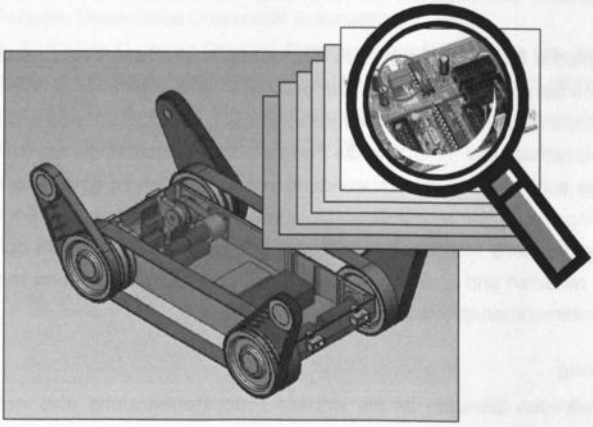


Abbildung 1: Mobiler Roboter und Kommunikationsschnittstelle

An dieser Stelle wird deutlich, dass die Integration des Switches im mobilen Roboter mit veränderten Umgebungsbedingungen verbunden ist. Diese Umgebungsbedingungen stellen

[1]EU Förderkennzeichen FP6-033610

eine Reihe von neuen Anforderungen an die elektronische Komponente. So entstehen während der Fahrt in unebenem Gelände (z.B. Treppen) erhebliche Vibrationen in der mechanischen Konstruktion. Da eine derartige mechanische Belastung im ursprünglichen Einsatzbereich (Büro) des Switches eher unwahrscheinlich ist, wurde er dafür nicht ausgelegt.
Aus diesem Grund kann die Problematik entstehen, dass sich Teile auf der elektronischen Platine während der Bewegung des Roboters über unebenes Gelände lösen. Festverankerte elektronische Bauteile wie Kondensatoren oder Spulen sind davon weniger betroffen, jedoch austauschbare Komponenten wie beispielsweise Klemmsicherungen. Abbildung 1 zeigt den mobilen Roboter mit der elektronischen Platine und der betroffenen Problemstelle „Sicherung".

Im Rahmen von ImportNET werden derzeit folgenden Punkte erarbeitet:

- Eine disziplinneutrale, normierte Darstellung von Fachwissen, die für Fachleute aus verschiedenen Fachbereichen, Unternehmen und Ländern verständlich ist und die Gesamtzusammenhänge des mechatronischen Systems erfasst.
- Eine vom Rechner verarbeitbare und interpretierbare Darstellungsform dieses Wissens, die eine frühzeitige, automatische Identifikation solcher Problemstellen ermöglicht.
- Eine mit den geometrischen Daten integrierte, interaktive Visualisierung des Wissens.

3. Grundlagen

3.1. Funktionsmodellierung

In der Literatur sind verschiedene Arten von Funktionen und Funktionsstrukturen bekannt ([11] p.239). Nach Rude ([11], p.237) lässt sich das Ziel der Funktionsmodellierung beschreiben, als die Definition aller Funktionen, die ein Produkt zu erfüllen hat und die Modellierung des funktionalen Zusammenwirkens. Die Funktionen eines Produktes müssen sich im Sinne eines Konkretisierungsschrittes aus den Anforderungen an ein Produkt ableiten, und umgekehrt aus einem definierten oder schon realisierten Produkt durch einen Abstraktionsschritt erkennen lassen.
Mit der Hauptaufgabe des Produktes kann eine Gesamtfunktion angegeben werden. Diese lässt sich meistens schon direkt in erkennbare Teilfunktionen aufgliedern, deren Teilaufgaben innerhalb der Gesamtaufgabe liegen. Mit der Verknüpfung der Teilfunktionen wird zugleich die Gesamtaufgabe beschrieben ([10], pp.42). Durch das Aufgliedern einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen wird eine hierarchische Funktionsstruktur geschaffen. Diese beschreibt vor dem Hintergrund der Rechneranwendung die notwendige Repräsentation für die rechnerunterstützte Lösungsfindung, da alle möglichen Funktionen, Input- und Outputobjekte formal eindeutig dargestellt werden ([6], p.87). Die Vorteile von Funktionsstrukturen liegen in der Möglichkeit sowohl Produkteigenschaften als auch Entwicklungsziele abzubilden, die Entwicklungsaufgabe disziplin- und lösungsneutral darzustellen und in der domänenübergreifenden, verständlichen Beschreibung der Gesamtzusammenhänge [5].

3.2. Ontologien zur Wissensdarstellung

Der Begriff "Ontologie" wurzelt in der Philosophie und geht bis auf Aristoteles zurück. Insbesondere seit den 1960er Jahren wird der Begriff der Ontologien in den Bereichen der Künstlichen Intelligenz und der Wissensrepräsentation im Sinne von Wissensdarstellung für wissensbasierte Systeme verwendet. Gruber [2] bezeichnet Ontologien als "explizite formale Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung". Ontologien dienen in verschiedenen Bereichen als Mittel der Strukturierung oder zum Datenaustausch. Oft widmen sich auch Experten aus verschiedenen Gebieten der Modellierung ihres jeweiligen Spezialwissens, so dass auf dieser Basis deklaratives Wissen und Problemlösungstechniken von mehreren Systemen geteilt werden können.

Am Beispiel der Mechatronik ist gut ersichtlich, dass verschiedene Engineering-Disziplinen – *Mechanik, Elektronik und Software* – zusammenkommen, alle mit eigenem Fachvokabular, eigenen Lösungsstrategien, aber mit gemeinsamen Schnittstellen. Für jede dieser Engineering-Disziplinen existieren unterschiedliche Wissensmodelle, zumeist in Form von Dokumenten oder Glossaren, aber kaum explizit als Ontologie definiert. Außerdem deckt jede dieser Engineering-Disziplinen eine spezifische mechatronische Domäne ab, sodass die Schnittstellen zwischen den genannten Engineering-Disziplinen eher klein zu nennen sind. Das Augenmerk im Projekt ImportNET liegt speziell in der Kollaboration dieser *drei Engineering-Disziplinen,* verbunden durch einen gemeinsamen Produktentwicklungsprozess.

3.3. Visualisierung in VR

Bis heute gibt es keine einheitliche Definition des Begriffs virtuelle Realität [1]. Alle Definitionsversuche beinhalten jedoch den gleichen Kern: Die virtuelle Realität ist eine mittels Computer erzeugte, dreidimensionale (stereoskopisch dargestellte) künstliche Welt, in der einer mit entsprechenden Geräten ausgestatteten Person das Gefühl vermittelt wird, selbst Teil der vom Rechner simulierten Welt zu sein und darin agieren zu können. Wichtige Stichpunkte bei der Charakterisierung der virtuellen Realität sind die Begriffe Immersion, Interaktion und Interaktivität. Unter Immersion wird das „Eintauchen in die Daten", unter Interaktion die „Manipulation der Daten" und unter Interaktivität die „Echtzeitdarstellung der Daten" verstanden. Durch die mit allen Sinnen erlebbare Immersion in einem dreidimensionalen Raum, sowie die Verwendung völlig neuartiger Ein- und Ausgabegeräte eröffnet die Technologie der virtuellen Realität neuartige Wege, die das Potential bergen, die klassische Produktentwicklung erheblich zu erweitern [5].

Dabei spielen neben den hohen Hardwareanforderungen, den I/O Geräten und der visuellen Ausrichtung, insbesondere die Eingabe- und Interaktionsmetaphern eine entscheidende Rolle. Diese dienen dazu, dem Nutzer Kommunikationshilfsmittel im virtuellen Raum zu geben, anhand derer sich Objekt zu Objekt bzw. Objekt zu Subjekt Interaktion besser durchführen lässt [9].

Die simulierte Realität versucht den Ansatz, naturwissenschaftlich / technische Simulation und Optimierung mit modernen Visualisierungs- und Interaktionsmethoden wie Virtual Reality zusammenzuführen. Dabei soll eine Arbeitsumgebung geschaffen werden, in der eingebette-

te Entscheidungswerkzeuge sowohl die interaktive Abwägung von Varianten (Virtual Engineering) als auch eine systematische simulationsbasierte Optimierung über die Vorgabe von Zielkriterien (Reverse Engineering) gestattet wird [12].

4. Lösungsansatz

Wegen der disziplinneutralen Darstellung des funktionalen Zusammenwirkens mechatronischer Systeme, ist die *Funktionsmodellierung* eine geeignete Grundlage für eine disziplinneutrale, normierte Darstellung von Fachwissen. Durch Festlegung von Taxonomien lassen sich standardisierte Bausteine für Funktionsmodelle definieren, die in einem unternehmensübergreifenden und interkulturellen Kontext eine Basis für ein gemeinsames Verständnis schaffen. Durch *Ontologien* lässt sich das Fachwissen in einer vom Rechner verarbeitbaren und interpretierbaren Form darstellen, so dass eine frühzeitige, automatisierte Identifikation von Problemstellen möglich ist. Eine mit den geometrischen Daten integrierte, interaktive Visualisierung des Wissens kann mittels *Virtuelle Realität* umgesetzt werden.

4.1. Funktionsmodellierung

Die zugrunde liegende Methodik der Funktionsmodellierung wurde am Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI) der Universität Karlsruhe entwickelt [6]. Die Elemente der Funktionsstrukturen wie Funktionen und Funktionsobjekte sind entsprechend der Taxonomien aus [3] eingeordnet. Die Einordnung innerhalb der jeweiligen Taxonomie ist in der Funktionsstruktur innerhalb des Kastens der jeweiligen Funktion bzw. Funktionsobjekt in doppelten Klammern << ... >> angegeben.

Im Folgenden wird auf die gemeinsame Funktionsstruktur des Roboters mit dem integrierten Switch eingegangen. Aus Platzgründen wird auf eine getrennte Betrachtung der Funktionsstruktur des Switches verzichtet. Um den Rahmen nicht zu sprengen, beschränkt sich die Sicht des Funktionsmodells in Abbildung 2 auf die mit der Vibration verknüpften Funktionselemente. Eine Legende der graphischen Notation ist in Abbildung 3 zu finden.

Die Hauptfunktion des mobilen Roboters „Transport" nimmt in der Funktionsstruktur in Abbildung 2 eine zentrale Stelle ein. Diese Funktion hat zwei materielle Funktionsobjekte als Eingabe: „Mobile robot" und „Payload" (Nutzlast). Das Eingabeobjekt „Electromotive force" bringt zum Ausdruck, dass der Roboter einen elektrischen Antrieb benutzt, um die Funktion „Transport" zu erfüllen. Ein weiteres Eingabeobjekt dieser Funktion ist das Informationsobjekt „Control program" (Steuerungsprogramm). Dieses Funktionsobjekt steuert die Funktion „Transport". Es ist gleichzeitig die Ausgabe der Hauptfunktion „Guide signal" (Signal leiten bzw. schalten) des Switches. Die Funktion „Import signal" kennzeichnet die informationstechnische Schnittstelle des Switches zur Außenwelt. Neben den Eingabeobjekten hat die Funktion „Transport" mehrere Ausgabeobjekte. Das sind die materiellen Objekte „Mobile robot" und "Payload" sowie das Informationsobjekt „Sensor signal". Letzteres Objekt steht für die Sensordaten, die durch die Funktion „Transport" generiert werden.

Außer den Nutzfunktionen ist in der Funktionsstruktur auch eine Störfunktion zu finden: „Export vibration". Die Semantik dieser Störfunktion ist, dass der mobile Roboter unerwünschte Vibrationen erzeugt, die im energetischen Funktionsobjekt „Vibration" ihren Ausdruck finden.

Da die Funktionsobjekte „Mobile robot" und „PCB" (elektronische Platine) strukturell miteinander verbunden sind, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Störfunktion „Export vibration" einen Einfluss auf dem Funktionsobjekt „PCB" hat.
Die Funktionsstruktur in Abbildung 2 enthält neben Funktionen und Funktionsobjekten Tests, die den Funktionen „Export vibration" und „Guide signal" zugeordnet sind. Da die Funktion „Guide signal" von dem Funktionsobjekt „PCB" realisiert wird, bezieht sich der „Test PCB" auch auf dieses Objekt. Mit diesem Test kann neben der Funktionalität der elektronischen Platine auch deren Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüsse wie Hitze, Vibrationen oder elektromagnetische Störungen abgerufen werden. Andererseits können über den „Test vibration" die Eigenschaften (Frequenz, Amplitude) der Störwirkung „Vibration" abgerufen werden. Durch die Funktionsstruktur ist der Rechner in der Lage, funktionale Abhängigkeiten über Disziplingrenzen hinweg zu erkennen, entsprechende Tests auszuwählen und abhängig von deren Ergebnissen Schlussfolgerungen zu ziehen. An dieser Stelle ist es noch offen, ob die Tests durch automatische Simulation und Auswertung der Simulationsergebnisse umgesetzt werden, oder von manuellem Input abhängig sind.

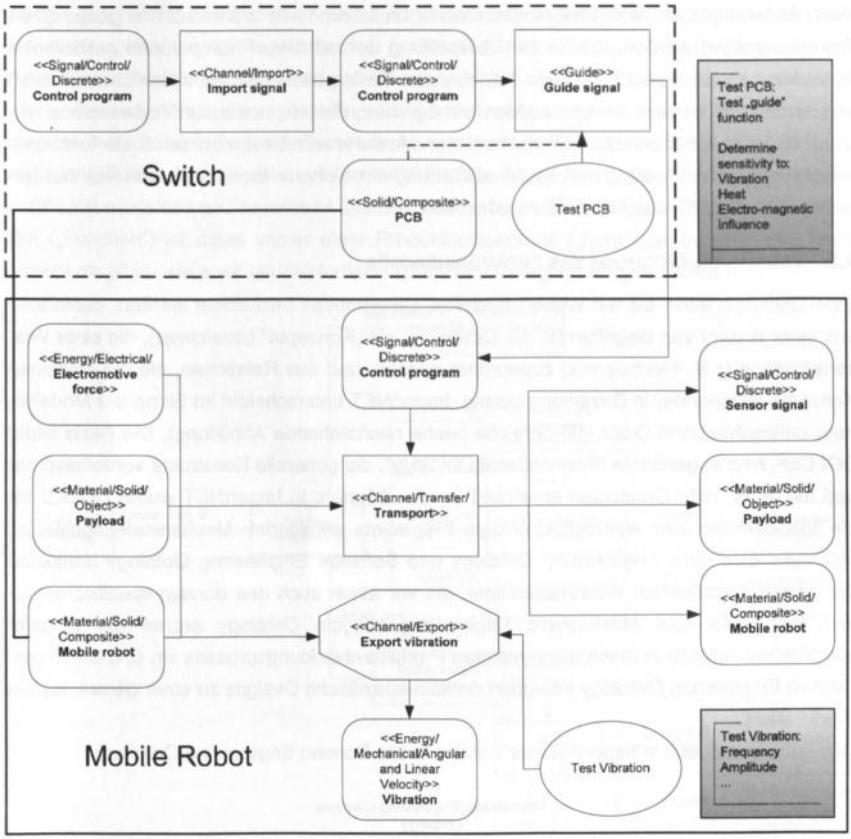


Abbildung 2: Funktionsstruktur des mobilen Roboters

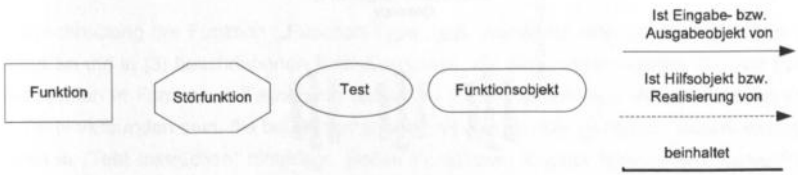


Abbildung 3: Legende zu der Funktionsstruktur

Nach Änderungen an einer bestimmten mechatronischen Komponente können genau diese Tests ausgeführt werden, die für die Überprüfung der mit dieser Komponente assoziierten Funktionen zuständig sind. So kann man die zum Testen benötigte Zeit erheblich reduzieren und wesentlich kürzere Iterationszyklen ermöglichen, die wiederum zur Verbesserung der Qualität des mechatronischen Produkts führen. Andererseits baut man durch die funktionsorientierte Testentwicklung und Testdurchführung ein Sicherheitsnetz auf, welches das gezielte, frühzeitige Finden von Fehlern erleichtert.

4.2. Wissensmodellierung des Funktionsmodells

Eine Ontologie kann als ein wissensbasiertes Datenmodell bezeichnet werden, bestehend aus einer Anzahl von Begriffen (in der Ontologie als „Konzepte" bezeichnet), die einer Wissensdomäne (z.B. Mechatronik) zugeordnet werden, und aus Relationen, die die einzelnen Konzepte miteinander in Beziehung setzen. ImportNET unterscheidet im Sinne der Modellierung unterschiedliche Ontologie-Bereiche (siehe nachstehende Abbildung). Die Basis bildet DOLCE[2], eine sogenannte "Foundational Ontology", die generelle Konstrukte vordefiniert hat und mit deren Hilfe Ontologien entwickelt werden können. In ImportNET wurde DOLCE für die Modellierung aller weiteren Ontologie Fragmente verwendet. Mechanical Engineering Ontology, Electronic Engineerung Ontology und Software Engineering Ontology umfassen die domain-spezifischen Wissensbereiche, die vor allem auch das domain-spezifische Design beinhalten. Die Mechatronic Engineering Lifeycle Ontology ordnet die domain-spezifischen Abläufe in einen gemeinsamen Produktentwicklungsprozess ein und die Cross-Domain Engineering Ontology intergriert domain-spezifische Designs zu einer gemeinsamen Produktsicht.

Das Funktionsmodell in ImportNET ist Teil der Cross-Domain Engineering Ontology.

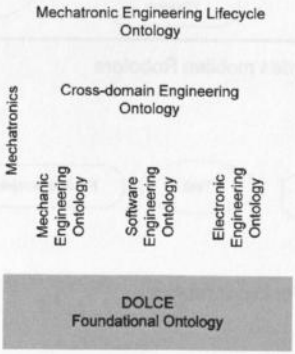


Abbildung 4: Ontologie Landkarte (Quelle: ImportNET)

Das Funktionsmodell in ImportNET ist Teil der Cross-Domain Engineering Ontology.

---

[2] DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering)

Ausgangspunkt für das Funktionsmodell ist eine definierte Produktstruktur, wobei den einzelnen Komponenten der Produktstruktur (optional) Funktionen zugewiesen werden können. Basis für die Funktionsbeschreibung bildet in ImportNET eine Ontologie, mit deren Hilfe eine wissensbasierte Strukturierung des Funktionsmodells möglich ist. Neben der Funktionsstruktur können auch die fachspezifischen Komponententests im Modell spezifiziert werden.
Abbildung 5 zeigt ein Beispiel aus ImportNET für eine solche Ontologie. Die Ontologie wurde in DOLCE modelliert und beschreibt das Basiselement für das funktionale Modell. Eine Funktion („Function") ist dabei immer einer Produktkomponente („Item") zugewiesen und kann sowohl als Nutz- wie auch als Störfunktion („Function Category) dargestellt werden.

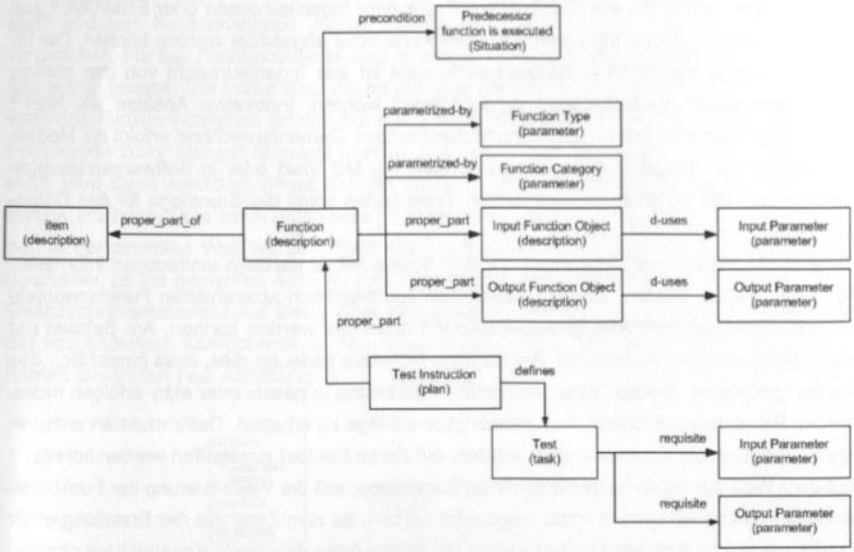


Abbildung 5: Ontolgofragment "Funktionales Modell"

Die Beschreibung der Funktion („Function Type", z.B. „transport" oder „guide signal") ist angelehnt an die in [3] beschriebenen Basisfunktionen, die ein standardisiertes Set von Funktionsbegriffen in Form einer Taxonomie darstellen (NIST-Taxonomie). Mit der Funktion können Tests verbunden sein, die bei Bedarf ausgeführt werden. Die genauen Testanweisungen werden in „Test Instruction" hinterlegt. Sollen Funktionen in einer bestimmten Reihenfolge ablaufen, wird das in der Modellierung über eine „Precondition" geregelt, die eine zuvor auszuführende Vorgänger-Funktionen definiert.

4.3. Integrierte Visualisierung in VR

Unter VR kann nicht ein Ersatz bestehender Technologien verstanden werden, sondern vielmehr eine komplementäre, die existierenden Systeme erweiternde Technologie. Bei komplexen mechatronischen Produkten stellt der interaktive, funktionsgetriebene Einsatz virtueller Umgebungen den größten Mehrwert dar.

Die offensichtliche Herausforderung liegt darin, die Funktionsstruktur auf den Szenegraph der virtuellen Darstellung abzubilden. Dies wird notwendig, um die technischen Neuerungen der immersiven, interaktiven VR zu nutzen. Dabei steht die Manipulation der Funktionseinheiten in einem immersiven Umfeld im Vordergrund. Manipulation beschränkt sich hier nicht lediglich auf das Verändern von Ein- und Ausgangswerten, sondern bezeichnet die zu jeder Funktionseinheit geeignete visuelle Veränderung. Diese Art der HMI macht sich Eingabe- und Interaktionsmetaphern zu nutze, die u.A. zu einem besseren Verständnis komplexer Zusammenhänge durch natürliche Darstellung führen sollen.

Die Softwareunterstützung für die Erstellung spezieller Funktionsmodelle ist allerdings rar gesät. Es gibt Methoden wie FAST[3]/IDEF0[4] aus dem Ingenieurwesen oder ERM/UML[5] aus der Softwareentwicklung mit denen die Funktionsblöcke abgebildet werden können. Die Integration dieser Methoden in Softwarewerkzeuge ist aus Ingenieurssicht von den großen Branchenanbietern weitestgehend vernachlässigt worden. Innovative Ansätze wie KIEF[6] oder CUPS[7] konnten sich am Markt nicht durchsetzen. Dementsprechend erfolgt die Modellerstellung in der Regel in Office Anwendungen wie MS Visio oder in Softwareerstellungswerkzeugen. Die Dateiformate aus diesen Tools bilden somit die Grundlage für den Datenaustausch.

Die erstellte Funktionsstruktur muss darüber hinaus mit semantisch eindeutigen Informationen angereichert werden, so dass letztendlich aus begrifflich abstrahierten Funktionsobjekten detaillierte geometrische Repräsentationen abgeleitet werden können. Am Beispiel der oben beschriebenen Problematik des mobilen Roboters bedeutet dies, dass hinsichtlich des Funktionsobjektes „Sensor" eine prinzipielle Unterteilung in passiv oder aktiv erfolgen muss, um auf Basis dieser Auswahl Gestaltlösungsvorschläge zu erhalten. Dafür mussten entsprechende Lösungsbibliotheken erstellt werden, auf die im Kontext zugegriffen werden konnte.

Auf dem Weg zur intuitiven, realitätsnahen Darstellung, soll die Visualisierung der Funktionseinheiten vorerst lediglich abstrakt umgesetzt werden, da zum Zeitpunkt der Erstellung einer Funktionsstruktur zumindest im Falle einer Neukonstruktion detaillierte Konstruktionsinformationen noch nicht vorhanden sind. Darüber hinaus wird so auch für komplexe bereits bestehende Baugruppen, wie im Falle einer Änderungskonstruktion, die Übersicht gewährleistet. Die Verknüpfung der Funktionseinheiten soll mittels mehrerer Interaktionsmetaphern vorgenommen werden. Dabei soll zum einen lediglich die Hüllgeometrie der Funktionsobjekte abstrakt abgebildet, zum anderen diese auch nicht zu Baugruppen zusammengebaut, sondern in einer Explosivsicht dargestellt werden. Die Knoten zwischen den Funktionsobjekten sind die Funktionen selbst.

---

[3] Function Analysis Systems Technique

[4] Integrated Definition Method 0 – Function Modeling Method

[5] Entity-relationship model/ Unified Modeling Language

[6] Knowledge Intensive Engineering Framework

[7] Conceptual Understanding and Prototyping Environment

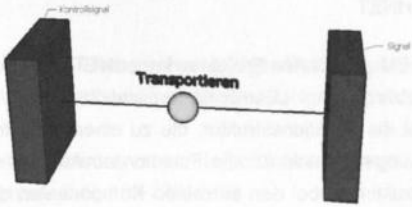


Abbildung 6: Abstrakte Darstellung einer Funktionsstruktur in VR

Abbildung 6 demonstriert dies am Beispiel der Sicherung. Das Funktionsobjekt „Kontrollsignal" wird zum Funktionsobjekt „Signal" „transportiert". Die Funktionsobjekte sind statisch vorgegeben. Für das Funktionsobjekt „Signal" wurde zur Visualisierung die Hüllgeometrie der Sicherung gewählt. Die Farbe blau deutet auf eine elektronische Komponente hin. Die Auswahl des Funktionsobjektes erfolgt dabei aus einer Bibliothek, in der die beteiligten Funktionsobjekte zuvor statisch abgelegt wurden. Die Funktionen werden als gelbe Kugel dargestellt. Wird diese selektiert, öffnet sich ein Menü, in dem die Klassifizierung der Funktionsverben erscheint. Dies kann entsprechend ausgewählt werden. Entsprechende Modifikationen in der virtuellen Welt werden durch die Tests validiert. Rechnerunterstützt erfährt der Bearbeiter, ob die gemachte Auswahl möglich ist oder nicht. Ähnlich erfolgt die Auswahl der Gestaltrepräsentationen. Auf Basis einer Klassifizierung erfolgt menügesteuert die Auswahl der abzubildenden Komponente. In dem Beispiel der Sicherung wurden mehrere Gestaltvarianten identifiziert (vgl. Abbildung 7).

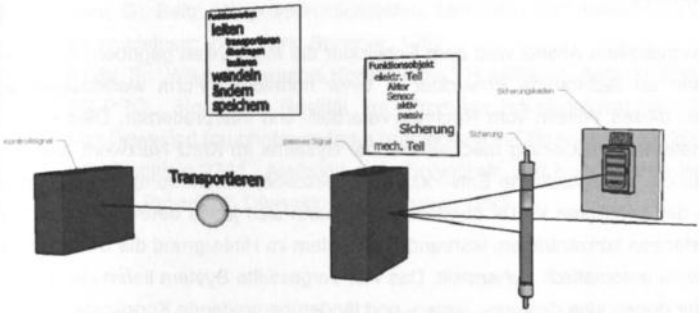


Abbildung 7: Detaillierte Gestaltlösungsvorschläge an der Hüllgeometrie der Funktionsobjekte

5. Umsetzung in ImportNET

Im Rahmen des von der EU geförderten Projektes ImportNET wird derzeit eine sog. „Semantische[8] Integrationsumgebung" (engl. „Semantic Application Server" SAS) entwickelt. Kernkomponente des SAS ist die Funktionsstruktur, die zu einem sehr frühen Design-Zeitpunkt erzeugt werden kann. Ausgangspunkt für die Funktionsstruktur in ImportNET ist entweder eine definierte Produktstruktur, wobei den einzelnen Komponenten der Produktstruktur (optional) Funktionen zugewiesen werden können (Abstraktionsschritt) oder die funktionalen Anforderungen (Konkretisierungsschritt).
Darüber hinaus ermöglicht das SAS eine semiautomatische, ontologiebasierte[9] Erzeugung von Schnittstellen (sog. Adapter) zu den spezifischen SW-Tools der Unternehmen. Mit Hilfe der Adapter werden die domain-spezifischen Engineering-Daten (z.B. Geometrien) eingelesen und können mit einer bestehenden Funktionsstruktur verknüpft werden. ImportNET sieht hierfür ein, an das SAS angeschlossenes, „Interdisziplinäres Engineering-Werkzeug" (engl. "Multi Domain Engineering Tool" MDET) vor. Über den Adaptern des SAS hat es Zugriff auf die fachspezifischen SW-Tools. Das MDET leitet eine disziplinspezifische Sicht auf das entwickelte Produkt ab, so dass jeder Entwickler nur die für ihn relevanten Daten sieht. Schwerpunkt des MDET ist die integrierte Darstellung der für die Zusammenarbeit relevanten Metadaten aus dem SAS wie Funktionsstruktur, Testspezifikationen und Produktgeometrie. Das MDET erlaubt die direkte Manipulation der Metadaten (z.B. der Funktionsstruktur) oder das Anstoßen von Workflows, welche die Metadaten oder die Produktdaten in den proprietären Systemen verändern.

6. Zusammenfassung

Durch den hier vorgestellten Ansatz wird dem Entwickler die Möglichkeit gegeben, sein implizites Fachwissen an fachfremde Entwickler in einer normierten Form weiterzugeben. Darüber hinaus ist dieses Wissen vom Rechner verarbeit- und interpretierbar. Dies unterstützt eine automatisierte Validierung mechatronischer Systeme im KMU Netzwerk, die ein Sicherheitsnetz für die fachspezifische Entwicklung der einzelnen mechatronischen Komponenten innerhalb der beteiligten KMUs darstellt. Somit kann sich jedes beteiligte KMU auf seine Fachkompetenzen konzentrieren, während das System im Hintergrund die Stimmigkeit des Gesamtkonzepts automatisch sicherstellt. Das hier vorgestellte System liefert die Randbedingungen, unter denen eine disziplin-, firmen- und länderübergreifende Kooperation möglich ist.

---

[8] Unter dem Begriff Semantik wird die Bedeutung einer Informationsfolge verstanden.

[9] Eine Ontologie wird als eine Wissensrepräsentation eines formal definierten Systems von Begriffen und Relationen verstanden.

7. Literaturquellen

[1] Brown, D. J.; Novick, R.: Voices from the edge: Conversations with Jerry Garcia, Ram Dass, Annie Sprinkle, Matthew Fox, Jaron Lanier, & others. Freedom, CA: Crossing Press, 1995.

[2] Gruber, T. R.: "A translation approach to portable ontologies", in "Knowledge Acquisition", Band 5, Nummer 2, S. 199-220, 1993

[3] Hirtz, Julie, Stone, Robert, McAdams, Daniel, 2002, "A functional basis for engineering design: Reconciling and evolving previous efforts", in "Research in Engineering Design" 13, S. 65-82, 2002

[4] Huang, M., „Funktionsmodellierung und Lösungsfindung mechatronischer Produkte", Dissertation, Aachen, Shaker Verlag, 2002

[5] Krappe, H. und Marinov, M.: „Funktionsmodellierung in der virtuellen Produktentwicklung" [Hrsg.] Edmund E. Dressler. CADCAM Report. S. 24-28, März 2007

[6] Langlotz, G., „Ein Beitrag zur Funktionsstrukturentwicklung innovativer Produkte", Dissertation, Aachen, Shaker Verlag, 2000

[7] Leemhuis, H. „Funktionsgetriebene Konstruktion als Grundlage verbesserter Produktentwicklung", Dissertation an der Fakultät V für Verkehrs- und Maschinensysteme der TU Berlin, 2005

[8] Marinov, M., Krappe, H. und Ovtcharova, J.: "Anwendungen der Funktionsmodellierung" [Hrsg.] Edmund E. Dressler. CADCAM Report. S. 84-87, Juni 2007

[9] Olbert, M.: „Methode zur interaktiven Informationsvisualisierung für virtuelle Prototypen in der Entwicklung von Flugzeugkabinen", Stuttgart, Univ., Diss., 2006

[10] Pahl, G., Beitz, W. „Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung", 4. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997

[11] Rude, S.: „Wissensbasiertes Konstruieren", Habilitation. Aachen, Shaker Verlag, 1998

[12] SR-PRO: Simulierte Realität im Produktentwicklungsprozess, Fraunhofer IGD, http://www.igd.fraunhofer.de/igd-a2/projects/MAVO/index.html.de, 2007

[13] VDI-Richtlinie 2221, „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte", Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993

Prof. Dr.-Ing. **M. Abramovici**
Ruhr-Universität Bochum
Institut für Konstruktionstechnik
Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik
Universitätsstraße 150
44780 Bochum
Tel.: 02343 227009
Email: Michael.Abramovici@itm.rub.de

Prof. Dr. -Ing. Dr. h. c. **A. Albers**
Universität Karlsruhe
Institut für Produktionsentwicklung
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe
Tel.: 0721 6082371
Email: Albert.Albers@mach.uni-karlsruhe.de

Dipl.-Ing. **Th. Alink**
Universität Karlsruhe
Institut für Produktionsentwicklung
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe

Dipl.-Ing. **H. Alxneit**
Universität Stuttgart
Institut für Konstruktionstechnik und techn. Design
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel.: 0711 68566048
Email: heiko.alksneit@iktd.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing.habil. **R. Anderl**
Technische Universität Darmstadt
Datenverarbeitung in der Konstruktion
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt
Tel.: 06151 166000
Email: anderl@dik.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. **T. Babbick**
Universität Kaiserslautern
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik
Gottlieb-Daimler-Strasse
67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631 2053234
Email: babbick@mv.uni-kl.de

MSME **St. Baksi**
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion / Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39016 Magdeburg
Tel.: 0391 6712693
Email: stanley.baksi@masch.bau.uni-magdeburg.de

Prof. Dr.-Ing. **T. Bercsey**
Technische Universität Budapest
Institut für Maschinenkonstruktion, Produktentwicklung und Design
Müegyetem rkp. 3
H-1111 Budapest
Email: bercsey.tibor@gszi.bme.hu

Dr.-Ing. **M. Beyer**
Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
Tel.: 0531 5923730

Prof. Dr.-Ing. **H. Binz**
Universität Stuttgart
Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel.: 0711 6856055
Email:hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. **H. Birkhofer**
Technische Universität Darmstadt
Maschinenelemente und Konstruktionslehre
Magdalenenstr. 4
64289 Darmstadt
Tel.: 06151 162155
Email: birkhofer@pmd.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. **K. Brökel**
Universität Rostock
Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
Albert-Einstein-Str. 2
18059 Rostock
Tel.: 0381 4989170
Email: klaus.broekel@uni-rostock.de

Dipl.-Ing. **R. Breining**
ICIDO GmbH
Jurastr. 8
70565 Stuttgart
Tel.: 0711 27303-150
Email: Ralf.breining@icido.de

Dipl.-Ing. **M. Curschmann**
Technische Universität Chemnitz
Professur Konstruktionslehre
Reichenhainer Str. 70
09126 Chemnitz
Tel.: 0371 53135127
Email: michael.curschmann@mb.tu-chmenitz.de

Dipl.-Ing. **A. Dörnhöfer**
Universität Bayreuth
Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30
95440 Bayreuth
Tel.: 0921 557191
Email:andreas.doernhoefer@uni-bayreuth.de

Dr.-Ing. **F. Engelmann**
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Inst. für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
Tel.: 0391 6718521
Email: frank.engelmann@masch-bau.uni-magdeburg.de

Prof. Dr.-Ing. **J. Feldhusen**
RWTH Aachen
Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstr. 54B
52074 Aachen
Tel.: 0241 8027342
Email: feldhusen@ikt.rwth-aachen.de

A. Figge
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
01062 Dresden

Dr.-Ing. **A. Fügenschuh**
Technische Universität Darmstadt
Maschinenelemente und Konstruktionslehre
Magdalenenstr. 5
64290 Darmstadt

Dr.-Ing. **G. Goebels**
ICIDO GmbH
Jurastr. 8
70565 Stuttgart

Dr.-Ing.habil. **W. Grahl**
CADsys Vertriebs- und Entwicklungsgesellschaft mbH
Carl-von Bach-Str. 3
09116 Chemnitz
Tel.: 0371 4000700
Email: wgrahl@cadsys.de

M. Sc. **S. Grimm**
ICIDO GmbH
Jurastr. 8
70565 Stuttgart
Tel.: 0711 27303167
Email: sebastian.grimm@icido.de

Prof. Dr.-Ing. **K.-H. Grote**
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionstechnik
Postfach 4120
39016 Magdeburg
Tel.: 0391 6718522
Email: grote@mb.uni-magdeburg.de

Dipl.-Ing. **S. Jende**
PEINER Umformtechnik GmbH
Woltorfer Straße 20-24
31224 Peine
Tel.: 0517 1545300
Email: s.jende@peiner-ut.com

Dipl.-Ing. **E. Kloß**
Universität Rostock
Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD
Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik
Albert-Einstein-Str. 2
18059 Rostock
Tel.: 0381 4989178
Email: enrico.kloss@uni-rostock.de

Dipl.-Ing. **H. Krappe**
Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion
Adenauerring 20a
76131 Karlsruhe

H.-R. Kröninger
BMW Group

Prof. Dr.-Ing. **E. Leidich**
TU Chemnitz
Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik
Reichenhainer Str. 70
09125 Chemnitz
Tel.: 0371 5314660
Email: e.leidich@mb1.tu-chemnitz.de

Dipl.-Inform. **A. Mahl**
Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion
Adenauerring 20a
76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. **M. Marinov**
Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion
Adenauerring 20a
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 6086634
Email: milan.marinov@imi.uni-karlsruhe.de

A. Martin
Technische Universität Darmstadt
Maschinenelemente und Konstruktionslehre
Magdalenenstr. 6
64291 Darmstadt

Dipl.-Ing. **V. Meimann**
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Maschineninformatik
Universitätsstraße 150
44780 Bochum
Tel.: 0234 3228895
Email: valentin.meimann@itm.ruhr-bochum.de

Dipl.-Ing. **T. N. Doan**
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
01062 Dresden
Tel.: 0351 46333580
Email: Thanh.Nguyen_Doan@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. **E. Nurcahya**
RWTH Aachen
Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus
Steinbachstr. 54B
52074 Aachen
Tel.: 0241 8027577
Email: nurcahya@ikt.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. **J. Oerding**
Universität Karlsruhe
Institut für Produktionsentwicklung
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe
Tel.: 0721 6088061
Email: oedering@ipek.uni-karlsruhe.de

Prof. Dr.-Ing **J. Ovtcharova**
Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion
Adenauerring 20a
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 6082129
Email: ovtcharova@rpk.uni-karlsruhe.de

M. Plößnig
Salzburg Research Gesellschaft
Jakob Haringer Straße 5/III
A-5020 Salzburg
Tel.: +43662 2288402
Email: manuela.ploessing@salzburg research.at

Dr.–Ing. **H.-P. Prüfer**
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl Maschinenbauinformatik
Universitätsstraße 150
44780 Bochum
Tel.: 0234 3223402
Email: hp@itm.ruhr-uni-bochum.de

Prof. Dr.-Ing. **F. Rieg**
Universität Bayreuth
Fakultät für Angewandte
Naturwissenschaften
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 30
95440 Bayreuth
Tel.: 0921 557192
Email: frank.rieg@uni-bayreuth.de

Dipl.-Ing. **B. Roith**
Universität Bayreuth
Fakultät für Angewandte
Naturwissenschaften
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
Universitätsstraße 30
95440 Bayreuth

Dipl.-Wirtsch.-Ing.**Th. Rollmann**
Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Datenverarbeitung in der
Konstruktion
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. **B. Sauer**
Universität Kaiserslautern
Lehrstuhl für Maschinenelemente und
Getriebetechnik
PF 3049
67653 Kaiserslautern
Tel.: 0631 2052309/3405
Email: sauer@mv.uni-kl.de

Prof. Dr.-Ing. **H. Schnegas**
Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Fachgruppe Konstruktionstechnik
PF 1210
23952 Wismar
Tel.: 0384 1753551
Email: h.schnegas@mb.hs-wismar.de

Dr.-Ing. **Ch. Schöne**
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
01062 Dresden
Tel.: 0351 46332798
Email: christine.schoene@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. **St. Schreiber**
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
01062 Dresden
Tel.: 0351 46334726
Email: steffen.schreiber@tu-dresden.de

Dr.-Ing. **W. Steger**
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
01062 Dresden
Tel.: 0351 4633291
Email: wolfgang.steger@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. **N. Schwarz**
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion
/Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
Tel.: 0391 6711

Prof. Dr.-Ing. **H. Seifert**
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Maschinenelemente und
Konstruktionslehre
44780 Bochum
Tel.: 02351 21767
Email: seifert@lmk.ruhr-uni-bochum.de

Dipl.-Ing. **D. Sohn**
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Inst. für Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
Tel.: 0391 6712672
Email: daniel.sohn@masch-bau.uni-
magdeburg.de

Prof. Dr.-Ing. habil. **R. Stelzer**
Technische Universität Dresden
Institut für Maschinenelemente und
Maschinenkonstruktion
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
01062 Dresden
Tel.: 0351 46333775
Email. ralph.stelzer@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. **R. Tamàs**
Technische Universität Budapest
Institut für Maschinenkonstruktion,
Produktentwicklung und Design
Müegyetem rkp. 3
H 1111 Budapest
Tel.: 00361 4634081
Email: rick.tamas@gszi.bme.hu

Dipl.-Ing. **R. Träger**
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Maschinenkonstruktion/
Konstruktionstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
Tel.: 0391 6711
Email: ramona.traeger@masch-bau.uni-magdeburg.de

Dipl.-Ing. **A. Troll**
Universität Bayreuth
Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD
Universitätsstraße 32
95442 Bayreuth
Tel.: 0921 557193
Email: alexander.troll@uni-bayreuth.de

Dipl.-Ing. **M. Wäldele**
Technische Universität Darmstadt
Produktentwicklung und
Maschinenelemente
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt
Email: waeldele@pmd.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Dipl.-Kaufm. **R. Watty**
Universität Stuttgart
Institut für Konstruktionstechnik und
Techn. Design
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel.: 0711 68566040
Email: robert.watty@iktd.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. **M. Wohlgemuth**
Universität Kaiserslautern
Fachbereich Maschinenbau und
Verfahrenstechnik
Lehrstuhl für Maschinenelemente und
Getriebetechnik
Gottlieb-Daimler-Strasse PSF 30 49
67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631 2053234

Dipl.-Inform. **Z. Wu**
TU Darmstadt
Fachgebiet Datenverarbeitung in der
Konstruktion
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt
Tel.: 06151 166584
Email: wu@dik.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. **M. Zimmermann**
Universität Bayreuth
Lehrstuhl Konstruktionslehre/CAD
Universitätsstraße 30
95440 Bayreuth
Tel.: 0921 557258
Email: martin.zimmermann@uni-bayreuth.de