

Mitteilungen aus dem  
**Institut für Maschinenwesen**  
der  
Technischen Universität Clausthal  
Nr. 30

(November 2005)

**Herausgeber:**

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Peter Dietz

**Redaktion und Layout:**

Dr.-Ing. Günter Schäfer  
Dipl.-Ing. Christopher Ring

**Anschrift:**

Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel: (0 53 23) 72-22 70  
Fax: (0 53 23) 72-35 01  
E-Mail: [info@imw.tu-clausthal.de](mailto:info@imw.tu-clausthal.de)  
<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

**Titelbild:**

Links: Prüfstand zur Untersuchung des Körperschallübertragungsverhaltens von Wälz- und Gleitlagern im akustisch relevanten Frequenzbereich. Gebaut im Rahmen eines Forschungsprojekts der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. und gefördert von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. Rechts oben: Ergebnisse der numerischen Modalanalyse einer Lagerplatte des Prüfstandes. Rechts unten: Axialbelastungseinheit und demontierte Lagerplatte.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	1
Dietz, P.:	
Rechnergestützte Lebenszyklusbetrachtung in der Produktentwicklung – Hilfe oder Worthülse.....	4
<b>Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen</b>	
Dietz, P.; Wächter, M.:	
Zahnwellenverbindungen mit Novikovprofil.....	13
Schäfer, G.:	
Arbeiten am IMW rund um Welle-Nabe-Verbindungen.....	19
Mupende, I.:	
Beeinflussung der Belastung des Mantels durch die Tragfähigkeit des Seilpakets bei mehrlagig bewickelter Seiltrommel .....	23
Dietz, P.; Mupende, Y. I.; Schwarzer, T.:	
Die Trommelgestaltung bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit Kunststoffseilen .....	27
Hua, Q.:	
Beanspruchungsverhalten und Lebensdauerabschätzung einer Welle zur Unterstützung der Lager eines Drehrohrofens.....	33
<b>Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung</b>	
Guthmann, A.:	
Werkstoffgerechte Lösungsfindung – funktionale Werkstoffe im Konstruktionsprozess .....	37
Rolshofen, W.; Soroka, A.; Eldukhri, E.; Müller, D.:	
I*PROMS: Innovative Production Machines and Systems.....	43
<b>Experimentelle Methoden und Maschinenakustik</b>	
Ring, C.; Schäfer, G.:	
Messung Drehmoment Gelenkwelle .....	47
Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.:	
Berühbare Schnittstelle basierend auf Akustischer Holographie.....	51
Söver, A.; Backhaus, S.:	
Vergleich zwischen der numerischen und experimentellen Modalanalyse einer Stahlplatte .....	55
<b>Lehre und Institutsbetrieb</b>	
Korte, T.:	
3D-Koordinatenmesstechnik am Institut für Maschinenwesen .....	59
Guthmann, A.; Sambale, B.; Schäfer, G.:	
Einsatz eines Lern-Management-Systems am IMW .....	63
Sambale, B.; Schäfer, G.; Wächter, M.:	
Weiterentwicklung dualer Studienangebote im tertiären Bereich .....	67

Guthmann, A.:	
Konstruktion und Simulation mit Pro/ENGINEER – CAD im Hauptstudium am IMW .....	71
Rolshofen, W.; Korte, T.; Ring, C.:	
Doppeldiplom Maschinenbau: Ein Besuch von Clausthaler Studenten an der AGH Kraków .....	73
Söver, A.:	
Herstellung eines Lehrfilms am IMW zum DMS-Messtechnik-Praktikum .....	77
Schäfer, G.:	
Pressespiegel 2005 .....	79

### **Hochschule und Kontakte**

Seitz, T.:	
Rohstoff oder Sondermüll? Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage .....	109
Sambale, B.; Schäfer, G.:	
Qualitätsüberwachung bei einem Automobilzulieferer .....	113
Pająk, T.:	
Thermische Klärschlammabeseitigung in Polen – Grundsätzliche Voraussetzungen und Entwicklungsperspektiven.....	123
Pająk, T.:	
Müllverbrennungsanlagen in Polen – Grundsätzliche Voraussetzungen und Entwicklungsperspektiven.....	127

### **Ausstattung etc.**

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes.....	135
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.2001.....	139
Studien- und Diplomarbeiten am Institut im Jahr 2005 .....	144
Autoren .....	145

## Vorwort

Der erste Schnee kommt, der Winter zieht in den Oberharz ein – es wird wieder Zeit in letzter Minute ein Vorwort zu den diesjährigen Institutsnachrichten zu schreiben, damit Sie die Sendung auch diesmal bestimmt vor dem Jahresende erhalten. Es ist doch seltsam, wie schnell die Zeit vergeht, wenn das ganze Jahr mit Aktivitäten ausgefüllt ist.

Hier gibt es auch wieder eine Reihe zu berichten. Während ich im letzten Jahr noch sehr unsicher über meine Nachfolge war, hat sich durch die interessierte Anteilnahme vieler Kollegen das Bild zum jetzigen Zeitpunkt entscheidend gewandelt, so dass ich darauf hoffe, das Vorwort der nächsten Institutsmitteilungen bereits als Mitautor gestalten zu können. Die Universitätsleitung hat die Angelegenheit sehr unterstützt und auch von den bei solchen Übergängen üblichen Personalrestriktionen abgesehen, um auf diese Weise das Institut für Maschinenwesen als Kerninstitut voll funktionsfähig zu erhalten.

Nach den Schreckensnachrichten der vergangenen Jahre hat sich unsere kleine und feine Universität sowohl in der öffentlich-politischen Meinung wie auch im Zulauf durch Studenten wieder festigen können. Erstmals haben wir mit diesem Wintersemester wieder über 3000 Studierende und alle Tendenzen zeigen relativ steil nach oben. Dies hat auch damit zu tun, dass unsere Wirtschaftswissenschaftler mit einem neuen Bachelor-/Master-Studiengang einen Renner gelandet haben, nach wie vor ist aber der Maschinenbau die Kernkompetenz unserer Hochschule – was uns im Wintersemester 104 neue Anfänger im Maschinenbau eingebracht hat, die uns die Maschinzeichnenkurse (insgesamt ca. 260 Studierende übers Jahr) wieder einmal überfüllen.

Die Überführung unserer maschinenbaulichen Studiengänge in die Bachelor-/Master-Form gemäß der Bologna-Erklärung kommt nach einigem Zögern allmählich in Schwung, wobei meiner Meinung nach noch unendliche Diskussionen zu überwinden sind. Vielleicht finden wir in diesem ganzen Umbildungsprozess ein besonders interessantes Programm für Studierende, das zurzeit aus dem sehr positiv evaluierten Intensivstudiengang entwickelt werden soll – betreut von Martina Wächter.

Dabei hat sich unsere Universität wieder weiter internationalisiert – mittlerweile sind fast 40% unserer

Studierenden Ausländer. Die größte Gruppe stellen die Chinesen, die mit ca. 560 Studierenden das Hochschulbild stark beeinflussen. Die Ausländerbetreuung macht uns natürlich gerade in den Fächern Maschinzeichnen und Maschinenelemente schwer zu schaffen. Um es positiv auszudrücken: Wenn die Mitarbeiter unseren Ausländern eine „Stoffbuchsendichtung“ richtig erläutert haben, sind sie für den internationalen Wettbewerb hinreichend mit Ausdauer und Geduld gesegnet. Dass der Sprachenwirrwarr auch in den Prüfungen zu außerordentlich interessanten Protokollen führt, spricht dabei eher für Flexibilität und Sprachkenntnis meiner Mitarbeiter als für die Deutschkenntnisse der Studierenden.

Damit und mit einer positiven Einstellung des Präsidiums zu unseren internationalen Beziehungen ist aber ein Trend eingeschlagen, der unsere Hochschule und das Institut weiter mit der Welt verknüpfen wird. Doppel-Diplomstudiengänge (betreut von Günter Schäfer und Anke Guthmann) werden zurzeit mit Polen und Spanien mit wachsendem Erfolg durchgeführt, weitere sind mit Frankreich und Italien geplant. Mit Mexiko läuft ab 2006 mit Förderung durch den DAAD ein vierjähriges Projekt zur Umstellung der dortigen Ingenieurerziehung nach dem Muster deutscher Diplomstudiengänge, wobei wir im Rahmen der Produktentwicklung eine neue Lehrmethodik entwerfen. Bianca Sambale hat aus ihren Erfahrungen mit dem Kuba-Projekt die Leitung übernommen. Etwas Ähnliches ist mit Russland und Georgien (manche Ehemaligen haben da heute noch Erinnerungen) geplant. Und das erfolgreiche Projekt EAPSTRA, das sich mit der Anwendung rechnergestützter Lifecycle-Betrachtungen für die Produktentwicklung befasste, wird hoffentlich eine Neuauflage in Thailand und Malaysia erleben.

Einen Höhepunkt hatten wir in diesem Jahr mit unserem alten Freund Wan Gang zu verzeichnen, der in der Zwischenzeit Präsident der Tongji-Universität in Shanghai geworden ist: Wan Gang erhielt von unserem Ministerpräsidenten Christian Wulff den Niedersächsischen Orden für besondere Verdienste am Band. Was natürlich die Position des IMW in Niedersachsen und China stärkt! Zurzeit richten wir auf Basis der alten Beziehungen in Shanghai ein Hochschulkolleg ein, in dem chinesische Studierende eine entsprechende Vorbildung für das Studium in Clausthal erhalten.

Mit Wan Gang sind wir bei den Personalien. Frau Bähr ist im letzten Jahr in den wohlverdienten Ruhestand gegangen. Nachdem ich Ihnen im letzten Jahr von einer verstärkten Promotionsschwemme und der Einwerbung einer Reihe von „neuen wilden“ Mitarbeitern berichtet habe, hat sich dieser Trend der Erneuerung in diesem Jahre weiter fortgesetzt. Carsten Düsing hat erfolgreich promoviert, Hua Qingsong, Dirk „Dieter“ Müller, Detlef Trenke und Stefan Backhaus werden wohl in den ersten Monaten 2006 soweit sein und das Institut verlassen, dafür konnten wir mit Bianca Sambale, Tobias Seitz, Tim Schwarzer und Radoslaw Kruk neue Mitarbeiter gewinnen, die insbesondere auf dem Gebiet der Rechnerunterstützung aus ihrem Studium Erfahrungen haben, aber auch das immer wichtigere Gebiet der Maschinenakustik verstärken helfen. Mit den „Neuerwerbungen“ im letzten Jahr haben wir dann wieder einen guten Mix aus Schraubern und Theoretikern, um unsere zahlreichen Forschungsvorhaben erfolgreich vorantreiben zu können.

Auch hier gibt es trotz der immer restriktiveren Förderungspolitik und trotz des schon sehr lästigen „Hochschuloptimierungskonzept“ unserer Landesregierung (was eigentlich nichts anderes heisst als unsere Hochschule auf die geringstmögliche Ausstattung herunterzufahren) eigentlich nur Erfreuliches zu berichten. Die DFG hat uns eine Reihe von Projekten auf dem Gebiet der Maschinenelemente, insbesondere bei den Zahnwellenverbindungen, den Stiftverbindungen und den Druckkämmen genehmigt, die eher „philosophisch“ geprägten Projekte zur Einbindung der Werkstoffwahl in die frühen Phasen der Produktentwicklung werden weiter gefördert und die Entwicklung von Seiltrommeln unter den neuen Ideen der faserverstärkten Seile geht nach wie vor gut voran. An einem neu beantragten Sonderforschungsbereich zur Entwicklung örtlich verstärkter Maschinenbauteile wollen wir uns mit zwei Projekten beteiligen. Nach erfolgreich abgeschlossenen Projekten bei der FVA beschäftigen wir uns mit Forschungsarbeiten zur Betriebsfestigkeitsberechnung von Welle-Nabe-Verbindungen (gemeinsam mit Dresden) und mit der Schallübertragung in Getrieben. Gerade in diesem Projekt (das uns noch ein bisschen Sorge bereitet) haben wir den mittlerweile größten Prüfstand unseres Instituts errichtet und mit viel Aufwand und Großgerätemitteln eine exquisite Messmöglichkeit zur Schall- und Schwingungsmessung geschaffen (Stefan Backhaus berichtet). Die Sorgen hier betreffen im

Wesentlichen die Beherrschung der komplizierten Messtechnik, die uns an der strikten Verfolgung des Projektes etwas gehindert hat.

Begleitet werden die Forschungsaktivitäten von der Beschaffung von Prüf- und Messanlagen und der weiteren Ausstattung der Werkstatt. Ein positiv beschiedener Antrag wird uns im Bereich der dynamischen Vorgänge in Antriebssträngen mit Telemetrie und weiterer Messtechnik beglücken, die Software wird um die Simulationen des LMS-Paketes Virtual Lab (Programme zur Simulation von Strömungsvorgängen und Geräusch) erweitert und der Aufbau unserer Schleudergrube erfährt eine Bereicherung mit weiteren Messwellen, wobei ein Welle bis 45.000 U/min im Aufbau begriffen ist. Die durch die verstärkten Aktivitäten im Bereich der schnelllaufenden Rotoren entstandene Lücke im Werkstattbereich wird durch eine weitere Drehmaschine geschlossen.

Die permanenten Erneuerungen und Weiterentwicklungen des Instituts geben mir das Gefühl, im nächsten Jahr das Institut mit guten Gewissen und „gefüllt“ mit Aufgaben in Lehre und Forschung an einen aktiven Nachfolger übergeben zu können. Das Wichtigste erscheint mir dabei der Geist des Instituts, sich mit neuen Lehr- wie mit Forschungsaufgaben beschäftigen zu wollen, das gegenwärtige Wissen und die Lehrmethoden zu erweitern und damit die Grenzen des Wissens. Dies wird meines Erachtens durch die neuen wie durch die bewährten Mitarbeiter in hervorragender Weise getragen – und so ganz weit weg werde ich auch nach meiner Pensionierung dem Institut nicht sein!

Wie immer wollen wir Ihnen mit diesen Institutsmitteilungen eine geruhsame Lektüre „zwischen den Jahren“ bieten, mit der Sie ein bisschen an unseren Aktivitäten teilnehmen können. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen ein stressfreies Jahresende, bedanke mich für die Zusammenarbeit im letzten Jahr und hoffe, dass Sie uns auch im kommenden Jahr gewogen sein werden.

Fröhliche Weihnachten!





Der Preisträger des Verdienstkreuzes am Bande des Niedersächsischen Verdienstordens Prof. Wan Gang von der Tongji-Universität in Shanghai bei der Unterzeichnung des Fortsetzungsvertrages zur weitergehenden Zusammenarbeit mit der TU Clausthal. (Pressestelle der TU Clausthal)

## Rechnergestützte Lebenszyklusbetrachtung in der Produktentwicklung – Hilfe oder Worthülse?

Dietz, P.

*Product Lifecycle Support (PLCS) wird als neues Mittel in der systematischen Produktentwicklung insbesondere in einer rechnergestützten Vorgehensweise empfohlen und ist Gegenstand mehrerer Forschungsvorhaben am IMW. Der folgende Artikel geht mit dem sicherlich sehr interessanten Thema etwas kritisch um und stellt Fragen bezüglich der Anwendbarkeit solcher Methoden im Produktentwicklungsprozess.*

*Product Lifecycle Support (PLCS) as an approach in computer aided design of products is topic of some research projects of IMW. This article gives a short introduction to this interesting field and raises a few critical questions about the application in industry.*

### 1 Produktentwicklungsprozess, concurrent engineering

Betrachtungen über den Lebenszyklus sind bei der Entwicklung neuer Produkte und Verfahren nichts Neues. Jeder Produktentwickler hat zu allen Zeiten sich schon Gedanken machen müssen über die einzelnen Stadien des Produktlebenszyklus, von der Definition der Produktfunktionen über die Fertigung und Handhabung bis hin zu einem möglichen Recycling. Die Betrachtungsweisen, die hiermit zusammenhängen, sind auch nicht ein Problem, das mit Hilfe eines rechnergestützten Tools zu lösen ist. Hier wird die Verantwortung und die Kreativität des Konstrukteurs als Individuum angesprochen. Der Rechner kann als intelligentes Notizbuch Daten aufnehmen und wiedergeben, die Auswertung und die Schlussfolgerung für die Gestaltung eines neuen Produktes sind aber so vielfältig, dass die Auswertung von Lifecycle-Betrachtungen eng verbunden ist mit dem Urteilsvermögen und der Kreativität des Produktentwicklers.

Nach Pahl /1/ ist es „... die Aufgabe des Ingenieurs, für technische Probleme mithilfe natur- und ingenieurwissenschaftlicher Erkenntnisse Lösungen zu finden und sie unter Berücksichtigung stofflicher, technologischer und wirtschaftlicher Bedingungen sowie gesetzlicher, umwelt- und

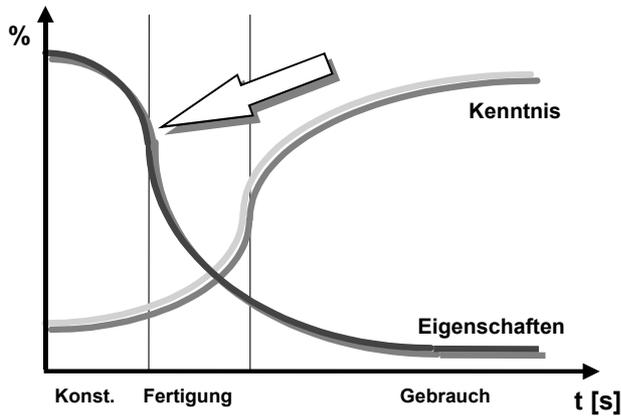
*menschenbezogener Einschränkungen in optimaler Weise zu verwirklichen.“*

Dieser Satz hat zwei Teile, die auch bezüglich ihrer Lifecycle-Betrachtung unterschiedlich gewertet werden müssen. Im ersten Schritt der Aufgabenerkennung und Konzeption ist das Leben eines Produktes nach seinen erforderlichen Funktionen zu durchsuchen, diese Funktionen müssen analysiert werden und führen zu der Ideenfindung, zum Konzept eines neuen Produktes. Das *requirement engineering* – ob nun rechnergestützt oder nicht – spielt hier eine gewichtige Rolle, die *requirements* können aus einer lebensdauerorientierten Aufgabenanalyse gewonnen werden.

Liegt das Konzept fest, so muss es realisiert werden. In diesem Bereich der Konstruktion gilt es besonders die gewählte Konzeption in einem Simulationsprozess einer Lebenszyklusbetrachtung zu unterziehen und dabei verschiedene Dinge zu erkennen und zu optimieren, bevor die erste Maschine gefertigt wird. Hierzu gehören Fragen der Betriebsfestigkeit, Fragen des Verschleißes und der Wartung, aber auch das Problem der Korrosion und schließlich die Frage des Recyclings, denn wir alle wollen ja künftig nachhaltige Produkte schaffen.

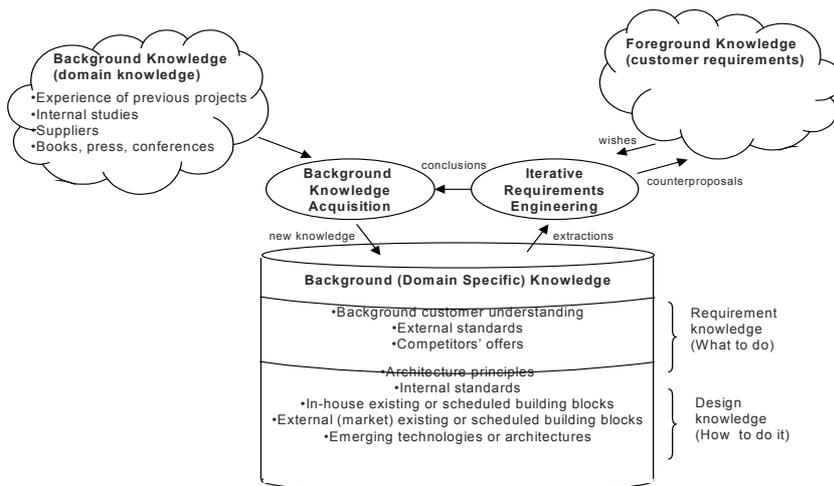
Während in der ersten Phase der Schwerpunkt der Lifecycle-Betrachtung eher das Erkennen der Aufgabe, der Hauptfunktionen des Produktes und seines Anwendungsbereiches war, wird hier ganz konkret mit oft sehr aufwändigen Versuchen der Lifecycle im Detail untersucht.

Das Neue an dieser lebenszyklusorientierten Arbeitsweise ist eigentlich nur, dass man nach Methoden sucht wie man diese Informationen sicher handhaben kann. Aus dieser Betrachtungsweise ist das sogenannte *concurrent engineering* entstanden. Im Mittelpunkt steht die Forderung, über das zukünftige Produkt soviel Wissen bereit zu stellen, dass eine zielsichere Konstruktion möglich ist. Dies ist nicht selbstverständlich, denn der Produktentwicklungsprozess wird von zwei besonderen Restriktionen begleitet.



**Bild 1:** Informationsproblem während der Konstruktion

Wenn wir uns in einem Diagramm über der Produktlebenszeit einmal auftragen (**Bild 1**), welche wichtigen Merkmale des Produktes zu welchem Zeitpunkt festgelegt werden, stellen wir fest, dass ca. 70 % aller Merkmale einschließlich der Kosten bereits zu Beginn des Produktlebens, also in der Phase des Konstruierens festgelegt sind.



**Bild 2:** Firmenspezifisches Wissen /2/

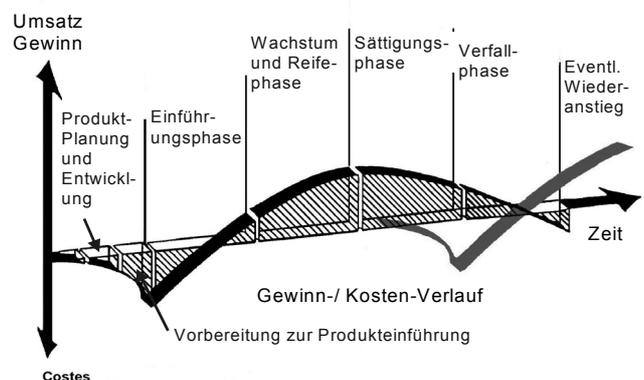
Die nachfolgenden Phasen wie beispielsweise die Fertigung, die Einführung in den Markt und die Gebrauchszeit des Produktes haben nur unwesentlichen Einfluss auf die Produkteigenschaften. Wenn wir uns auf der anderen Seite betrachten, welches Wissen um Merkmale des Produktes während der Lebenszeit des Produktes vorliegt, so können wir grundsätzlich davon ausgehen, dass die Kenntnis über ein Produkt erst dann vollständig ist, wenn es im Markt aufgenommen wurde. Der Konstrukteur jedenfalls weiß fast nichts über dieses Produkt, er kann höchstens aus Produkten des Wettbewerbs oder aus alten Produkten des Unternehmens schließen, was er an seinem neuen Produkt verändern und verbessern muss. Dieses Wissen um Zu-

sammenhänge ist ein firmenspezifisches Wissen, das mit jedem Produkt wächst und das auch sehr sorgfältig – zum Beispiel in wissensakquirierenden Systemen – in einem Unternehmen gehandhabt wird (**Bild 2**).

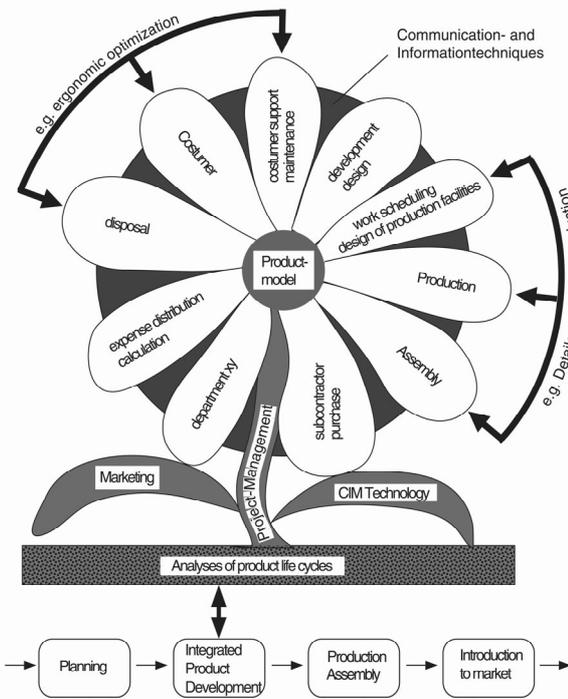
Der Produktentwickler bewegt sich trotz des ständigen Wissenszuwachses in einem Umfeld, wo er bei zu geringer Information Entscheidungen über ein Produkt treffen muss, die diesem Produkt lebenslang anhaften. Dies ist ein Punkt, der das Leben eines Produktentwicklers zwar interessant, aber auch nicht ungefährlich macht.

Dies hängt natürlich zusammen mit der eigentlichen Lebensdauer eines Produktes und seiner Nachfolge durch ein neues Produkt, wie in **Bild 3** zu sehen ist. Nach der Entwicklung eines Produktes, die zunächst eine Investition für das Unternehmen darstellt, muss in einer Einführungsphase diese Investition erst wieder verdient werden, bevor das Produkt sich zur „Cash-Cow“ verwandelt und dem Unternehmen Gewinn einbringt. Aber gerade

in dieser Phase muss das Unternehmen daran denken, ein neues Produkt zu kreieren. Das heißt, der Produktentwickler muss gerade dann an ein neues Produkt mit neuen Eigenschaften denken, wenn das gegenwärtige Produkt wirtschaftlichen Erfolg einbringt und der Stolz des Unternehmens ist. Auch dies ist für den Produktentwickler keine einfache Aufgabe und man hat vor Jahren erkannt, dass man systematische Hilfestellungen braucht.



**Bild 3:** Produktlebenszyklus



**Bild 4:** concurrent engineering

Diese Hilfestellungen sind einmal methodischer Art, indem man die in einem Unternehmen unterschiedlich verteilte Kompetenz in einer Entwicklungsgruppe zusammenfasst und mit Hilfe der Gruppendynamik soviel Wissen wie möglich aus dieser Gruppe herauspresst. In **Bild 4**, das die Produktentwicklung als Blume darstellt, die sich auf dem Nährboden des Wissens über den Lifecycle zur Blüte entfaltet, kann man sich diese Blüte auch als runden Tisch vorstellen, an dem innerhalb eines Brainstorming oder Workshops jeder seine Beiträge aus seiner Sicht des Produktlebens hinzufügt. Dies ist die eigentliche Funktionsweise des *concurrent engineering*.

Das Gerüst für diese Überlegungen ist immer der Lebenszyklus des Produktes. Die gezeigte Vorgehensweise erzeugt dabei eine ungeheure Fülle an Informationen, die verarbeitet werden müssen und für die man sich sicherlich ein rechnergestütztes Werkzeug wünscht, das eine Ordnung und Sicherung dieser Informationen übernimmt und das die Kommunikation zwischen den einzelnen Partnern in diesem Projekt erleichtert.

Diese Arbeitsweise ist in deutschen Unternehmen weitgehend eingeführt und lässt sich an der Vorgehensweise insbesondere der Automobilindustrie sehr deutlich erkennen.

Die gezielte Informationsverarbeitung durch rechnergestützte Mittel hinkt dieser Entwicklung aber noch etwas hinterher und ist Gegenstand konstruktionsmethodischer Forschungsarbeiten am IMW.

## 2 Lifecycle-Betrachtung in der Konzeptphase

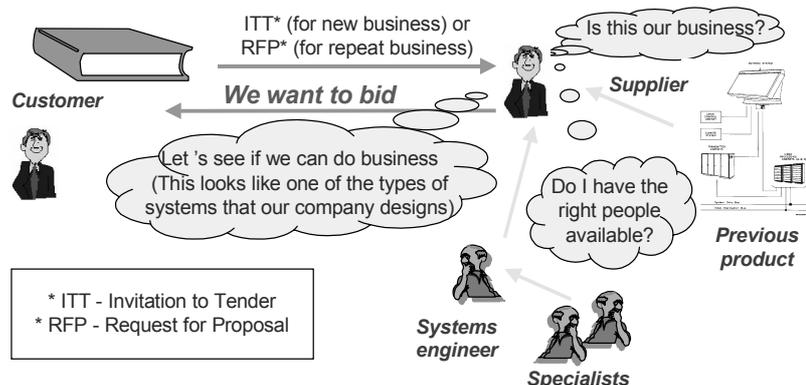
Grundlage der folgenden Betrachtung ist die Vorgehensweise nach VDI 2221. Nur wenn die Kriterien der Aufgabenerstellung alle erfüllt sind, kann der Produktfindungsprozess in die nächste Phase einsteigen, wenn dies nicht der Fall ist, dann muss die vorhergehende Phase noch einmal durchlaufen werden.

Man sieht hieraus, wie wichtig die Klärung der Aufgabe und die Aufstellung einer eindeutigen Anforderungsliste sind. Aber das sind genau die Informationen, die wir nur aus einer intensiven Betrachtung des Lifecycles entwickeln können. Das Management von Anforderungen ist ein komplexes Problem, das weniger mit technischen Schwierigkeiten zu tun hat als mit der Kommunikation von Kunde, Anbieter, Zulieferer usw. /3/.

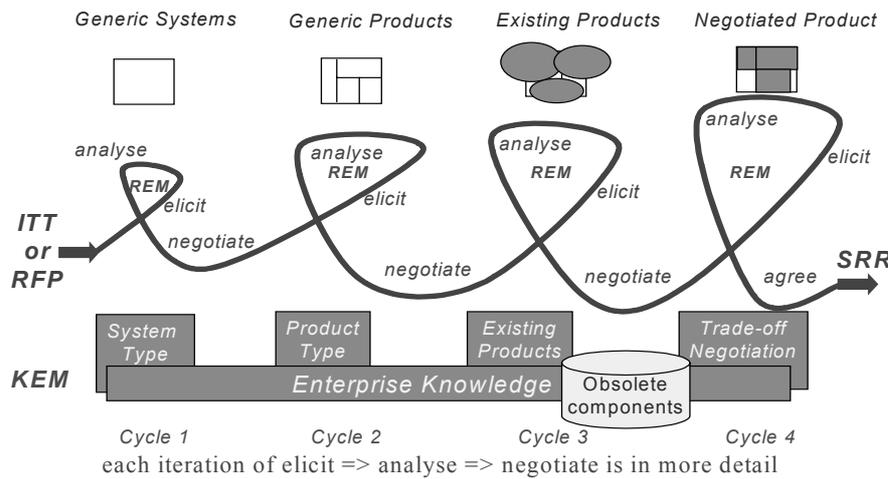
Der im ersten Ansatz einfach erscheinende Abgleich (**Bild 5**) zwischen Kunden, Anforderungen und den Möglichkeiten des Unternehmens erweist sich sehr schnell als eine aufwendige Analyse, die von generellen Aufgaben und generellen Anforderungen bis hin zur Spezifizierung eines Detailproblems führt. Es gibt zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen, die versuchen, durch eine strukturierte Analyse von Anforderungen eine vollständigen Anforderungsliste für ein Produkt zu erhalten.

**Bild 6** zeigt als Ergebnis des KARE Projektes /2/ die exemplarische Umsetzung und Analyse der Aufgabenstellung.

### Goal: Match the Customer Needs to the Supplier Capabilities



**Bild 5:** Abgabe eines Angebots /2/



**Bild 6:** Prozess der Spezifizierung /2/

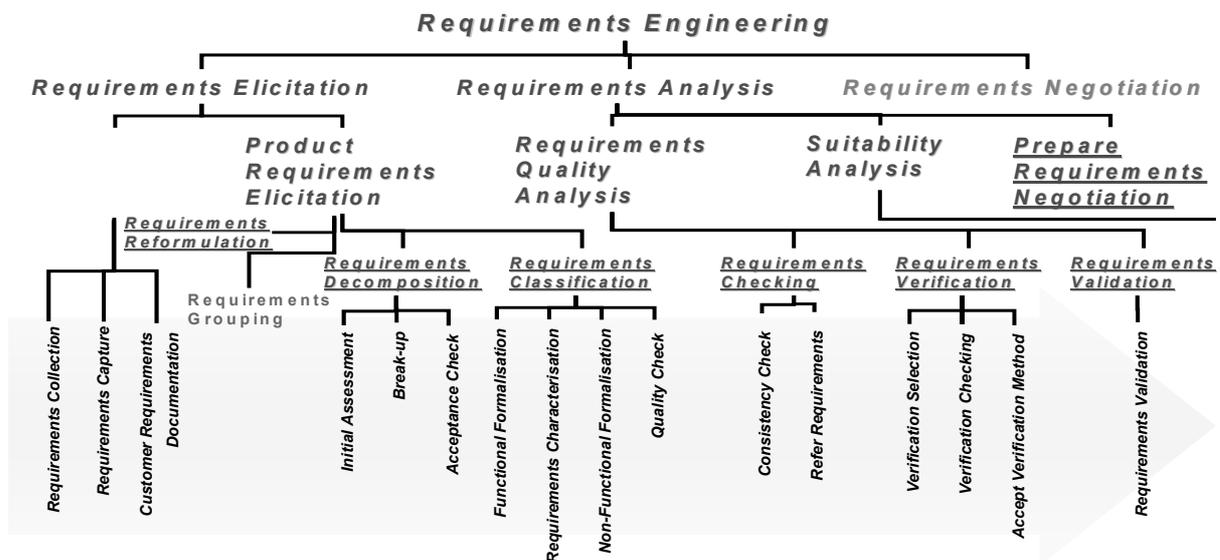
Eine solche Dekomposition der Anforderungen nach einem bestimmten Schema (**Bild 7**) erfordert aber immer die Handhabung von Wortinformationen und muss für jeden Auftrag neu vollzogen werden /4/. Wichtig ist dabei, dass die Relevanz aller dieser Fragen immer über den gesamten Lifecycle hinweg geprüft werden muss, um Anforderungen auch richtig zu erfassen.

Als Ergebnis mehrerer Untersuchungen muss heute gesagt werden, dass ein rein rechnergestütztes Verfahren zur automatisierten Auflistung von Anforderungen bisher nicht möglich ist, obwohl gerade im Automobilbau durch aufwendige Trendstudien versucht wird, den Kundengeschmack der Zukunft

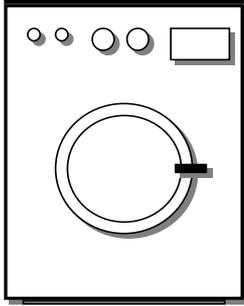
voraus zu sehen /5/. Die Präsentation der Anforderungen wird aus diesem Grunde heute immer noch objektbezogen in Anforderungslisten vorgenommen. Diese Liste ist für die Entwicklung des Produktes das zentrale Dokument, auf das alle Beteiligten einer Produktentwicklung gemeinsam zugreifen müssen und das auch einem Änderungsdienst unterliegen muss.

Eines der wichtigsten Probleme in der Praxis bei der Aufstellung von Anforderungslisten und Klärung der Aufgabe ist die Vermeidung von Vorfixierungen. Das sind Vorstellungen, die man von einem Produkt hat, obwohl dieses noch nicht existiert.

In dem in **Bild 8** gezeigten Beispiel für die Konstruktion einer Waschmaschine wird jedem klar, dass man gedanklich das im Bild gezeigte Profil der bekannten Waschmaschine im eigenen Keller vor Augen hat, dass man aber mit dieser Vorfixierung bereits auf der geometrischen Form sich keine Gedanken über einen neuen Waschprozess macht. Diese Vorfixierung kann also eine Entwicklung sogar behindern.



**Bild 7:** Auszug der Strukturierung zur Erstellung von Anforderungslisten, Ergebnis aus /2/



**Bild 8:** Vorfizierung „Waschmaschine“

Ebenso wie bei der Erstellung der Anforderungsliste ist auch bei der intensiven Analyse der Aufgabenstellung eine rechnergestützte Führung bisher nicht in Sicht. Alle gezeigten Methoden laufen auf die Verwendung des Rechners als „Bibliotheksprogramm“ nach nicht sehr generellen hierarchischen Strukturen hinaus, die im Grunde genommen keinen höheren Stellenwert annehmen als die bisherigen Merkzettel des Konstrukteurs und bei Weitem nicht an die kreativen Analysen herankommen, wie sie gegenwärtig in gruppenspezifisch angelegten Entwicklungsworkshops üblich sind. Der gegenwärtige Stand der Informationstechnik stellt aber zumindest eine Hilfe im Sinne einer Anregung des Analyseprozesses durch selbstlernende Vorgehensweisen in Aussicht – aktuelle Forschungsergebnisse sind meines Erachtens auf dem richtigen Weg /5/.

### 3 Lifecycle-Betrachtung in der Realisierungsphase

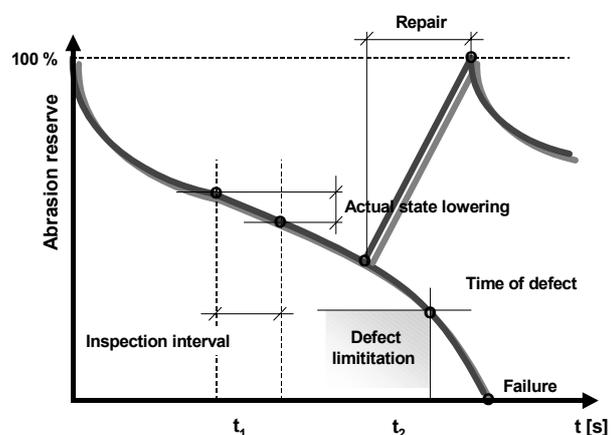
Mit den folgenden Ausführungen möchte ich auf den zweiten Bereich des Produktentwicklungsprozesses übergehen, nämlich die Beachtung des Lifecycles bei der Dimensionierung und Ausführung des Produktes. Zu diesem Zeitpunkt kennt man schon die Hauptfunktion des Produktes, z.B. Leistung, Hauptabmessungen und die für die Funktion erforderlichen Wirkbewegungen und Wirkflächen. Bevor das Produkt gefertigt und ausgeliefert wird, muss eine detaillierte Betrachtung angestellt werden über alle Einflüsse, die im Verlauf der geplanten Lebensdauer dieses Produktes auf dieses einwirken und es muss sichergestellt werden, dass das Produkt bis zur Beendigung seines Lebenszyk-

lus ohne Ausfälle (safe-life) oder mit vertretbaren Ausfällen (fail-safe) arbeitet.

Hierzu gehören die bekannten Simulationsrechnungen der Betriebsfestigkeit und konstruktive Maßnahmen für den Fall eines begrenzten Versagens. Hierzu gehören aber auch Betrachtungen über das Verhalten des Produktes unter Einflüssen wie Temperaturwechsel, Fragen der Korrosion, der Erosion oder des Verschleißes. Schließlich ist das Produkt zu untersuchen im Hinblick auf sein Umweltverhalten, das heißt mögliche Emissionen oder die Entwicklung von Lärm.

Aufgrund der eingangs geführten Diskussion, dass man die Eigenschaften eines Produktes erst dann genau kennt, wenn dieses Produkt vorhanden ist, ist eine solche Arbeit der Lebensdauerbetrachtung durch Simulationen sehr stark geprägt von Erfahrungen, die aus ähnlichen Produkten oder ähnlichen physikalischen Vorgängen vorliegen – ich verweise hier auch auf die Ausführung zu Unternehmenswissen. Auch hier ist die Wissenschaft noch nicht so weit, wie dies wünschenswert wäre, und dies möchte ich an dem folgenden Beispiel aus dem Bereich der Instandhaltung von Produkten beschreiben:

Jedes Produkt unterliegt im Laufe seines Lebens Beanspruchungen, die zu Schädigungen führen. Bei der Konstruktion müssen solche Schädigungen beachtet werden und eine Strategie entwickelt werden, wie diese Schädigungen erkannt, verhindert oder durch Maßnahmen ausgeglichen werden. Der Grundgedanke einer solchen Betrachtung beruht auf dem Abnutzungsvorrat des Produktes wie er in **Bild 9** gezeigt wird.

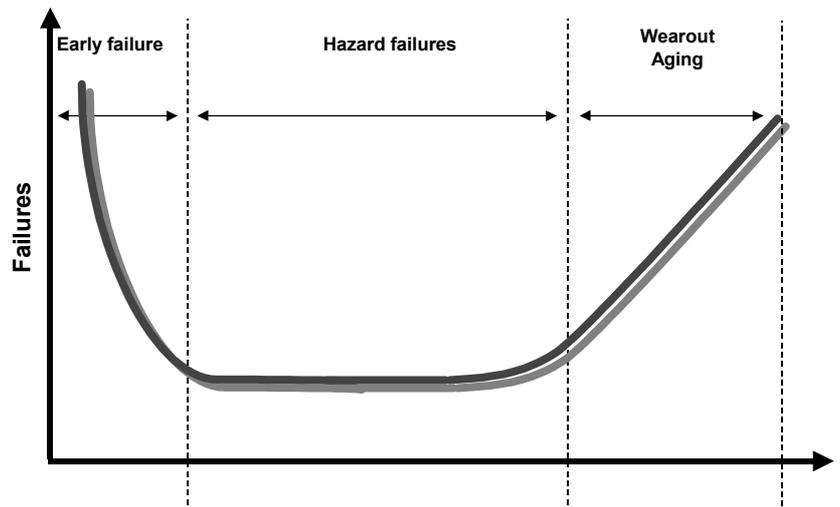


**Bild 9:** Abnutzungsvorrat eines Produktes

Bei der Auslieferung besitzt ein Produkt einen Vorrat an Funktionsbereitschaft, der durch Betriebsbeanspruchungen wie Korrosion, Verschleiß, Ermüdung usw. über der Lebenszeit aufgezehrt wird, bis die Funktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet ist. Hieraus abgeleitet werden Maßnahmen, die bei der Entwicklung eines Produktes festzulegen sind, z.B. Inspektionsmaßnahmen, um den Fortschritt der Abnutzung zu erkennen (z.B. Messung des Spiels in Kupplungen), Maßnahmen zur Beeinflussung des Kurvenverlaufs, um damit eine Erhöhung der Lebensdauer zu erzielen (z.B. Schmierung und Wartung) oder Maßnahmen, die eine Wiederherstellung des Abnutzungsvorrates garantieren (Instandsetzung).

Diese Betrachtung des Abnutzungsvorrates ist sehr grundlagenbezogen und allgemein. Hier sehe ich ein großes Feld der rechnergestützten Lifecycle-Betrachtungen mit ihrem Einfluss auf die konstruktive Gestaltung eines Produktes. Hier sehe ich aber auch eine große Chance bei der Anwendung von Unternehmenswissen, wenn dieses systematisch aus dem Lifecycle-Verhalten bestehender Produkte erweitert und verwaltet wird.

Das Problem liegt im Wesentlichen darin, dass man den Verlauf der Abnutzungskurve richtig erfasst und für eine Vorhersage zugänglich macht. Einige solcher Kurven sind bekannt wie z.B. die sogenannte „Badewannenkurve“ (**Bild 10**), die zur Zuverlässigkeitsanalyse elektronischer Bauteile benutzt wird.



**Bild 10:** „Badewannenkurve“: Weibull-Verteilung der Ausfälle elektronischer Produktkomponenten

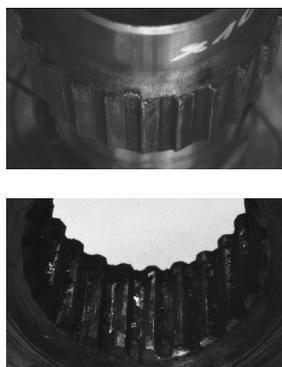
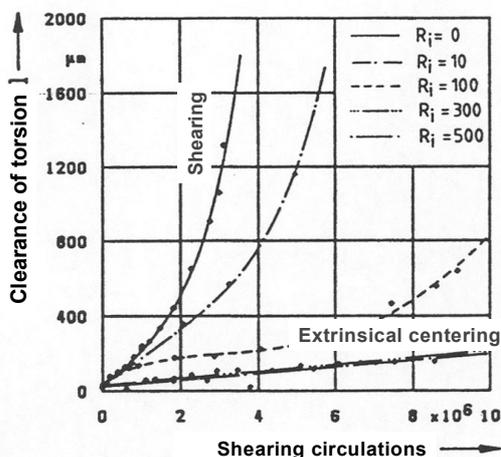
Andere erkannte Kurven für die Lebensdaueroverschätzung sind die Kriechkurven der Materialien bei hohen Temperaturen oder die Verschleißkurven, die sogenannten Taylorgeraden, für die Abnutzung von spanenden Werkzeugen im Eingriff.

Diese Abnutzungskurven sind meist beeinflusst von Belastungsparametern, wie die in **Bild 11** aufgeführte Kurve für den Verschleiß an Zahnwellenverbindungen zeigt /6/. Man kann aber auch Maßnahmen während des Lifecycles der Produkte in diese Überlegungen nachvollziehen.

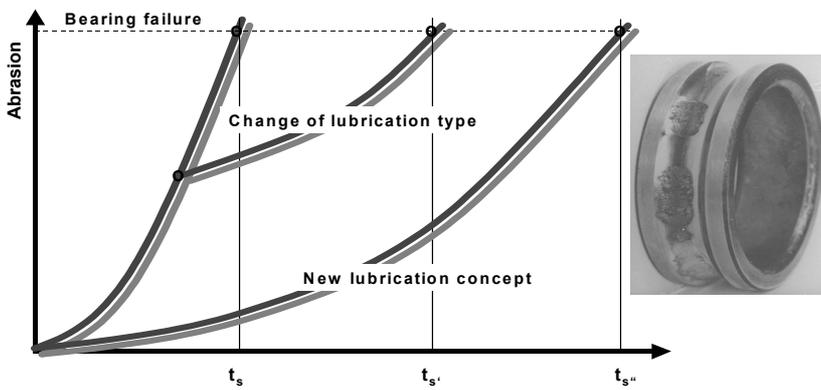
In **Bild 12** wird beispielsweise der Verschleiß an Wälzlagern durch Inspektion in Verschleißfortschrittskurven festgehalten. Man sieht, dass man außer einem völlig anderen Schmierkonzept von Anfang an auch eine Änderung der Schmierung während des Betriebszeitraumes vornehmen kann, um damit die Lebensdauer der Teile zu erhöhen.

Die Definition solcher Abnutzungskurven, die in einer Simulation bei der Produktentwicklung genutzt werden können, ist nur in seltenen Fällen auf physikalische Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen, meistens sind es Erfahrungen mit ähnlichen Konstruktionen. Umso wertvoller sind aber solche Erfahrungswerte oder Messwerte aus vergleichbaren Untersuchungen, da sie eine Vorhersage nach dem Prinzip des „worst case“ ermöglichen.

Die an diesem Beispiel gezeigte Möglichkeit des gezielten Erwerbs und der Verwaltung von Unternehmenswissen bezüglich des Lebensdauerhaltens



**Bild 11:** Verschleiß an Zahnwellenverbindungen /6/



**Bild 12:** Verschleiß eines Wälzlagerns

eines Produktes zur Unterstützung von Simulationsbetrachtungen erscheint mir ein lohnendes Forschungsthema im Bereich der rechnerunterstützten Produktentwicklung. Ableiten lassen sich hier nicht nur Konstruktionsregeln für das Produkt selbst, sondern auch Strategien, die dynamisch dem jeweiligen Zustand des Produkts im Laufe seines Lebens angepasst sind.

**4 Das Kommunikationsproblem, engineering workflow**

Die oben dargestellte Arbeitsweise im concurrent engineering macht schon deutlich, dass sich die Produktentwicklung auszeichnet durch eine hohe Frequenz und eine abteilungsübergreifende Verschachtelung von Kommunikations- und Entscheidungsvorgängen. Hinzu kommt, dass heute immer mehr Produkte in einer Zulieferkette entstehen, gefertigt und vertrieben werden, in der ein unternehmensübergreifender Kommunikationsfluss vorhanden sein muss. *Fazit:* Die Lifecycle-Betrachtung und das concurrent engineering erhöhen die Kommunikationsmenge und den Kommunikationsinhalt in den frühen Produktentwicklungsphasen erheblich. Die stärkere Verteilung der Kompetenzen im Produktentwicklungsprozess muss damit zu neuen Kommunikationsformen führen. Das Papier-Dokument als Grundlage ist zu schwerfällig und zu fehleranfällig.

Die Lösung dieses Kommunikationsproblems besteht darin, dass man statt ständig geänderter Dokumente die Änderung relevanter Parameter selbst innerhalb der Entwicklungsgruppe kommuniziert. Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist dabei, dass bei der jetzigen Methode des Dokumentenaustauschs der Designer ca. 89 % seiner Zeit mit

unproduktiven Tätigkeiten wie Informationssuche, Kommunikation und dem Warten auf Entscheidungen verbringt.

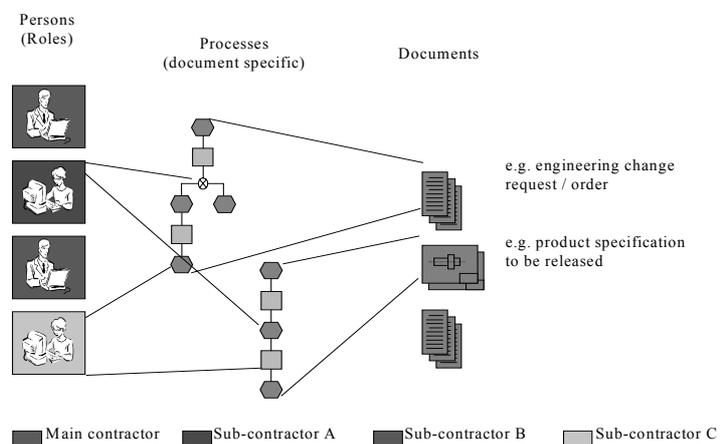
Im Rahmen des Forschungsprojektes SIMNET /7/, das sich mit dem Beispiel der Produktentwicklung eines Eisenbahndrehgestelles einschließlich Antrieb und Bremssystem befasste, wurde festgestellt, dass ca. 80 geometrische, funktionale und material-

spezifische Parameter frühzeitig und konsequent zwischen allen beteiligten Entwicklungspartnern abzustimmen sind, um ein fehlerfreies Drehgestellkonzept zu gewährleisten. Ziel war, dass diese Parameter als Informationsobjekte mit eigenem Lebenszyklus erfasst und verwaltet werden, ohne dass hierfür eigene Dokumente eröffnet werden.

Diese Erkenntnisse führten zu der Idee, Parameter als Kommunikationsbasis für die Zusammenarbeit zwischen den Entwicklungspartnern zu nutzen.

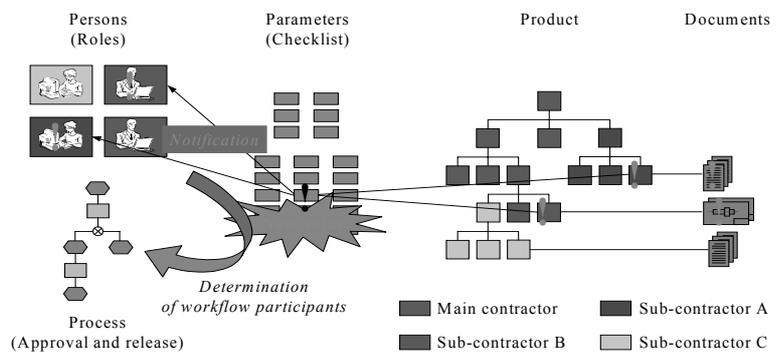
Die Plattform für eine solche Kommunikationsstruktur ist der Workflow-Prozess, wie er aus der Produktionskette bekannt ist. In einem solchen klassischen Workflow (**Bild 13**), der auf den Dokumenten der Produktspezifikation oder Änderungsdokumenten aufgebaut ist, werden die „Personen“ - dies können Abteilungen innerhalb eines Unternehmens sein oder die bei einer übergreifenden Entwicklung beteiligten Unternehmen - verantwortlich gemacht für einzelne Prozesse, die mit diesen Dokumenten verbunden sind.

Dieser Workflow gestattet keine flexible Änderung, da die Zuordnung in dieser Wirkungskette einmalig festgelegt ist. Die Vorgehensweise nach der hier propagierten flexiblen Struktur beinhaltet, dass die



**Bild 13:** Klassischer Workflow

maßgebende Größe für den Entwicklungs- und Änderungsbedarf die Produktstruktur mit ihren Eigenschaften ist. In **Bild 14** ist diese gekennzeichnet als eine Untergliederung des Produktes mit einer Zuordnung zu den entsprechenden Partnern, die natürlich auf den Dokumenten der Produktentwicklung beruht und für die auch die Fertigungsprozesse festgelegt sind.



**Bild 14:** Informationsfluss bei Parameteränderungen /7,8/

Eine Parameteränderung, z.B. die Änderung der Einsatztemperatur des Produktes bedeutet eine Änderung des Dokumentes für dieses Produkt, der Fertigungsstruktur für das Produkt und möglicherweise der verantwortlichen Personen innerhalb dieses Prozesses /9/. Es braucht also nur innerhalb dieser etwas begrenzteren Kommunikationskette der Personenkreis informiert oder um eine Genehmigung angesucht zu werden, der auf den betreffenden Parameter durch einen Prozessschritt einen Einfluss hat.

In einem solchen Konzept des *product-data-controlled-workflow* entsteht ein flexibles Geflecht von Kommunikationen, das auf Parametern in der Anwendung basiert. **Bild 14** zeigt dieses Konzept, bei dem die Dokumente und die Produktstruktur, die verbunden ist mit einer Prozessstruktur – im wesentlichen die Frage des Durchführungs- und Genehmigungsmanagements – und diese Strukturen sind wiederum verbunden mit den verantwortlichen Personen oder Abteilungen. Neu in dieser Struktur ist, dass eine Reihe von Parametern, die im Wesentlichen aus den Anforderungen und damit aus der Lifecycle-Betrachtung kommen, als Indikator für Änderungen im Produkt, in den Verfahren und in den Dokumenten wirken. Das Bild zeigt einerseits die Verbindung zwischen den Parametern und den einzelnen Mitgliedern der Produktstruktur einschließlich der Dokumente, andererseits wird gekennzeichnet, welche Abteilung oder welche Person verantwortlich für die Behandlung des Parameters in der vorproduktionsentwicklung verantwortlich sind.

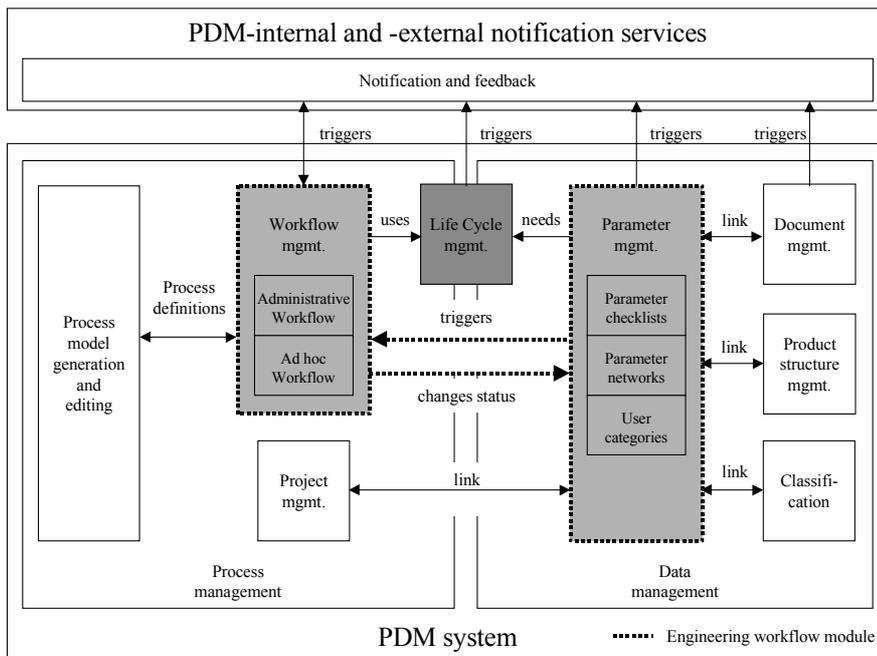
Ergebnis dieser Änderungen kann auch eine Veränderung der Prozesse in der Akzeptanz und Fertigungsänderung der gesamten Struktur sein. Aber auch ein neuer Zulieferer, Kunde oder eine andere „Person“ in diesem Beziehungsgeflecht kann flexibel aufgenommen werden – oder es können „Personen“ entfernt werden.

Das Parameterkonzept ist nicht unumstritten, vor allen Dingen deswegen, weil die Vielzahl der Parameter zu nahezu unübersichtlichen Strukturen führt. Maßgebend ist jedoch, dass nur die Parameter betrachtet werden, die jeweils für die abteilungs-, standort- oder unternehmensübergreifende Operation relevant sind, und das sind entschieden weniger. Über das Parameter-Netzwerk ist es ferner möglich, den Kreis der in einen Änderungs- oder Fortschrittsvorgang einzubeziehenden Personen sukzessive zu identifizieren und damit das Ausmaß an Benachrichtigungsvorgängen auf ein notwendiges Maß zu beschränken.

Dieser vorgestellte Ansatz eines parameterbasierten engineering workflow wurde prototypisch in der Produktdaten- bzw. Product Lifecycle Management Software axialant der Firma Eigner umgesetzt, **Bild 15** stellt die funktionale Architektur dieses Systems dar.

### Zusammenfassung

Mit der Weiterentwicklung der Produktentwicklungsstrategie unter Einbeziehung wissensbasierter Systeme hat sich eine Vorgehensweise in der Entwicklung durchgesetzt, die sowohl in der Aufgabenstellung für das neue Produkt als auch in der Untersuchung spezieller Teilaspekte die Lebensdauer eines Produktes intensiv untersuchen und hieraus konstruktive Schlussfolgerungen ziehen muss. An Beispielen wurde erläutert, dass im Bereich der Konzeptentwicklung eine Aufgabenklärung durch ein rein schematisiertes System (Programmentwicklung) nicht zum Ziel führt, da die Erfahrung des Entwicklungsingenieurs und die Fassung betriebsrelevanter Zustände zur Auslegung des Produktes eine immer noch weitaus größere Rolle spielen als dies üblicherweise angenommen wird. Empfohlen für die Klärung der Aufgabenstellung anhand des Lifecycles wird als Hauptquelle der Entscheidung



**Bild 15:** Architektur der Parameter-Management Software /7/

eine gemeinsame Sitzung der am Entwicklungsprozess beteiligten Personen, bei der mit Hilfe der strukturierten Brainstorming-Technik die Anforderungen und Randbedingungen einer solchen Entwicklungsaufgabe herausgearbeitet werden (concurrent engineering).

Aber auch im Bereich der Detailkonstruktion hilft eine Lebensdauersimulation kritischer Teile oder der Konstellation von Teilen erheblich zu einer vom Konstrukteur propagierten Funktionssicherheit des Produktes. Hier ist noch ein großes Anwendungsfeld für eine zielgerichtete Anwendung von wissensbasierten System zu sehen, mit deren Hilfe Simulationen zum Betriebsverhalten über den gesamten Lifecycle möglich sind und die einen wesentlichen Beitrag zur Vermehrung des Unternehmenswissen leisten können.

Die Flut der Informationen macht neue Kommunikationsformen der beteiligten Partner in einem Entwicklungsprozess notwendig, da die bisherigen Dokumente in Umfang und Flexibilität nicht mehr ausreichen. Am Beispiel einer internationalen Gemeinschaftsentwicklung im Rahmen des SIMNET-Projektes wurde ein Vorschlag ausgearbeitet, der auf der Basis des engineering workflows die operationalen Vorgänge während der Entwicklung beschleunigt und dokumentiert.

## Literatur

/1/ Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung, ISBN 3-540-00319-3, 5. Aufl., Springer Verlag Berlin et al., 2003

/2/ KARE Konsortium: KARE Projekt, EU ESPRIT 28916, Projekt Website, <http://www.imw.tu-clausthal.de/kare>

/3/ Kruse, Peter J.: Anforderungen in der Systementwicklung. Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Anforderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten. Diss. TU Clausthal 1995. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 20, Nr. 191

/4/ Heimannsfeld, Klaus: Modellbasierte Anforderungen in der Produkt- und Systementwicklung: Von Dokumenten zu Modellen, Diss. TU Clausthal, Berichte aus dem Maschinenbau, Shaker-Verlag, Aachen 2001

/5/ Wyrwoll, A.: CID – Customer Integration Deployment. Diss. TU Clausthal 2001

/6/ Dietz, P.: Calculation of Involute Splines under Elastic Material Behaviour. 5th International Design Conference DESIGN 98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien

/7/ SIMNET Konsortium: SIMNET Projekt, EU ESPRIT 26780, Projekt Website, <http://www.imw.tu-clausthal.de/inhalte/forschung/projekte/SIMNET/Welcome.html>

/8/ Schmitt, Reinhard: Unternehmensübergreifender Engineering Workflow - Verteilte Produktentwicklung auf der Grundlage eines parameterbasierten Daten- und Prozeßmanagements, Diss. TU Clausthal, Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld 2001

/9/ Mündemann, S.O.: Ein Konzept für die Prozessgestaltung des Änderungsmanagements von PKW-Plattformen unter dem Einsatz von Telekooperationstechniken. Diss. TU Clausthal 2000

## Zahnwellenverbindungen mit Novikovprofil

Dietz, P.; Wächter, M.

*Ein Forschungsschwerpunkt des Institutes für Maschinenwesen ist die Untersuchung von Welle-Nabe-Verbindungen angesiedelt. Formschlüssige Verbindungen mit einer Kreisbogen-Verzahnung lassen aufgrund ihrer konvex - konkaven Flanken-geometrie gegenüber den Evolventen- und Keilverzahnungen eine erhöhte Zahnfuß- und Flankentragfähigkeit erwarten. Durch Ausnutzung des Kontakts in den weiter außen liegenden Flankenteilen wird ein verbessertes Zentrierverhalten gegenüber der praktisch nur flanken-zentriert eingesetzten Evolventen - Verzahnung erreicht. Die grundsätzlich kompaktere Form des Zahnes mit Kreisbogenprofil sollte eine fertigungsgerechtere Herstellung mittels Kaltumformen erlauben.*

*Positive fit connections with circular arc type teeth are expected to have a larger tooth foot and tooth face load carrying capacity than evolvent and spline type tooth connections due to their convex - concave tooth geometry. By making use of the contact in the radially outer part of the flanks, a better centring behaviour than with the practically only flank centred use of evolvent tooth shapes is assumed. The basically more compact shape of teeth with circular arc shape should enable easier manufacturing by cold forming.*

### 1 Welle-Nabe-Verbindungen

Welle-Nabe-Verbindungen dienen zum Übertragen von Drehmomenten und Drehbewegungen von einer Welle auf eine Nabe oder umgekehrt. Darüber hinaus können sie aber auch Quer- und Axialkräfte sowie Biegemomente übertragen. Je nach Art der Kraftübertragung werden Reibschluss-, Formschluss-, vorgespannte Formschluss- und Stoffschluss-Verbindungen unterschieden.

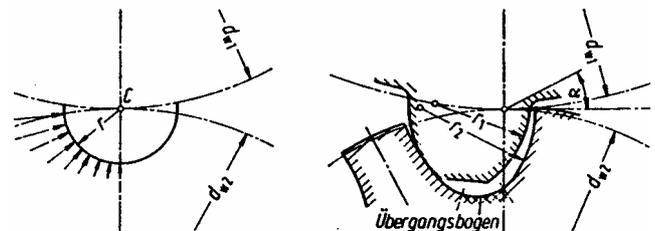
Zahnwellenverbindungen gehören zu der Gruppe der Formschlussverbindungen. Aufgrund einer feinen Verzahnung (viele Zähne) und der geringen Schwächung von Welle und Nabe können Zahnwellenverbindungen große und stoßartige Drehmomente übertragen. Die geringere Schwächung von Welle und Nabe bei Zahnwellenverbindungen im Gegensatz zu Keilwellenverbindungen ermöglicht

die Verwendung kleinerer Durchmesser und schmalere Naben. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass durch den Flankenwinkel eine Radialkomponente der Normalkraft entsteht, die dazu führen kann, dass sich schwache Naben aufweiten.

Ausgeführt werden Zahnwellenverbindungen zum einen als leicht lösbare und somit axial verschiebbare Verbindungen und zum anderen als feste Verbindungen (vorgespannte Formschlussverbindungen), die vor allem bei Wechselbeanspruchungen verwendet werden. Gewöhnlich werden Zahnwellen mit Kerbzahnprofil (nach DIN 5481) oder Evolventenzahnprofil (nach DIN 5480) hergestellt.

### 2 Zentrier-, Verschleißverhalten und Tragfähigkeit des Novikov Grundprofils

Verzahnungen mit Novikov Grundprofil, deren Zahnflanken im Normal- bzw. Stirnschnitt Kreisbogenform aufweisen, sind in den USA von Wildhaber (Kreisbogenform im Normalschnitt) und in der ehemaligen UdSSR von Novikov (Kreisbogen im Stirnschnitt) entwickelt und untersucht worden **Bild 1**.



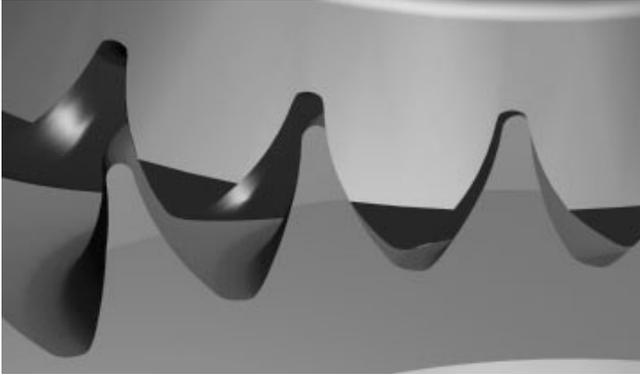
**Wildhaber-Novikov-Verzahnung**  
links: theoretisches Grundprofil  
rechts: asymmetrisches Profil aus zwei Kreisbögen  $r_2 > r_1$

#### Bild 1: Wildhaber-Novikov-Verzahnung /1/

Diese Zahnform wird bisher nur in Stirnverzahnungen (Laufverzahnungen) eingesetzt. Die im Eingriff befindlichen Flanken dieser Zahnform berühren sich nur in einem Punkt (Eingriffspunkt), der beim Lauf auf einer Geraden (Eingriffslinie) längs der Zahnbreite wandert.

Der Eingriffswinkel ist in jeder Zahnstellung konstant, so dass die Zahnkraft ihre Richtung nicht ändert. Daraus resultiert eine Null-Profilüberdeckung dieses Zahnprofils ( $\epsilon_\alpha = 0$  !!!).

Die Zähne der Wildhaber-Novikov-Verzahnung sind dabei nur etwa halb so hoch wie Evolventenzähne mit gleichem Modul. Bei Verzahnungen mit Novikov Grundprofil ist jeweils der konvexe Teil eines Zahnes mit dem konkaven Teil des Zahnes vom Gegenrad im Eingriff (**Bild 2**), so dass sich günstige Pressungsverhältnisse ergeben.



**Bild 2:** Wildhaber-Novikov-Verzahnung /2/

Die Abnutzung ist erfahrungsgemäß gering. Die Masse beträgt etwa die Hälfte eines entsprechenden Getriebes mit Evolventen-Verzahnung gleicher Leistung. Nachteilig ist die Empfindlichkeit der Wildhaber-Novikov-Verzahnung gegenüber Achsabstandsveränderungen und daraus resultierenden erhöhten Verschleiß. Außerdem sind zur Herstellung der Verzahnung für Rad und Gegenrad verschiedene Verzahnwerkzeuge erforderlich.

Aus theoretischen Erörterungen ergibt sich, dass die Tragfähigkeit dieser Getriebe in Bezug auf Flankenpressung besonders hoch ist. Der bei Stirnverzahnungen auftretende fehlende Überdeckungsgrad ist bei Zahnwellen-Verbindungen ohne Belang, weil bei Zahnwellen-Verbindungen alle Zähne gleichzeitig in Eingriff sind. Ebenso entfällt der bei Stirnverzahnungen erhöhte Verschleiß während des Abwälzvorganges durch die geringere Relativbewegung der Flanken zueinander. Die unterschiedlichen Werkzeuge für Außen- und Innenverzahnung sind prinzipbedingt bei der Herstellung von Welle-Nabe-Verbindungen grundsätzlich notwendig.

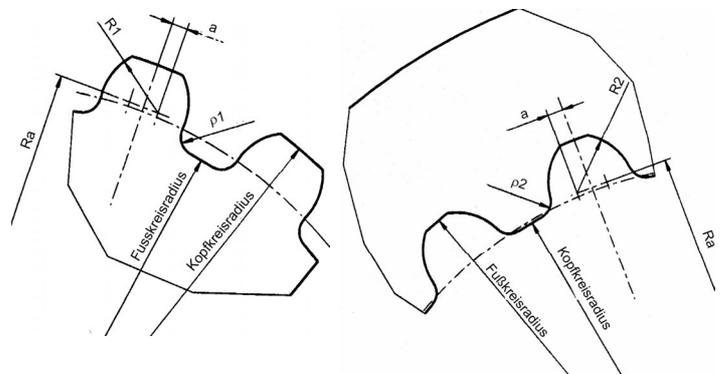
Ausgangspunkt für die Untersuchungen zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Wellen-Naben-Verbindungen mit Kreisbogen waren folgende Hypothesen:

- Kreisbogen-Verzahnungen lassen aufgrund ihrer konvex-konkaven Flankengeometrie gegenüber den Evolventen-Verzahnungen eine erhöhte Zahnfuß- und Flankentragfähigkeit erwarten. Hierdurch ist eine Leis-

tungssteigerung bei gleichen Hauptabmessungen der Verbindung möglich.

- Durch Ausnutzung des Kontakts in den weiter außen liegenden Flankenteilen wird ein verbessertes Zentrierverhalten gegenüber der praktisch nur flankenzentriert eingesetzten Evolventen-Verzahnung angenommen. Damit können aufwendige Fremdzentrierungen oder die fragwürdigen Doppelzentrierungen an Flanken- und Durchmesserbereich entfallen.
- Die grundsätzlich kompaktere Form des Zahnes mit Kreisbogenprofil sollte eine fertigungsgerechtere Herstellung mittels Kaltumformen erlauben. Die bekannten Anrisse im Fußbereich und die Wülste an den Zahnköpfen entfallen, die Eigenspannungen durch Umformen tragen zur Festigkeitssteigerung bei und der Fertigungsprozess wird preisgünstiger.

Die Zielsetzung ist die Entwicklung eines neuen Verzahnungsprofils mit Kreisbogenverzahnung für Zahnwellenverbindungen, abgeleitet aus dem Novikov-Grundprofil für Laufverzahnungen und seine Optimierung bezüglich der oben beschriebenen Betriebseigenschaften.



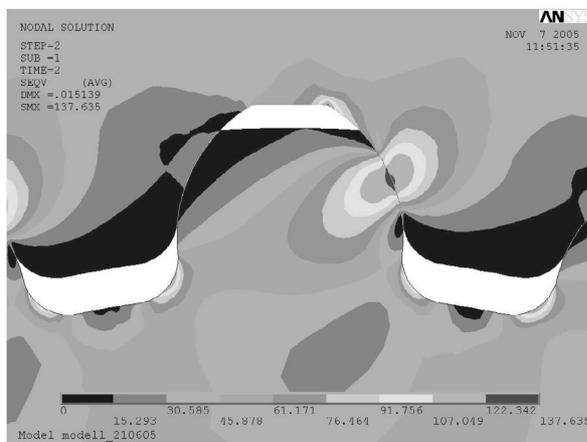
**Bild 3:** Novikov-Grundprofil, Bezeichnungen und Abmessungen /3/

Als Parameter für die Simulationsuntersuchungen wird die Geometrie des Zahnprofils, beschrieben durch die Radien  $R_1$  und  $R_2$  (**Bild 3**) der Flankenkrümmung und die Fußausrundungen  $\rho_1$  und  $\rho_2$ , den Modul  $m$  der Verzahnung, die Zähnezahl  $z$  und den Nabenaußendurchmesser variiert.

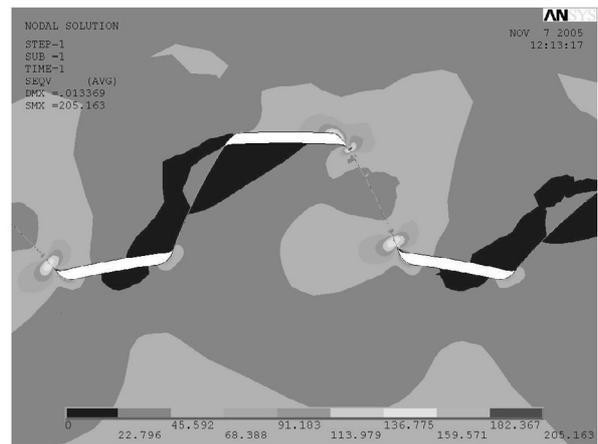
Mit Hilfe der FE-Methode wurde zunächst nach einer optimalen Flankengeometrie unter Beanspruchungskriterien gesucht (Referenzverzahnung mit Modul 3 mm und 18 Zähnen). Diese FE-Rechnungen erfolgten für ebene Modelle unter reinem Drehmoment, dabei wurde der Wellengrundkörper eingespannt und das Drehmoment in Form

einer Umfangskraft auf den Nabenaußendurchmesser aufgebracht. Variiert wurde zunächst der Abstand Wellenmittelpunkt zu Krümmungsradienmittelpunkt Flanke ( $R_a$ ), beim Beanspruchungsminimum liegt gleichzeitig die größte Kontaktlänge über der Zahnhöhe vor. Eine Veränderung dieses Abstandes bewirkt, dass der Zahnflankenwinkel bei einem großen Abstand steiler ist als bei einem kleineren Abstand. Infolge dieser Abstandsvariation ändern sich dementsprechend auch die Abstände der Mittelpunkte der Flankenradien der Nabe. Bezieht man diesen Abstand auf den Teilkreisradius, liegt das Optimum für eine "positive Profilverschiebung" von ungefähr 1 % bzw. einem Profilverschiebungsfaktor von  $x = 0,0833$  vor. Für diese Geometrievariante wird ein Optimum für den Flankenkrümmungsradius der Welle gesucht, dabei wird das Verhältnis des Krümmungsradius Welle zu Nabe konstant gehalten. Es zeichnet sich ein Optimum für ein Verhältnis Modul zu Wellenkrümmungsradius von 1,257 ab. Im Weiteren ist zu untersuchen, ob sich anhand von Ähnlichkeitsgesetzen diese Ergebnisse auch auf Zahnwellenverbindungen mit anderen Moduln und Zähnezahlen übertragen lassen.

Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass sich mit Hilfe einer optimierten Zahnform nach dem Novikov-Grundprofil bei ideal elastischem Werkstoffverhalten eine rechnerische Spannungsreduzierung im Zahnfuß auf 77 % (**Bild 4; Bild 5**) bei der Flankenpressung auf 53 % bei reiner Drehmomentbelastung und auf 84 % bei einer reinen Querkraftbelastung gegenüber einer Zahnwellengeometrie mit Evolventenflanken nach DIN 5480 bei gleichen Grundabmessungen erzielen lässt.



**Bild 4:** Vergleichsspannung Novikovverzahnung, rein elastisch, 800Nm



**Bild 5:** Vergleichsspannung Evolventenverzahnung, rein elastisch, 800Nm

Bei idealelastisch-plastischem Werkstoffverhalten und Steigerung des Drehmomentes zeichnet sich die Novikovverzahnung gegenüber der Evolventenverzahnung insgesamt als beanspruchungsgünstigere Verbindung aus.

Bei der Novikovverzahnung stellt sich im Nabenfuß ein Spannungsmaximum ein, Ursache ist in dem noch nicht optimierten Zahnfußausrundungsradius zu sehen. Bei der Evolventenverzahnung stellt sich eine steigende Spannung im Wellen- und Nabenfußbereich der Zugseite ein, die durch die genormte Zahngeometrie Probleme bereitet. Die Zugseite des Wellenzahnfußes weist bei der Evolventenform die maximale Fußspannung aus, wohingegen bei der Novikovform die Druckseite des Wellenzahnfußes höher belastet wird und somit weniger kritisch ist. Der Flächenpressungsverlauf weist Maxima am Zahnkopf (Kopfräger) und Zahnfuß (Fußträger) bei der Evolventenflanke auf, die Novikovflanke hingegen zeigt einen parabelförmigen Verlauf.

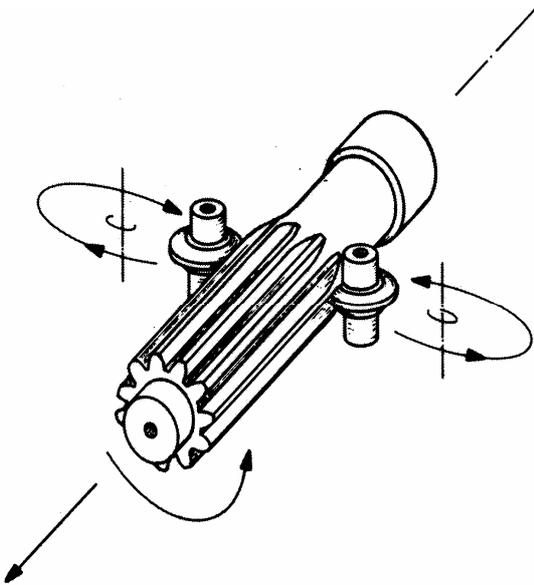
Bei steigender Drehmomentbelastung breitet sich die Zahnflankenbeanspruchung nur nach unten in Richtung Wellenzahnfuß aus, ein gewisser Teil des Wellenzahns bleibt immer unbeanspruchung und kann somit zur Flankenzentrierung dienen.

### 3 Herstellung durch Kaltumformen

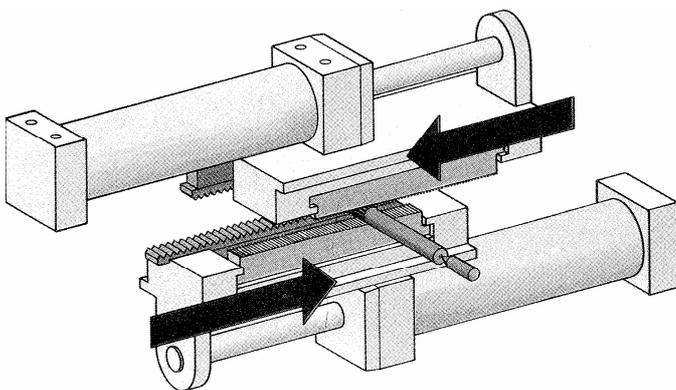
Für den weitaus stückzahlmäßig größten Anwendungsbereich werden Zahnwellen heute kalt umgeformt, wobei die Kurzverzahnung nach DIN 5480 dem Umformprozess eher entgegenkommt als die übliche Laufverzahnung. Dies wird für die vorgesehene Verzahnung mit Kreisbogenprofil in noch stärkerem Masse zutreffen. Die durch den Umformvorgang induzierten Eigenspannungen erhöhen die

Lebensdauer der Zahnwellen-Verbindung speziell bei dynamischer Belastung /4, 5/.

Das Kaltwalzen im Grob-Verfahren nach **Bild 6** ist ein eingeführtes Umformverfahren, wobei die Form durch planetenartige Rollwerkzeuge nach dem Formverfahren erzeugt werden. Die Rollwerkzeuge werden formgeschliffen, das Verfahren nutzt den Abwälzvorgang nicht und damit auch nicht die einfache Form des geradflankigen Verzahnungswerkzeugs.



**Bild 6:** Kaltwalzen von Zahnwellen aus vollem Material nach GROB /6/



**Bild 7:** Kaltumformen mit Zahnstangen nach dem EX-CELL-O-Verfahren /7/

Das Kaltwalzen nach dem EX-CELL-O Verfahren gemäß **Bild 7** ist besonders für kurze Taktzeiten geeignet, wobei zwei gegenläufige Walzstangen das Zahnprofil nach dem Abwälzverfahren eindrücken und kalibrieren.

Ausgehend vom Feinwalzen spanend vorgearbeiteter geometrischer Konturen als Nachdruckprozess kann das Profil im Abwälzverfahren von umlaufen-

den Profilwalzrädern hergestellt werden. Die Profilräder müssen selbst im Abwälzverfahren hergestellt werden.

Daneben können Zahnprofile durch Taumelpressen, Ziehen und Rundkneten (bei Naben) hergestellt werden.

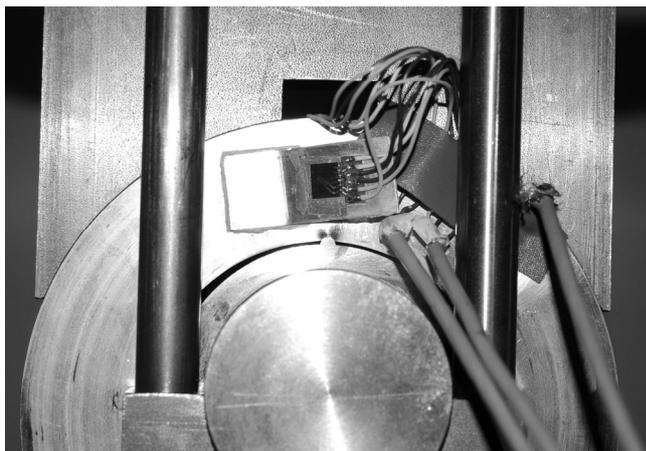
Die umformenden Verfahren zeigen Fertigungsabweichungen auf, die stark von der gewählten Form des Zahnprofils abhängen. Beispielsweise zeigt sich bei der Herstellung von Rundgewinden und Ölnuten mit dem dazugehörigen Kaltumformungsverfahren, dass Werkstücke ohne scharfe Ecken fertigungsgerechter sind. Aus diesem Grund wären auch Zahnwellen mit Kreisbogen-Grundprofil grundsätzlich für das Kaltumformen besser geeignet. Durch die Verwendung gleicher Werkzeuge bei der Kaltumformung und des damit verbundenen Auftretens von Fertigungsabweichungen wird die mögliche Gefahr der Doppelpassung verhindert.

Erste Untersuchungen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist durch Kaltumformung ein Novikov - Zahnprofil als Wellenprofil zu erzeugen, allerdings wird der Werkzeugwerkstoff sehr stark bis in den plastischen Bereich hinein belastet, so dass Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit der Zahngeometrie zu erwarten sind und entsprechende Korrekturen beim Werkzeug Berücksichtigung finden müssen. Die FE - Rechnung zeigt ebenfalls, dass sich vor allem im Zahnfußbereich der Welle recht hohe Eigenspannungen gebildet haben, die praktisch zu einer Verfestigung an bestimmten Stellen führen und sich insgesamt positiv auf die Belastbarkeit der Verbindung auswirken können. Die Spannungsverteilung deutet darauf hin, dass der Werkstoff bei der Welle und dem Werkzeug besonders in Umfangsrichtung fließt. Das heißt, dass die hohen örtlichen plastischen Dehnungen, welche zu den Eigenspannungen führen, vor allem in Umfangsrichtung auftreten. Die Ergebnisse zu den bleibenden Eigenspannungen der Welle lassen erkennen, dass der Wellenwerkstoff beim Umformen nach außen gedrückt wird, wobei die örtlichen plastischen Dehnungen besonders im Bereich des Zahnfußes der Welle auftreten.

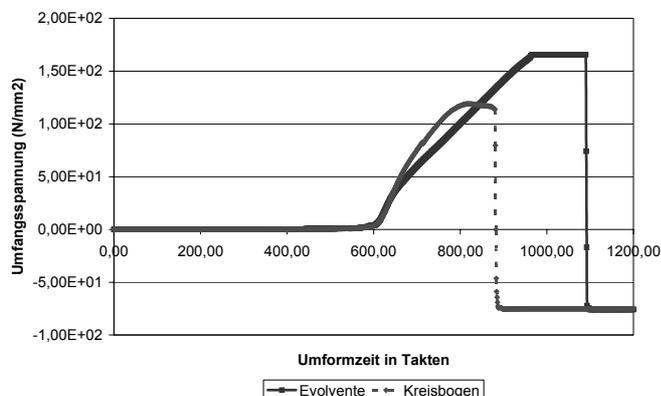
Bedeutenden Einfluss auf die Realisierbarkeit von großen Zahnmodulen bei der umformtechnischen Fertigung hat neben der Druckfestigkeit (Rissbildung) die maximal aufzubringende Eindringkraft (Kraft in Radialrichtung). Die auf die Stempellänge bezogene maximale Eindringkraft wird mit geringer werdender Zähnezahl bzw. steigendem Modul bei konstantem Wellendurchmesser deutlich größer.

Die Ursache liegt in der mit steigendem Modul einhergehenden Erhöhung der Eindringtiefe, da mit dem Modul sich die Zahnhöhe verändert und somit der Umformgrad ansteigt.

Die FE - Simulationen zur Herstellung einer kaltumgeformten Nabe mit dem Novikovprofil wurden für Stahl- und Aluminiumnaben durchgeführt, wobei jeweils ein Stahlwerkzeug als Stempel diente. Die Auswertung der Rechnung gibt Informationen zu den Radial- und Umfangsspannungen im Umformprozess und die nach dem Umformen sich einstellenden Eigenspannungen und bietet somit die Basis zur Beurteilung der Fertigungsmöglichkeiten. In einem einfachen Pressenversuch wurden die Ergebnisse der FE - Simulation verifiziert, dazu wurde eine Welle mit einem Zahn als Umformstempel in die Nabe gedrückt und dabei die Umfangsdehnung (Spannung) auf dem Nabenaußendurchmesser gemessen. Der Versuchsaufbau für einen Umformstempel mit Kreisbogenprofil ist in **Bild 8** dargestellt.



**Bild 8:** Umformprozess einer Nabe mit Novikovstempel



**Bild 9:** Umfangsspannung am Nabenaußendurchmesser während des Umformvorganges

Der zeitliche Verlauf der Umfangsspannung am Nabenaußendurchmesser während des Pressvorganges ist in **Bild 9** für einen Zahn mit Evolventenprofil und mit Kreisbogenprofil bei gleichem Modul dargestellt.

Während des Eindringens des Werkzeugstempel bildet sich auf dem Nabenaußendurchmesser in Umfangsrichtung eine Dehnung und somit eine Zugspannung aus, nach dem Herausfahren des Werkzeugstempels hat sich am Innendurchmesser eine Zahnücke in der Nabe mit dem entsprechenden Profil ausgebildet und am Nabenaußendurchmesser bildet sich eine Stauchung und somit eine Druckspannung in Umfangsrichtung aus. Der Umformprozess beim Evolventenzahn geht aufgrund der größeren Zahnhöhe bei gleichem Modul über einen längeren Zeitraum und verursacht eine höhere Umfangsspannung am Nabenaußendurchmesser. Der Anstieg der Umfangsspannung bei der Evolvente spiegelt die steilere Flankenform wieder. Die Nabe mit dem Kreisbogenprofil weist nach dem Umformen keine sichtbaren Anrisse auf, die Nabe mit dem Evolventenprofil dagegen Anrisse im Bereich des Nabenzahnfußes, d.h. dem Bereich des größten Umformgrades.

Die Eigenspannungen nach dem Umformprozess ergeben beim Versuch höhere Werte als bei der FE-Simulation, die Umfangsspannung während des Umformvorganges hingegen ist bei der Simulation höher als bei der Messung und weist jeweils für die Evolvente die höheren Werte auf. Es muss angemerkt werden, dass bei den FE-Untersuchungen vorerst keine Reibungseinflüsse berücksichtigt werden, wobei im Versuch durchaus ein Reibungseinfluss Stahlwelle zu Aluminiumnabe vorherrscht.

Die FE-Untersuchungen unter den gleichen Randbedingungen liefern für die Kombination Stahlwelle/Stahlnabe eine ähnliche Tendenz, die Druckeigenspannung am Nabenaußendurchmesser nach dem Umformen beträgt aber nur 50% der Eigenspannung bei der Nabe aus Aluminium. Dies führt zu der Annahme, dass es bei der Stahlnabe zu geringeren bleibenden Verformungen am Außenumfang während des Umformprozesses kommt.

#### 4 Ausblick

Im ersten Schritt der Untersuchungen wurde eine Optimierung der Zahngeometrie für Zahnwellenverbindungen mit dem Novikov-Grundprofil durchgeführt. Ziel dieser - vorwiegend auf der Anwendung von Finite-Elemente-Methoden beruhenden - Un-

tersuchung war eine Funktionsoptimierung mit den Kriterien Zentrierfähigkeit, Flächenpressungsoptimierung auf den Zahnflanken und Optimierung der Zahnfußspannung im Verbindungsbereich.

Die durchgeführten FE-Rechnungen zur Simulation des Umformprozesses konnten zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, durch Kaltumformung Zahnwellen und Zahnnaben mit dem Novikovprofil zu erzeugen. Die durchgeführten praktischen Versuche zeigten, dass eine Aluminiumnabe im Bereich der Zahnücke den hohen Belastungen oberhalb der Zugfestigkeit während des Umformprozesses für das Novikovprofil standhielt und keine Anrisse festzustellen waren, wohingegen beim Evolventenprofil sich Anrisse im Nabenfußbereich ausbildeten. Untersuchungen für die Welle zeigten eine deutliche Verbesserung des Fertigungsprozesses bei Aufteilung der Gesamtverformung in eine Vorverformung und eine Endverformung, dabei reicht eine recht geringe Vorumformung aus.

## 5 Literatur

- /1/ Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, 18. Auflage, 1995
- /2/ <http://www.zakgear.com/wn.html>
- /3/ Schmidt, M.: FE - Berechnungen zur Optimierung des Novikov - Zahnprofils bei Welle/Nabeverbindungen, Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW, Juni 2005
- /4/ Bartsch, G.: Verzahnungsherstellung durch Kaltwalzen aus dem Vollen. Bericht zur 25. Arbeitstagung „Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen“ Mai 1984, Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
- /5/ König, W.; Weck, M.; Bartsch, G.: Herstellung und Tragfähigkeit kaltgewalzter Geradstirnräder aus Vergütungsstahl. VDI-Z 127 (1985) Nr.13, S. 481-485
- /6/ GROB AG-Kaltwalzmaschinen: Leitfaden für das Verständnis und die Anwendung des GROB - Kaltwalzverfahrens zum Verzahnen von wellenartigen Werkstücken, 1998
- /7/ <http://www.ex-cell-o.de/EX-CELL-O/produkte.htm>

## Arbeiten am IMW rund um Welle-Nabe-Verbindungen

Schäfer, G.

*Das IMW betreibt umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Welle-Nabe-Verbindungen. Auch das zurückliegende Jahr war durch einige interessante Arbeitsergebnisse aus diesem Bereich gekennzeichnet. In einer kurzen Übersichtsdarstellung soll dies verdeutlicht werden.*

*The IMW is a well known research institute for shaft-hub-connections. There were also in the last year a lot of interesting results from that research topic which are shortly described in the following sentences.*

### 1 Vorwort

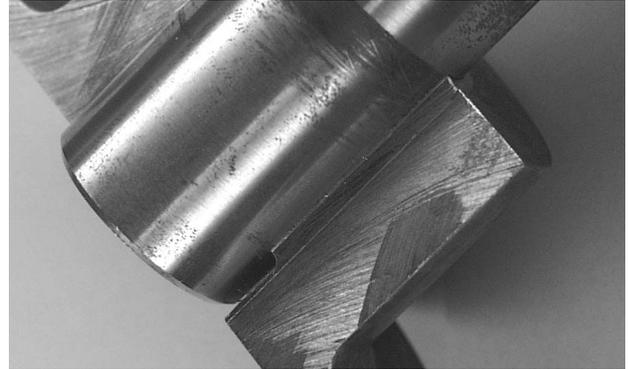
Ein wesentlicher Forschungsbereich im Institut für Maschinenwesen (IMW) der TU Clausthal sind die Welle-Nabe-Verbindungen und artverwandte Konstruktionselemente. Forschungsarbeiten zu diesem zentralen Themenbereich der mechanischen Antriebstechnik werden am IMW sowohl theoretisch mit numerischen Simulationsberechnungen als auch experimentell auf verschiedenen institutseigenen Prüfständen bearbeitet. Der folgende Artikel soll eine kurze Übersicht zu den im vergangenen Jahr durchgeführten Arbeiten geben.

### 2 Pressverbindungen

Charakteristisch für die am IMW untersuchten Pressverbindungen ist die teilplastische Beanspruchung in der Verbindung. Der große Anwendungsbereich ungestörter Pressverbindungen mit Vollwelle liegt nicht im Focus der Institutsarbeiten. Stattdessen werden nicht seltene Sonderfälle von solchen Verbindungen mit Störungen durch radiale oder axiale Bohrungen oder teilweise verzahnte Pressfugenbereiche untersucht. Bedingt durch diese lokalen Störungen treten Bauteilbereiche mit hohen Spannungskonzentrationen und daraus folgenden teilplastischen Verformungen auf. Der Einfluss solcher teilplastischen Bereiche auf die Tragfähigkeit der Verbindung unter dynamischen Betriebslasten wurde innerhalb eines Vorhabens für die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) untersucht, **Bild 1**.

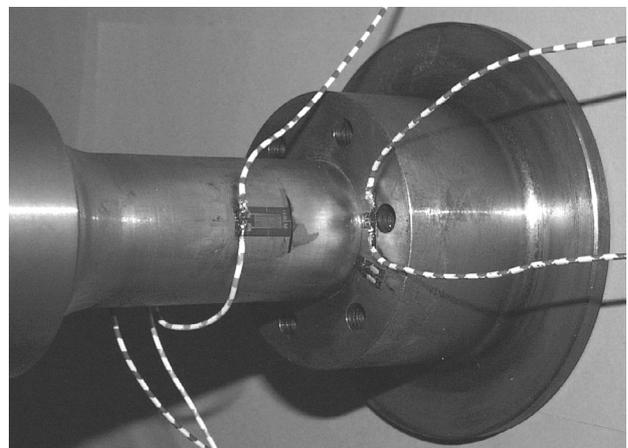
Die zweite Pressverbindungsart mit teilplastisch verformten Bauteilbereichen ist die Innenhoch-

druckgefügte (IHF)-Pressverbindung. Die Welle muss dabei als Rohrquerschnitt ausgebildet sein um das Aufweitwerkzeug aufnehmen zu können.



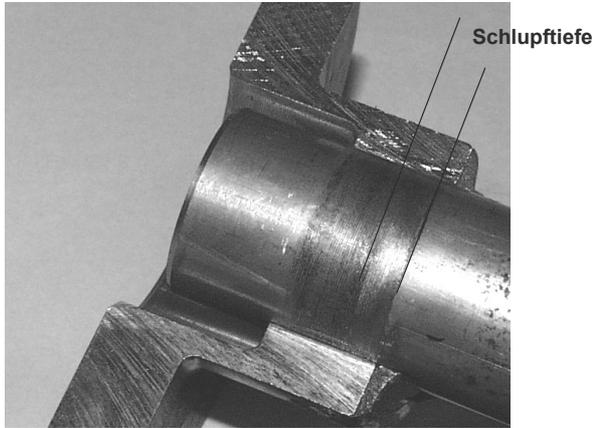
**Bild 1:** Pressverbindung mit Vollwelle mit Reibkorrosionsschädigung durch Umlaufbiegung

Die Welle wird nach der axialen Positionierung in der Nabe teilplastisch hydraulisch aufgeweitet um den Presssitz zu erzeugen. Für diese Pressverbindungsart wurde, nach den grundlegenden Untersuchungen von Garzke, jetzt auch die experimentelle Absicherung der Berechnungsansätze für Umlaufbiegung von Grünendick durchgeführt. Er konnte dabei die reibschlussstypischen Trainiereffekte nachweisen und interessante konstruktive Empfehlungen zur Wahl der Drucküberstandslänge bei unterschiedlichen Belastungsarten geben. Bei seinen Untersuchungen wurde die von Leidich und Smetana an der TU Chemnitz eingeführte Klaffbelastung bestimmt (**Bild2**), die ein wesentlicher Parameter für die kritische Reibkorrosionsschädigung ist.



**Bild 2:** Pressverbindungsprobe mit Messgittern zur Bestimmung des Klaffmomentes

Basierend auf dem so bestimmten Klaffmoment wurden die Dauerversuche gefahren und reibkorrosionsmindernde Ausführungsvarianten ermittelt, **Bild 3**. Erste Erfolg versprechende Versuche konnten auch bezüglich der Wahl der beiden Grundwerkstoffe für Welle und Nabe gemacht werden.



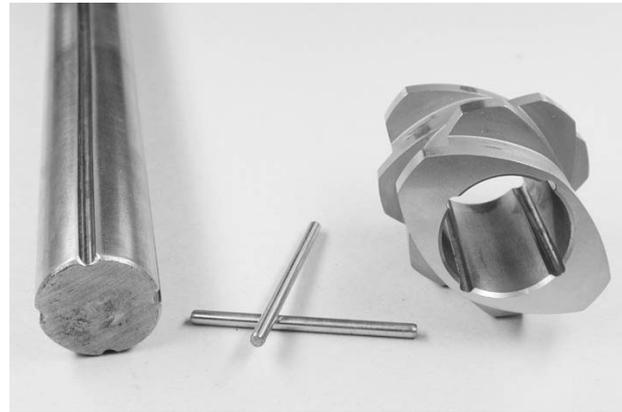
**Bild 3:** Reibkorrosion an einer IHF-PV, 130% des Klaffmomentes, 10 Mio. Lastwechsel

Besonders interessant sind im werkstofflichen Zusammenhang die Ergebnisse mit beschichteten Pressflächen, die zu stark ansteigenden Reibwerten teilweise durch Diffusionsvorgänge führen können. Die ersten Untersuchungen dazu wurden mit Kupfer- und Zink-Beschichtungen gefahren.

Vergleichbare Untersuchungen wurden auch für die reibschlüssigen Druckring-Befestigungen von Mupende durchgeführt. Da in diesem Fall aber die Nabe im Radialschnitt wie ein kurzer Biegebalken zu betrachten ist, dessen Einspannung lediglich durch die Pressfuge gegeben ist, treten bei Überlastung des Ringes „Zugbeanspruchungen“ in der Fügestelle auf. Bei dieser Belastungsart konnten keine positiven Effekte durch die Beschichtungen experimentell ermittelt werden.

### 3 Längsstift-Verbindungen

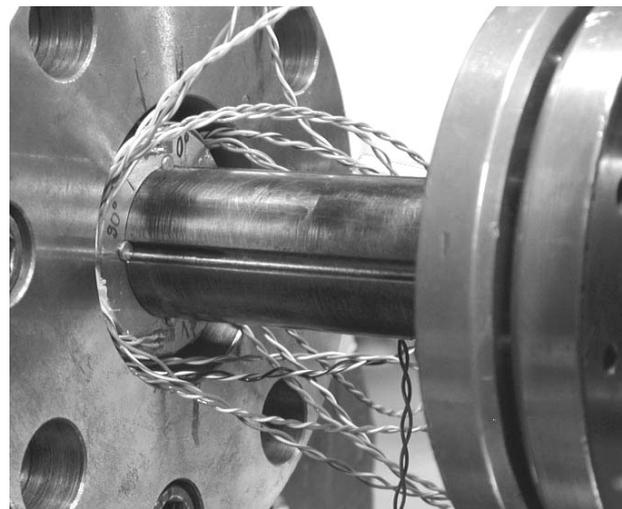
Vor dem Hintergrund deutlicher Entwicklungen in der Fertigungstechnik wurde vom IMW vor ca. fünf Jahren die Forschung an Längsstift-Verbindungen als kerbarme Evolutionsvariante der Passfeder aufgenommen, **Bild 4**. Historisch belegte Toleranzprobleme bestehen heute in dieser Form nicht mehr und die Verbindung weißt verschiedene günstige Eigenschaften auf, die von Birkholz erstmalig zusammengetragen und in einen Dimensionierungsvorschlag weiterentwickelt wurden.



**Bild 4:** Extrudersegment als Anwendungsfall für die kerbarme Längsstift-Verbindung

Birkholz macht in seinen Ergebnissen Angaben zur sinnvollen Wahl der Anzahl von Längsstiften und gibt in Diagrammform optimale Verhältnisse für die Durchmesser von Längsstift und Fügefläche sowie für die nabenseitigen Stiftüberstände an.

Aktuell laufen zu dieser formschlüssigen Verbindungsart die experimentellen Nachweisuntersuchungen mit getrennter dynamischer Torsions- und Biegebelastung, **Bild 5**. Aufgrund ihrer geringen Kerbwirkung hat auch diese Formschluss-Verbindung, wie die Polygon-Verbindung, das Potential als gemischt form- und reibschlüssige Verbindung mit Übermaß im Zentrierdurchmesser und/oder in der Längsstift-Bohrung ausgeführt zu werden, um die Relativbewegungen als Ursache von Schwingungs-Reibkorrosion zu reduzieren. Die Untersuchungen werden finanziell durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und stehen damit nach Projektabschluss öffentlich zur Verfügung.



**Bild 5:** Längsstift-Verbindung mit Messtechnik vorbereitet zur Umlaufbiegeprüfung

## 4 Zahnwellen-Verbindungen

Der Arbeitsschwerpunkt bei den Welle-Nabe-Verbindungen liegt am IMW auf den Zahnwellen-Verbindungen. Mir ihren vielen Formschlusselementen ist die Zahnwellen-Verbindung eine der leistungsfähigsten Welle-Nabe-Verbindungen. Ihre Übertragungsfähigkeit ist durch die formschlusstopische multiple Kerbwirkung einerseits und durch relativbewegungsinduzierten Verschleiß zwischen Wellen- und Naben-Zahnflanken andererseits limitiert. Diesen beiden Phänomenen sind zwei aktuelle Forschungsvorhaben mit Unterstützung durch die FVA gewidmet. Über diesen Artikel hinaus weiterreichende Informationen zu diesen Themenkomplexen stehen den Mitgliedsfirmen der FVA zur Verfügung

### 4.1 Kerbwirkung

Die Zahnwellen-Verbindung ist häufig ein Element/Bereich einer ganzen Welle. Aus diesem Verständnis heraus wird in Zusammenarbeit mit dem IMM TU Dresden, das federführend die Überarbeitung der Wellenberechnungsnorm DIN 743 erledigt,



**Bild 6:** Zahnwellenproben aus statischen Gestaltfestigkeitsversuchen

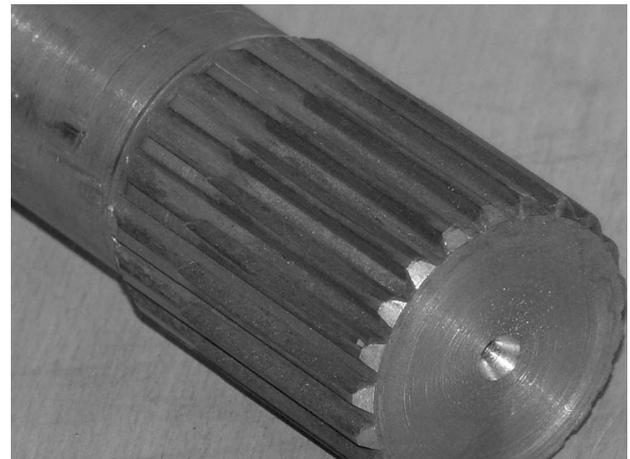
ein Projekt zur grundlegenden Untersuchung der Kerbwirkung von verschiedenen anwendungstypischen Verzahnungsausläufen und –gestaltungen unter statischen und dynamischen Torsions- oder Biegebelastungen numerisch und experimentell bearbeitet. **Bild 6** zeigt drei verschiedene torsions-

beanspruchte Geometrievarianten und lässt deren Einfluss auf die Kerbwirkung erkennen.

Neben der Gestaltung des Verzahnungsauslaufs werden auch die Verbindungsgröße, die Werkstoffe mit deren Wärmebehandlung und die Verzahnverfahren (spanend/spanlos) experimentell untersucht. Die begleitenden numerischen Simulationen überdecken einen noch größeren Parameterbereich in feinerer Abstufung.

### 4.2 Verschleiß

Hat man die Verbindung mit Kenntnis des entsprechenden Kerbfaktors auf statische und dynamische Festigkeit rechnerisch ausreichend ausgelegt, so kann dies in der Praxis leider doch noch zu einem verschleißbedingten Ausfall führen. Die Zahnwellen-Verbindung ist eine klassische axial bewegliche Welle-Nabe-Verbindung. Die verschiebenotwendige Tolerierung führt unter den sonstigen Betriebslasten zu verschleißfördernden Relativbewegungen. Sogar reine schwellende Torsionsbelastungen vermögen schon in Verbindung mit der Flankenzentrierung Relativbewegungen zu erzeugen, deren Folge Reibkorrosionsschäden sind, **Bild 7**.

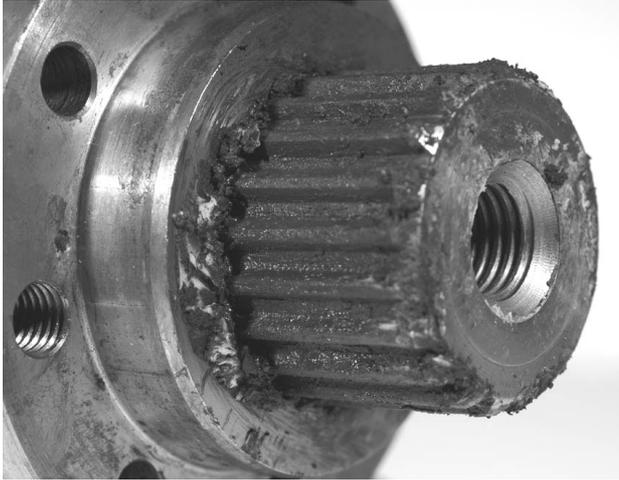


**Bild 7:** Reibkorrosionsschädigung an einer ungehärteten und ungeschmierten Verbindung bei schwellender Torsionslast

Abhängig von der Amplitudengröße der Relativbewegungen sind alle tribologischen Schädigungsmechanismen zu beobachten und damit relevante Ursachen für eine Lebensdauereinschränkung.

Als Abhilfemaßnahmen bieten sich hier verschiedene Schmiermittel und Flankenbeschichtungen an. Im Rahmen des zweiten aktuell bearbeiteten FVA-Projektes zu Zahnwellen-Verbindungen wurden mehr als 20 verschiedene Verschleißschutzsysteme experimentell untersucht, **Bild 8**. Im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen, in denen die Ölschmierungen deutlich besser als die Fette

abschnitten, sind heute Fettschmierstoffe verfügbar, die eine deutliche Verschleißreduzierung ermöglichen. Versuchsbegleitend wurden mögliche Berechnungsansätze zur Verschleiß-Lebensdauervorhersage weiter entwickelt. Kernparameter in der kombinierten experimentell und numerisch bearbeiteten Fragestellung ist die Verschleißintensität pro Umdrehung der Verbindung.



**Bild 8:** Fettgeschmierte Zahnwellen-Verbindung aus Umlaufbiegeversuch mit überlagerter stat. Torsion ( $R_f = 100 \text{ mm}$ )

## 5 Normungsarbeit

Aufbauend auf den Ergebnissen der verschiedenen Forschungsprojekte ist das IMW an der Erstellung und Überarbeitung der korrespondierenden Normenwerke beteiligt.

Innerhalb des ISO Arbeitskreises ISO/TC14 wurde die alte, aus der ANSI 92-2, abgeleitete, ISO 4156 gründlich überarbeitet. Diese Arbeiten fanden mit der Veröffentlichung nach allen internationalen Abstimmungsrunden in diesem Herbst ihren Abschluss. Der betreffende deutsche Arbeitsausschuss im DIN hat einer Annahme für Deutschland zugestimmt und damit steht die ISO 4156 „Straight cylindrical involute splines – metric module, side fit“ auch erstmalig verbindlich für Deutschland zur Verfügung. An der entsprechenden Übersetzung und Einführung als DIN/ISO 4156 wird momentan gearbeitet.

Die Mitarbeit im deutschen Arbeitsausschuss DIN AA 2.1 „Passverzahnungen“ war parallel dazu durch die grundlegende Überarbeitung der DIN 5480 „Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser“ geprägt. Die ehemals 16-teilige Norm wurde in vier Teilen neu aufgebaut, wobei der neue Teil 2 alle Geometrietabellen für die verschiedenen Moduln enthält.

Schwerpunkt der Zuarbeit in diesen Arbeitskreisen stellen die Berechnungsgrundlagen für den Festigkeitsnachweis von Zahnwellen-Verbindungen dar. Nachdem schon vor einigen Jahren der Teil 1 der Berechnungsnorm DIN 5466 „Tragfähigkeitsberechnungen von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen“ zum Weissdruck freigegeben worden ist, ist jetzt auch der zweite Teil DIN 5466-2 aus dem Stand des Gelbdrucks heraus zum Weissdruck freigegeben worden.

Neben den beiden Hauptnormen DIN 5480 und DIN 5466 wurden im DIN AA 2.1 auch die DIN 5464 „Passverzahnungen mit Keiflanken – Schwere Reihe“ durch Hinzufügung der Toleranzauswahlkriterien ergänzt und die DIN 5481 „Passverzahnungen mit Kerbflanken“ unter anwendungsspezifischen Gesichtspunkten überarbeitet. Die aktuellen Fragestellungen betreffen jetzt die existierende Norm DIN/ISO 14 „Keilwellen-Verbindungen mit geraden Flanken und Innenzentrierung“, hier besteht noch Diskussionsbedarf im Arbeitsausschuss. Wer sich von diesen Themen angesprochen fühlt kann sich an Herrn Hagemann beim VDMA in Frankfurt oder auch gerne an den Autor dieses Artikels wenden.

## 6 Zusammenfassung

Das IMW ist mit seinem wichtigen Arbeitsgebiet der Welle-Nabe-Verbindungen spezialisiert auf teilplastifizierte reibschlüssige Pressverbindungen und die formschlüssige Zahnwellen-Verbindung. Ergänzend wird die kerbarme Länsstift-Verbindung untersucht. Im auslaufenden Jahr konnten zu verschiedenen Fragestellungen aus diesem Bereich praxisrelevante Forschungsergebnisse erarbeitet werden und an die Projektpartner oder in die Normen weitergegeben werden. Teilweise konnten die erreichten Ergebnisse in diesem Artikel nicht mit der aus den Forschungsarbeiten vorliegenden Präzision in den Aussagen dargestellt werden, da abhängig vom Drittmittelgeber abgestufte Veröffentlichungspflichten gelten. Wir möchten uns bei dieser Gelegenheit bei unseren beiden großen Fördermittelgebern der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsförderung (AiF) mit Ihrer Mitgliedsvereinigung Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) für die solide Forschungsförderung bedanken.

## Beeinflussung der Belastung des Mantels durch die Tragfähigkeit des Seilpakets bei mehrlagig bewickelter Seiltrommel

Mupende, I.

*Die Belastung auf die Trommelstruktur bildet sich bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln nach einem komplexen nicht linearen Mechanismus aus. Bis heute vernachlässigt man den Einfluss der Seilpakettragfähigkeit in der Bestimmung dieser Belastung. Dieser Aufsatz stellt kurz die Entlastung des Mantels durch die Tragfähigkeit des Seilpakets dar.*

*A portion of the developed loads during the winding process by multi-layers winches is carried out by the layers. The current article presents shortly how this consideration can be taking into account by the design of winches.*

### 1 Einleitung und Problematik

Die Genauigkeit des Ansatzes bei der Bestimmung des hervorgerufenen Drucks auf den Mantel ist entscheidend für die Höhe der Belastung und somit für die Gestaltung der Trommel. Verschiedene Autoren haben sich in der Vergangenheit mit dieser Problematik beschäftigt und Berechnungsmodelle entwickelt. Die Ansätze von Torrance /1/, Egawa-Taneda /2/ und Dietz /3/ gelten bei vielen Anwendern als Standardwerkzeug.

Das Seilpaket besitzt bei mehrlagiger Bewicklung eine gewisse Tragfähigkeit, welche bei der Bestimmung der Belastung auf dem Mantel in den meisten Fällen nicht berücksichtigt wird. Die Nutzung des hierin bestehenden Potentials kann grundsätzlich dazu beitragen, die Trommel kompakter bzw. leichter zu gestalten.

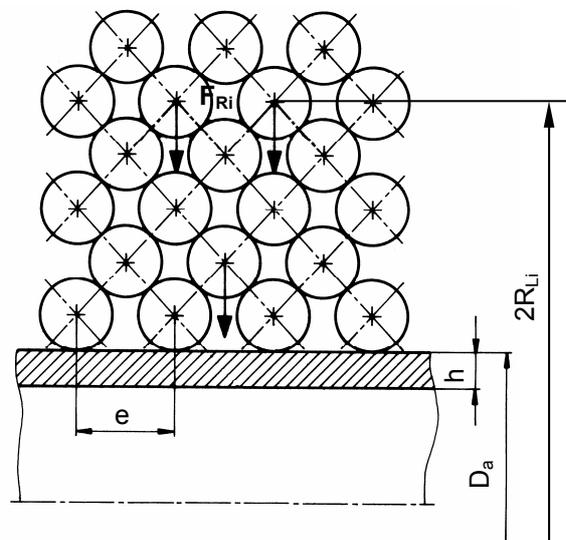
### 2 Grundlagen der Bestimmung der entstehenden Belastung auf den Mantel einer mehrlagig bewickelten Seiltrommel

Die Ermittlung des Drucks auf den Trommelmantel und die entsprechenden Beanspruchungen wurden erstmals auf wissenschaftlicher Basis von Ernst /4/ für eine einlagig bewickelte Trommel mit starrer Stirnwand und starrer Einspannung des Mantels an der Stirnwand behandelt. Dietz erweitert die Betrachtung für den Fall der mehrlagig bewickelten Trommel unter Berücksichtigung der Mantelverfor-

mung und des Zusammenquetschens der Seilquerschnitte. Er zeigt, dass unter der Annahme einer Seilvorspannung die Belastung auf den Trommelmantel außer von der Zugkraft auch von der Seilsteifigkeit (Längs- und Querelastizitätsmodul) abhängt. Torrance, Egawa-Taneda und andere Autoren geben weitere Ansätze für die Bestimmung der Mantelbelastung; Es ist ersichtlich, dass die Belastung auf den Mantel nicht linear mit der Lagenanzahl steigt. Dieser Sachverhalt kommt dadurch zustande, dass die Radialkraft  $F_{Ri}$  (Gl. 01) umgekehrt proportional vom Wickelradius  $R_{Li}$  ist.

$$F_{Ri} = \frac{F_{si}}{R_{Li}} \quad (\text{Gl. 01})$$

$F_{si}$  ist die Seilzugkraft und  $R_{Li}$  der Wickelradius. **Bild 1** zeigt das Seilpaket mit dem Wickelradius  $R_{Li}$ .



**Bild 1:** Querschnitt des Seilpaketes

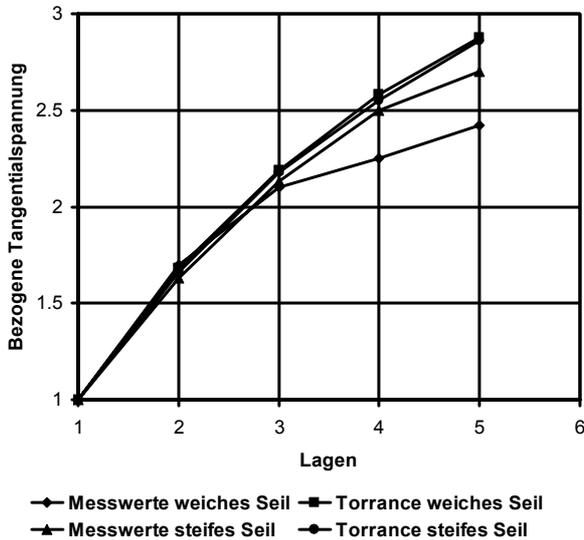
Ein weiterer entscheidender Effekt in der Lastentwicklung auf den Trommelmantel ist die Entlastung einer aufgewickelten Windung durch die Trommelverformung. Egawa-Taneda und Dietz berücksichtigen diesen Effekt in ihren Ansätzen.

Es ergeben sich folgende Fragestellungen: Wie verhält sich die Windung bzw. die komplette Lage, wenn die Vorspannung im Seil abnimmt und wird die Belastung der obersten Lage ohne Abzug wei-

tergeleitet oder nehmen die unteren Lagen einen gewissen Anteil der Belastung auf?

Die folgenden **Bilder (2 bis 4)** zeigen den Vergleich zwischen gemessenen Beanspruchungen im Mantel und gerechneten Beanspruchungen mit den Ansätzen von Torrance, Egawa-Taneda und Dietz.

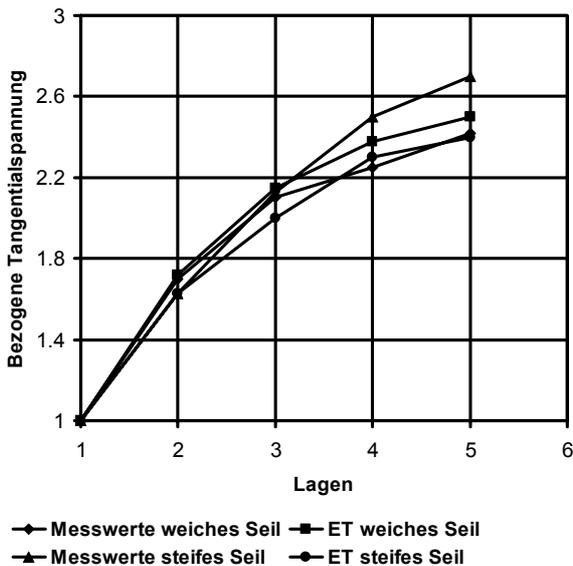
Vergleich Torrance - Messungen



**Bild 2:** Vergleich analytischer Werte der Torrance Theorie mit aus Messungen erhaltenen Werten

Der Torrance Ansatz berücksichtigt keine Verformung der Trommel bzw. des Seils, große Abweichungen treten ab der dritte Lage zwischen Messungen und gerechneten Werten auf.

Vergleich Egawa Taneda (ET) - Messungen



**Bild 3:** Vergleich analytischer Werte der Egawa-Taneda Theorie mit aus Messungen erhaltenen Werten

Die Egawa-Taneda Methode berücksichtigt die Verformung des Trommelmantels und des Seils. Es kommt in der Theorie zu einer schlechten Zuordnung der Ergebnisse (Theorie und Messungen) durch die ungenaue Nachbildung der Trommelmantel- und Seilverformung (Berechnung der Koeffizienten  $A_i$  mit Annahme eines konstanten Keilwinkels während der Bewicklung).

Vergleich Dietz - Messungen



**Bild 4:** Vergleich analytischer Werte der Dietz Theorie mit aus Messungen erhaltenen Werten

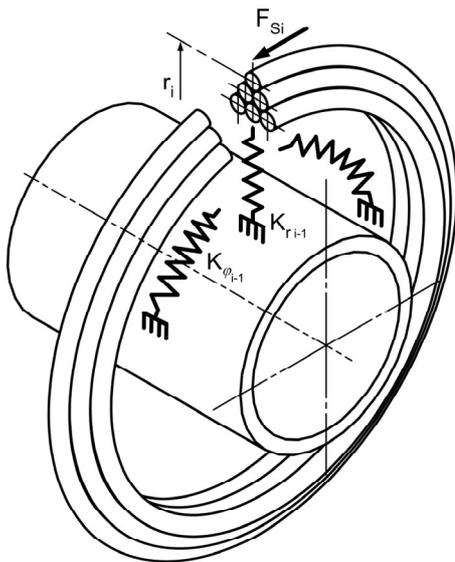
Die Bestimmung der Belastungen nach Dietz bildet die Tendenz der Belastungszunahme in Abhängigkeit von der Lagenanzahl sehr gut ab: Eine asymptotische Zunahme der Belastung ist für das weiche Seil und eine leicht progressive Zunahme ist für das steife Seil zu beobachten.

Weiterhin zeigt der Vergleich zwischen den Messwerten und berechneten Werten in allen drei Fällen, dass die Messwerte (weiches und steifes Seil) geringer als die nach den Ansätzen von Torrance und Dietz berechneten Werte sind. Diese Abweichung lässt sich erklären durch eine mögliche Tragfähigkeit des Seilpakets, welche die Belastung der obersten Lage in einer Position  $i$  teilweise aufnimmt.

### 3 Entwicklung der Belastung auf dem Mantel mit Berücksichtigung der Seilpaketsteifigkeit

Das Drahtseil hat im Durchschnitt ein Längselastizitätsmodul von ca.  $1,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ . Bei einer mehrlagigen Bewicklung, unter der Voraussetzung, dass das Seil nicht nachrutscht, bildet sich eine geschlossene Ringstruktur um den Mantel. **Bild 5**

stellt ein Seilpaket dar, bei dem die unteren Lagen durch Ersatzfedern abgebildet werden.



**Bild 5:** Seilpaketsmodell

Durch die Beschreibung des Gleichgewichts im Seilpaket wird der entstehende Druck  $p_i$  in Lage  $i$  nach (Gl. 02) erhalten.

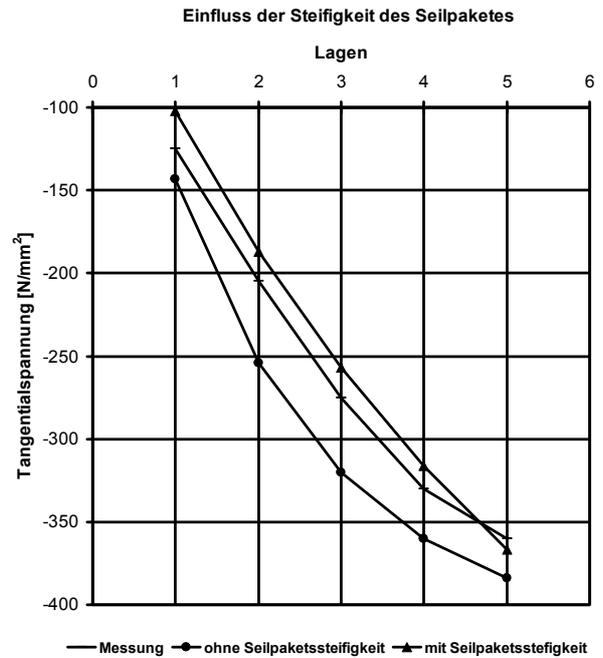
$$p_i = \frac{1}{\left(1 + k_1 \frac{E_L}{E_T}\right)} \left( k_2 p_{i+1} + k_3 \left( F_{si} - k_4 \frac{E_L}{E_{SQ}} \right) \right) \tag{Gl. 02}$$

Mit

- $E_L$ : Längselastizitätsmodul des Seils
- $E_{SQ}$ : Querelastizitätsmodul des Seils
- $E_T$ : Elastizitätsmodul des Mantels
- $F_{si}$ : Seilzugkraft im Seil
- $k_i$ : Verschiedene geometrische Faktoren (abhängig von Seil- und Manteldurchmesser bzw. von der Mantelwandstärke)
- $p_i$ : Druck in der Lage  $i$
- $p_{i+1}$ : Druck in der Lage  $i+1$

Die Gleichung (Gl. 02) zeigt, dass der entstehende Druck  $p_i$  in einer Lage  $i$  hauptsächlich von den geometrischen Parametern der Trommel, vom Seildurchmesser und besonders von dem Steifigkeitsverhältnis (Längselastizitätsmodul zu Querelastizitätsmodul) bzw. vom Trommelwerkstoff abhängt.

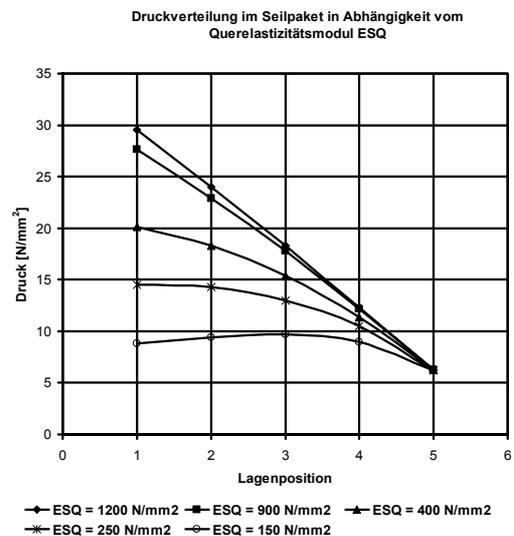
**Bild 6** stellt die Messergebnisse einer Seiltrommel mit einem Seildurchmesser  $d_s = 23$  mm unter einer Zugkraft von  $F_s = 50$  kN und die Verläufe der Beanspruchungen mit und ohne Berücksichtigung der Seilpaketssteifigkeit dar.



**Bild 6:** Reduzierung der Beanspruchung im Mantel durch die Tragfähigkeit des Seilpaketes

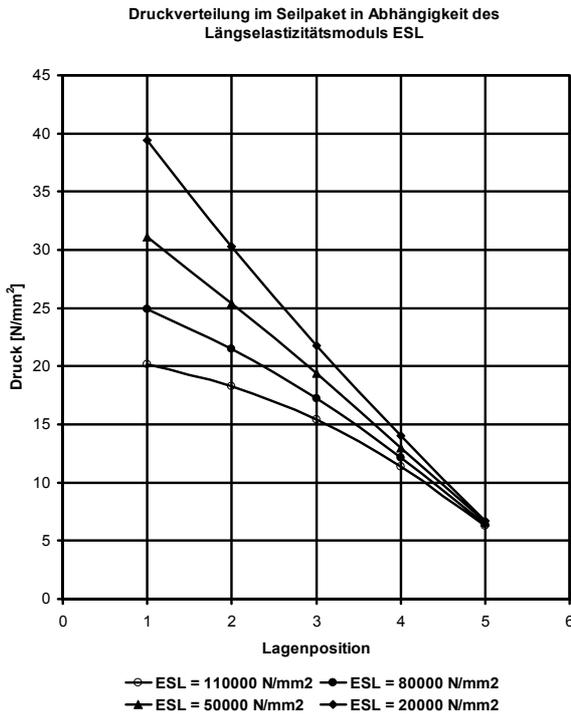
Es ergibt sich eine deutliche Absenkung der Beanspruchung im Trommelmantel durch die Berücksichtigung der Seilpaketsteifigkeit (vergl. Bild 6). Die Abweichung zwischen den Messwerten und der Berechnung mit der Berücksichtigung der Seilpaketsteifigkeit resultiert zum Teil aus dem komplexen Aufbau des Seilpaketes. Vereinfacht wird eine Säulenordnung der Windungen zugrunde gelegt, obwohl eine unterschiedliche Staplung zwischen Aufstiegs- und Parallelbereich vorliegt.

**Bild 7** zeigt die Verteilung des Drucks im Seilpaket im Abhängigkeit vom Querelastizitätsmodul.



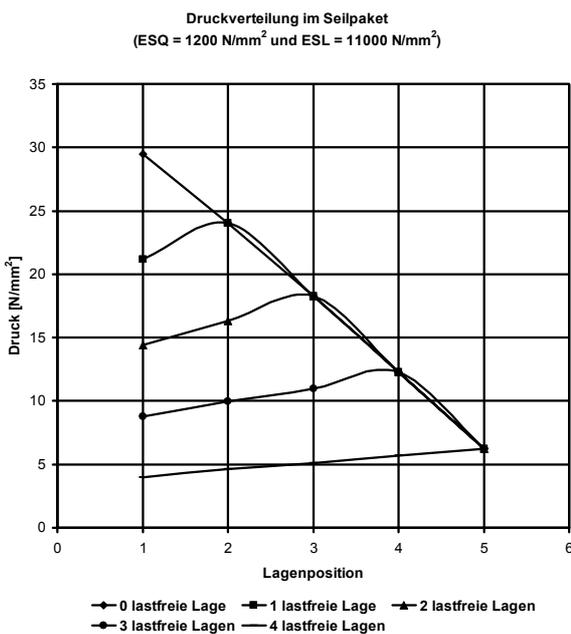
**Bild 7:** Druckverteilung im Seilpaket im Abhängigkeit vom Querelastizitätsmodul des Seils

Weiterhin ist die Belastung im Seilpaket auch vom Längselastizitätsmodul abhängig. **Bild 8** zeigt diesen Sachverhalt.



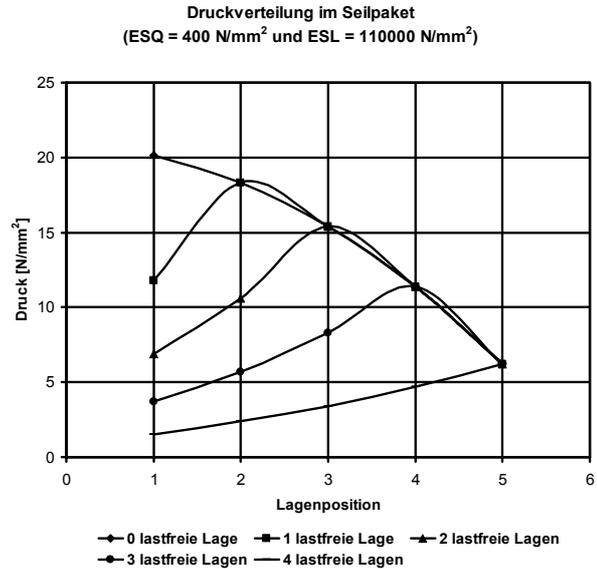
**Bild 8:** Druckverteilung im Seilpaket im Abhängigkeit vom Längselastizitätsmodul des Seils

In der Praxis wird der Mantel teilweise durch die lastfreie Aufwicklung von ein oder zwei unteren Lagen entlastet. Die **Bilder 9** und **10** bestätigen die Entlastung des Mantels durch eine solche Vorgehensweise.



**Bild 9:** Druckverteilung im Seilpaket im Abhängigkeit der lastfreien aufgewickelten Lagen

Durch die lastfreie Aufwicklung der ersten Lage reduziert sich den Druck auf dem Mantel um ca. 28% bei steifem Seil (**Bild 9**) und um ca. 41% bei weichem Seil (**Bild 10**).



**Bild 10:** Druckverteilung im Seilpaket im Abhängigkeit der lastfreien aufgewickelten Lagen

#### 4 Zusammenfassung

Die Bestimmung der Last auf die Seiltrommel bleibt nach wie vor ein sehr komplexes Thema. Es wurde hier der Einfluss der Seilpaketssteifigkeit erläutert. Die Tragfähigkeit des Seilpakets führt zu einer Entlastung des Mantels und diese kann bewusst bei der Auslegung leichterer Trommelkonstruktionen ausgenutzt werden.

Die **Bilder 9** und **10** zeigen eine Absenkung des Drucks auf den Mantel durch die lastfreie Aufwicklung unterer Lagen. Eine Reduzierung des Drucks ist bis auf 41% theoretisch möglich. In der Realität tritt ein so kompakt angenommenes Seilpaket durch den Einfluss von Seil- und Trommeltoleranzen sowie andere Abweichungen nicht auf. Die tatsächliche Entlastung ist dadurch etwas geringer als die theoretisch berechnete. **Bild 4** und **6** bestätigt diesen Sachverhalt.

#### 5 Literatur

- /1/, /2/, /3/ und /4/ s. in /5/
- /5/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten, Dissertation, Curvillier Verlag, Göttingen, 2001

# Die Trommelgestaltung bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit Kunststoffseilen

Dietz, P.; Mupende, I.; Schwarzer, T.

*Im Bereich der Leichtbaufördermittel sollen zur weiteren Reduzierung des Gesamtgewichts der Seiltriebe vermehrt Kunststoffseile zum Einsatz kommen. Die im Vergleich zum Stahlseil unterschiedlichen Seileigenschaften lassen eine veränderte Beanspruchung der Seiltrommel vermuten. Dieser Artikel stellt einen Auszug aus Ergebnissen zur Untersuchung des Einflusses der Kunststoffseilparameter auf die Trommelbeanspruchung sowie Optimierungsansätze der Trommelgestaltung für die Bewicklung einer Trommel mit Kunststoffseilen dar.*

*In the field of lightweight conveyors synthetic ropes should be increasingly used for weight reduction of hoisting winches. These rope properties compared to regular steel ropes presume a different load mechanism of the hoisting drum. This article gives a short view about the design of winches in cases of using synthetic ropes.*

## 1 Einleitung

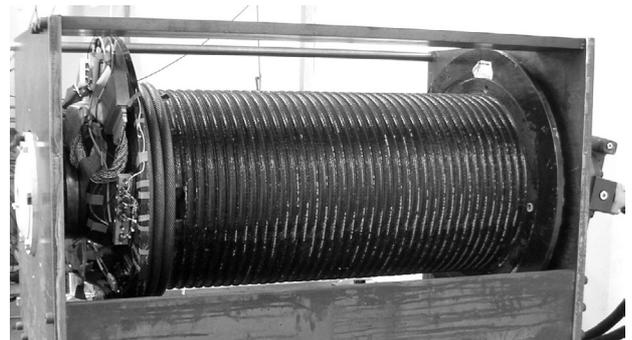
Seiltrommel und Seil müssen als Komponenten des Seiltriebes hinsichtlich steigender Kundenanforderungen weiterentwickelt werden. In der Krananwendung beispielsweise werden bei ständig steigenden Traglasten immer größere Reichweiten der Ausleger gefordert. Gleichzeitig sollen Baugröße und Masse der Seiltriebe verringert werden, um eine möglichst flexible und mobile Anwendung der Fördermittel zu gewährleisten. Diese Forderungen erzwingen die Entwicklung von Leichtbaufördermitteln.

Als bewährtes Tragmittel in Seiltrieben hat sich bislang das Drahtseil erwiesen. Sein Zusammenwirken und seine Eigenschaften hinsichtlich Verschleiß und Lebensdauer bei mehrlagiger Bewicklung von Seiltrommeln sind hinreichend genau erforscht. Ein den gestiegenen Anforderungen gerechtes Leichtbaufördermittel ist allerdings nicht mehr ausschließlich mit Drahtseilen zu realisieren. Aus diesem Grund sollen auch in sicherheitsrelevanten Anwendungen hochfeste Chemiefaserseile (Kunststoffseile), deren Masse bezogen auf die Seillänge um ein vielfaches geringer als die der Drahtseile ist, zum Einsatz kommen, Mupende /1/.

Als laufendes Seil ist das Kunststoffseil derzeit noch wenig verbreitet; der Stand der Kenntnis ist gering, denn wissenschaftliche Untersuchungen zu über Seilrollen und Seiltrommeln (ein- oder mehrlagig) laufende Faserseile fanden bisher nur in einem geringen Umfang statt. Speziell der Einfluss der Seileigenschaften auf die Trommelbeanspruchung bei mehrlagiger Bewicklung und eine daraus resultierende notwendige Änderung der Trommelgestaltung wurden bislang noch nicht betrachtet.

## 2 Allgemeiner Aufbau und Belastung der Seiltrommel

**Bild 1** zeigt den gängigen Aufbau einer Seiltrommel. Seine wesentlichen Elemente sind der Trommelmantel und die Bordscheiben.



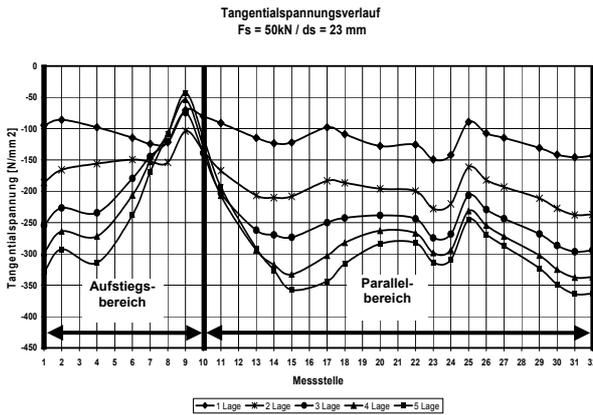
**Bild 1:** Seiltrommel auf dem Prüfstand

Die aus den Umschlingungskräften des Seiles resultierende Druckbelastung auf den Trommelmantel bildet die Hauptbeanspruchung der Seiltrommel. Eine weitere wesentliche Beanspruchung wird durch die axiale Belastung der Bordscheiben verursacht.

Grundlegend für die Bestimmung der Belastung einer Seiltrommel bei mehrlagiger Bewicklung sind die von Dietz /2/ entwickelten Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Manteldrucks und der auf die Bordscheiben wirkenden Axialkräfte. Hier werden Mantel und Bordscheibe als zwei voneinander getrennte Systeme betrachtet. Mupende /3/ erweiterte die Theorie mit einem gekoppelten Modell, welches die Interaktion von Mantel und Bordscheibe bei Belastung der Trommel berücksichtigt.

### 2.1 Einfluss der LeBus-Berillung

Entgegen der Ergebnisse die unter der Annahme einer rotationssymmetrischen Beanspruchung des Trommelmantels erhalten werden, belegen Messungen an realen Seiltrommeln eine auftretende Unsymmetrie zwischen Aufstiegs- und Parallelbereich bei der Verwendung einer Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung. **Bild 2** stellt den experimentell ermittelten Tangentialspannungsverlauf über dem Aufstiegs- und dem Parallelbereich einer Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung dar.

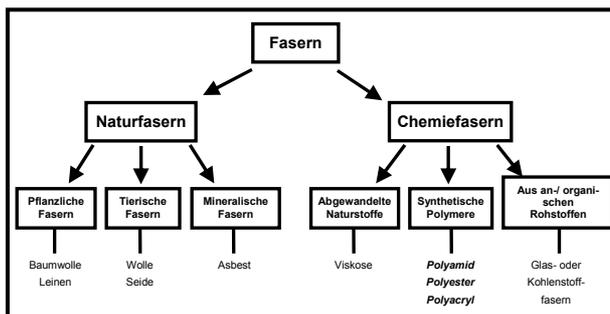


**Bild 2:** Tangentialspannungsverlauf an einer Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung

Otto /4/ entwickelte für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens einer mehrlagig bewickelten Seiltrommel mit *LeBus*-Berillung ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell.

### 3 Kunststoffseile

Ein Kunststoffseil ist ein textiles Erzeugnis aus Seilgarnen; hergestellt wird es durch zwei- oder mehrstufiges Verseilen, Ummanteln, Verflechten, oder durch Seilformung ohne Drehung (Legen oder Verkleben). Die Kunststoffseileigenschaften werden durch den verwendeten Faserwerkstoff und die Seilmachart bestimmt. Grundsätzlich unterschieden wird zwischen Natur- und Chemiefasern (siehe **Bild 3**).



**Bild 3:** Einteilung der Faserwerkstoffe

Synthetisch hergestellte Polymere kommen aufgrund ihrer definiert einstellbaren und gut reproduzierbaren Eigenschaften in der Seilherstellung bevorzugt zum Einsatz.

### 3.1 Macharten von Kunststoffseilen

Generell unterscheidet man bei der Faserseilherstellung zwischen gedrehten und geflochtenen Seilen. Ziele der Herstellung sind eine möglichst hohe Komprimierung, ein geringes Seilgewicht (je Meter) und eine hohe Ausnutzung der Festigkeit der Einzelfaser. Das gedrehte Seil wird in mehreren Verseilstufen auf Seilerbahnen oder auf Seilerei-maschinen hergestellt. Das geflochtene Seil wird auf speziellen Seilflechtmaschinen hergestellt.

Geflochtene Seile lassen sich gegenüber den gedrehten Seilen technisch weit vielfältiger aufbauen. Beginnend beim 3-fach-Geflecht über herkömmliche 8-fach- Geflechte bis zu komplizierten Kernmantel-Verbundkonstruktionen aus unterschiedlichen Materialien können geflochtene Seile dem jeweiligen Verwendungszweck optimal angepasst werden.

## 4 Beanspruchungsanalyse

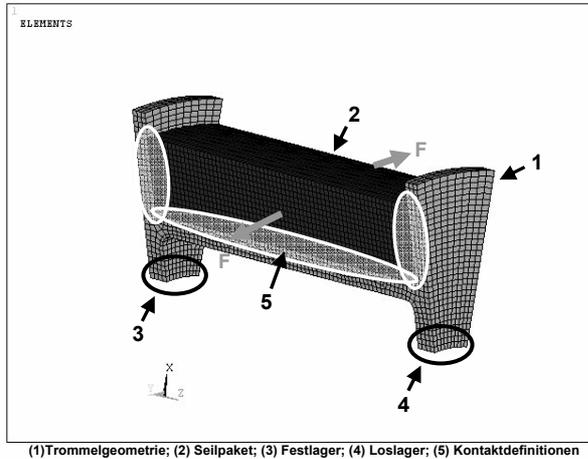
Zur Bestimmung einer für die mehrlagige Bewicklung mit einem Kunststoffseil angepassten Trommelgestaltung wurden folgende Untersuchungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode durchgeführt:

- Analyse des Einflusses verschiedener Kunststoffseilparameter auf die Trommelbeanspruchung,
- Untersuchung des Einflusses verschiedener Trommelgestaltungen (Stützscheibenanordnungen) auf das Belastungs- und Verformungsverhalten der Seiltrommel und
- Optimierung der Bordscheibengeometrie, die bei der Stützscheibenanordnung die günstigsten Eigenschaften in Hinblick auf Beanspruchung und Verformung der Seiltrommel ergeben hat.

### 4.1 Einfluss der Seilparameter auf die Trommelbeanspruchung

Das verwendete Modell der Seiltrommel für die Ermittlung des Einflusses der Seilparameter besteht aus einem 20° Sektor der Trommelgeometrie und dem dazugehörigen Seilpaket (siehe **Bild 4**). Das

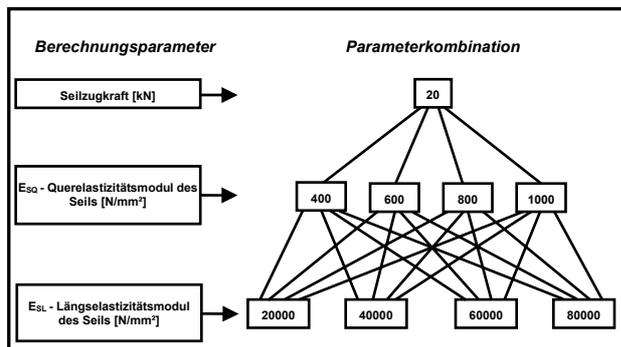
vereinfachte Seilpaket setzt sich zusammen aus fünf Lagen mit jeweils 23 Windungen pro Seillage. Die Seilzugkraft  $F_s$  ist mit 20 kN für alle durchgeführten Berechnungen konstant. Als Trommelwerkstoff wird eine Gusskonstruktion aus GGG 60 angenommen.



**Bild 4:** Berechnungsmodell

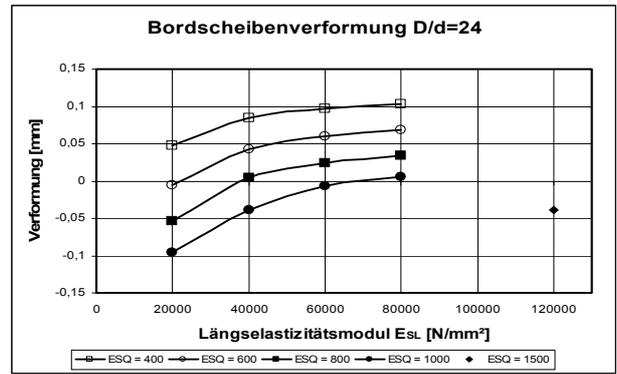
Die Trommelgeometrie wird in zwei Abmessungsvarianten untersucht ( $D/d = 24$  und  $D/d = 17$ ), um die guten Biegeewecheigenschaften von Kunststoffseilen beim Lauf über Seilscheiben und Seiltrommeln mit kleinen Durchmessern zu berücksichtigen.

Die Variation der Seilparameter erfolgt durch eine Kombination der in **Bild 5** dargestellten verschiedenen Moduln für die Quer- und Längsrichtung des Seils. Die daraus erhaltenen 16 möglichen Kombinationen der Seilpaketeigenschaften wurden berechnet.



**Bild 5:** Kombinationsschema der Seilparameter

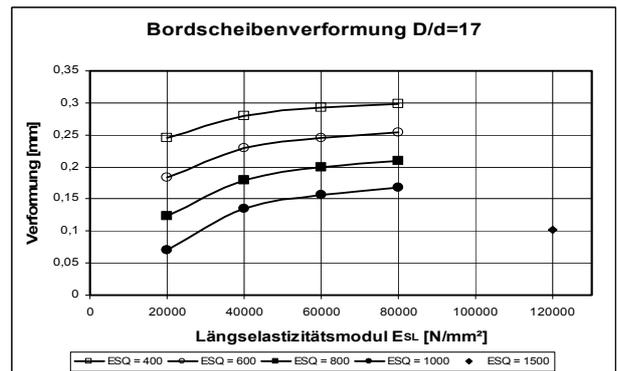
**Bild 6** zeigt den Verlauf der Bordscheibenverformung für ein Durchmesser Verhältnis von  $D/d = 24$  bei gleich bleibendem Querelastizitätsmodul  $E_{SQ}$  und veränderlichem Längselastizitätsmodul  $E_{SL}$  des Seilpaketes.



**Bild 6:** Bordscheibenverformung für  $D/d = 24$

Der Anstieg der Verformung verläuft mit zunehmendem Längselastizitätsmodul degressiv. Dieser Verformungsverlauf stellt sich auch für die anderen Querelastizitätsmoduln ein, wobei mit zunehmendem  $E_{SQ}$  ein steilerer Anstieg zu beobachten ist.

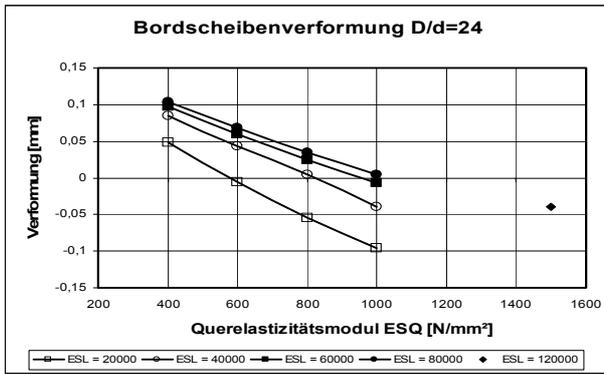
In **Bild 7** ist der Verformungsverlauf der Bordscheiben in Abhängigkeit vom Längselastizitätsmodul  $E_{SL}$  bei gleich bleibendem Querelastizitätsmodul  $E_{SQ}$  für die Trommelgeometrie mit einem Durchmesser Verhältnis von  $D/d = 17$  dargestellt:



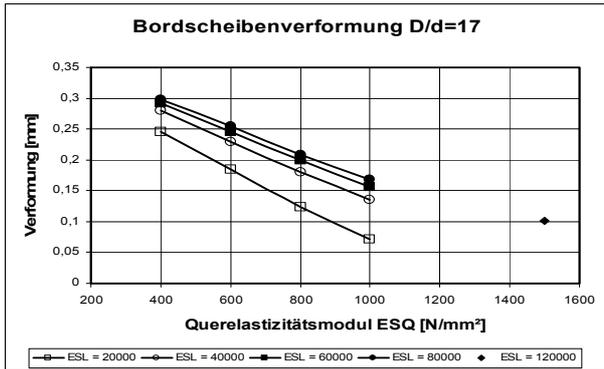
**Bild 7:** Bordscheibenverformung für  $D/d = 17$

Die Verformungsverläufe weisen denselben Verlauf auf, wie er bei der Auswertung der Trommelgeometrie mit dem Durchmesser Verhältnis  $D/d = 24$  erhalten wurde. Die maximale Verformung tritt (wie auch für  $D/d = 24$ ) bei der Kombination aus kleinstem  $E_{SQ}$  (400  $N/mm^2$ ) und größtem  $E_{SL}$  (80000  $N/mm^2$ ) auf. Sie ist mit  $\Delta u_z = 0,298$  mm im Vergleich zur Trommelgeometrie mit  $D/d = 24$  ( $\Delta u_z = 0,105$  mm) fast dreimal so groß.

**Bild 8** und **Bild 9** zeigen bei gleich bleibendem Längselastizitätsmodul  $E_{SL}$  den Verlauf der Bordscheibenverformung über dem Querelastizitätsmodul  $E_{SQ}$  für beide Trommelgeometrien:



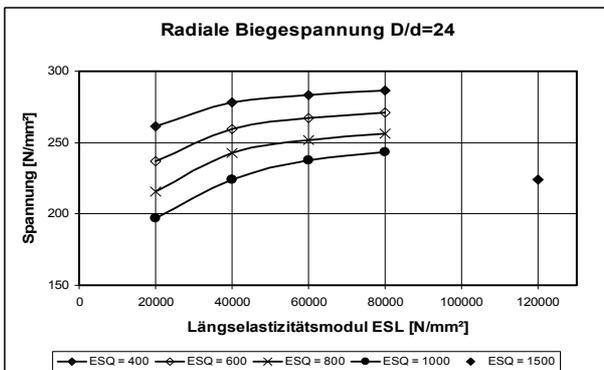
**Bild 8:** Bordscheibenverformung für  $D/d = 24$



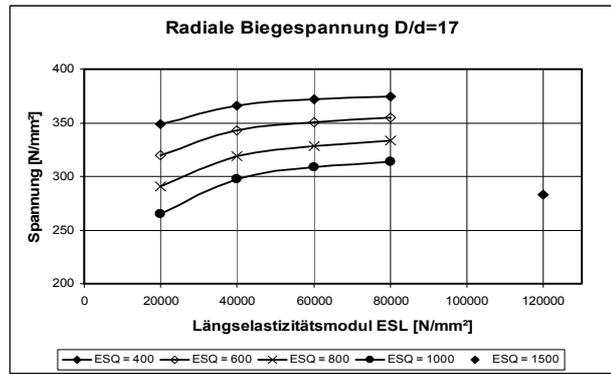
**Bild 9:** Bordscheibenverformung für  $D/d = 17$

In den obigen Abbildungen ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Bordscheibenverformung und dem Querelastizitätsmodul  $E_{SQ}$  zu erkennen. Die größten Verformungen der Bordscheibe treten analog zu **Bild 6** und **Bild 7** bei einem Querelastizitätsmodul von  $E_{SQ} = 400 \text{ N/mm}^2$  und die geringsten bei einem Querelastizitätsmodul von  $E_{SQ} = 1000 \text{ N/mm}^2$  auf.

Zum Vergleich der Bordscheibenbeanspruchung wird die auftretende radiale Biegespannung an den Innenseiten der Bordscheiben ausgewertet. In **Bild 10** und **Bild 11** ist ihr Verlauf über dem Längselastizitätsmodul  $E_{SL}$  für beide Trommelgeometrien dargestellt:



**Bild 10:** Radiale Biegespannung für  $D/d = 24$



**Bild 11:** Radiale Biegespannung für  $D/d = 17$

Die Verläufe der auftretenden radialen Biegespannung  $\sigma_{r,B}$  weisen für beide Trommelgeometrien denselben Verlauf auf wie die der Verformung. Analog zu den vorherigen Darstellungen treten auch hier die maximalen Biegespannungen für beide Trommelgeometrievarianten bei der Kombination „kleinstes Querelastizitätsmodul und größtes Längselastizitätsmodul“ auf: Für  $D/d = 24$  liegt die radiale Biegespannung bei  $\sigma_{r,B} = 286 \text{ N/mm}^2$ , für  $D/d = 17$  wird ein  $\sigma_{r,B} = 374 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Dies entspricht einer Steigerung von 31 %.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass:

- die Höhe der Verformung und die Größe der auftretenden Spannung stärker vom Querelastizitätsmodul als vom Längselastizitätsmodul abhängen,
- der Verlauf in Abhängigkeit vom Querelastizitätsmodul einen linearen Zusammenhang aufweist,
- die auftretende Belastung abhängig von der Kombination aus  $E_{SQ}$  und  $E_{SL}$  ist und
- die Belastung mit kleiner werdendem Durchmesser Verhältnis  $D/d$  steigt.

#### 4.2 Einfluss der Gestaltung auf die Trommelbeanspruchung

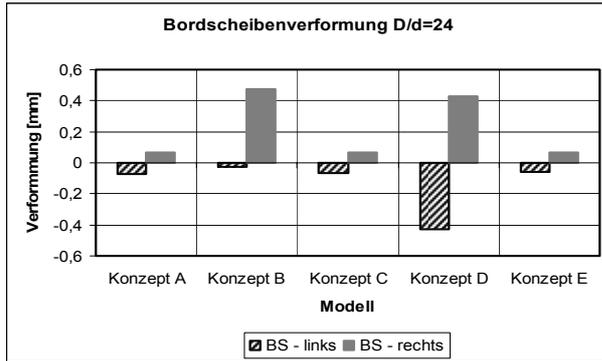
Um die Trommelgeometrie speziell für den Einsatz mit Kunststoffseilen zu optimieren, wird der Einfluss verschiedener Anordnungen der Stützscheiben am Trommelkörper für die bereits verwendeten Durchmesser Verhältnisse  $D/d = 24$  und  $D/d = 17$  untersucht. Für das Kunststoffseilpaket wird ein Querelastizitätsmodul  $E_{SQ} = 800 \text{ N/mm}^2$  und ein Längselastizitätsmodul  $E_{SL} = 60000 \text{ N/mm}^2$  festgelegt. Die Seilzugkraft  $F_S$  beträgt unverändert 20 kN.

**Tabelle 1** gibt eine Übersicht über die untersuchten Stützscheibenanordnungskonzepte am Trommelkörper.

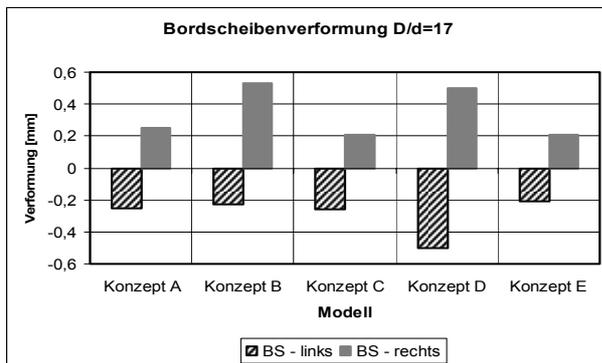
Konzept A (Grundmodell)	Konzept B	Konzept C	Konzept D	Konzept E
Grundmodell mit Stützscheiben direkt unter den Bordscheiben	Stützscheibe an der Loslagerseite nach außen verschoben	Stützscheibe an der Loslagerseite nach außen verschoben	Stützscheiben auf beiden Seiten nach innen verschoben	Stützscheiben auf beiden Seiten nach außen verschoben

**Tabelle 1:** Stützscheibenanordnungskonzepte

**Bild 12** und **Bild 13** zeigen die Bordscheibenverformungen (beidseitig) der fünf Anordnungskonzepte für die beiden Durchmesserhältnisse:



**Bild 12:** Bordscheibenverformung für D/d = 24



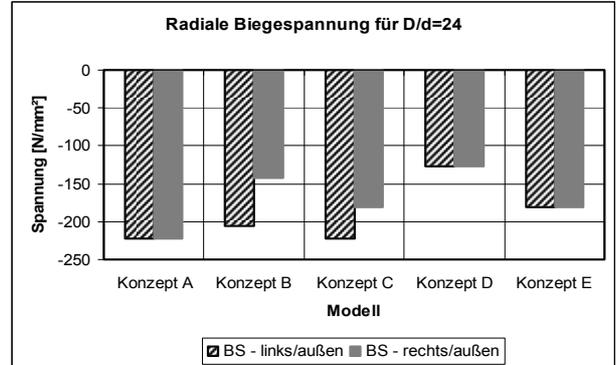
**Bild 13:** Bordscheibenverformung für D/d = 17

Die geringsten Bordscheibenverformungen weisen die Konzepte A, C und E auf, bei  $D/d = 24$  sind die Verformungen an den beiden Bordscheiben nahezu symmetrisch. Für das Durchmesser Verhältnis  $D/d = 17$  tritt bei Konzept C im Vergleich zu den beiden anderen Konzepten eine Unsymmetrie auf. Konzept B weist neben Konzept D in beiden Fällen die größten Verformungen der Bordscheiben auf, wobei für Konzept B aufgrund der Anordnung der Stützscheiben eine große Unsymmetrie auftritt.

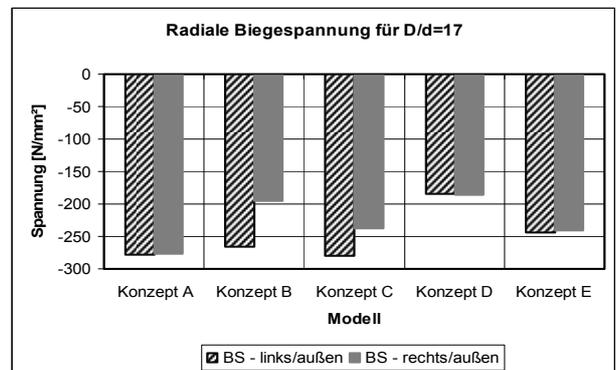
Bezüglich der Bordscheibenverformung für die beiden untersuchten Durchmesser Verhältnisse ist festzustellen: Je geringer die Verformung für  $D/d = 24$ , desto größer die Zunahme der Verformung für  $D/d = 17$ . Die Umkehrung gilt ebenfalls: Je größer die Verformung für  $D/d = 24$ , desto geringer die an-

schließende Zunahme der Verformung für  $D/d = 17$  (vergl. Konzept D).

Die an Außenseiten der Bordscheiben auftretenden radialen Biegespannungen sind für die beiden Durchmesser Verhältnisse in **Bild 14** und **Bild 15** dargestellt:



**Bild 14:** Radiale Biegespannung für D/d = 24



**Bild 15:** Radiale Biegespannung für D/d = 17

Den beiden Darstellungen ist zu entnehmen, dass das Konzept D mit den beiden nach innen verschobenen Stützscheiben jeweils die geringsten radialen Biegespannungen  $\sigma_{r,B}$  aufweist. Die auftretenden Spannungen für Konzept D sind symmetrisch und betragen an den Außenseiten  $\sigma_{r,B} = 125 \text{ N/mm}^2$  ( $D/d = 24$ ) bzw.  $\sigma_{r,B} = 180 \text{ N/mm}^2$  ( $D/d = 17$ ).

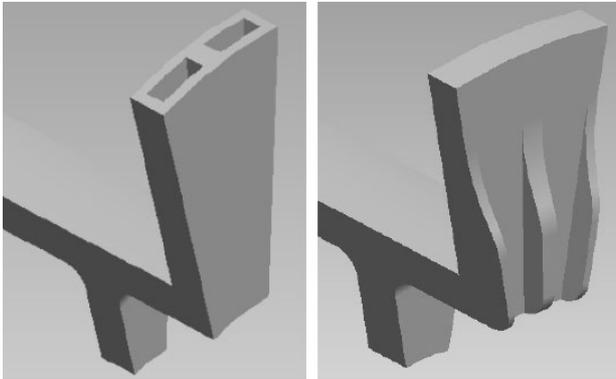
Für eine Bewicklung der beiden Trommelgeometrien mit einem Kunststoffseil mit den oben angeführten Elastizitätsmoduln weist das Konzept D im Hinblick auf die Bordscheibenbeanspruchung die günstigste Anordnung der Stützscheiben auf, wobei die auftretenden Verformungen allerdings (im Vergleich zu den anderen Konzepten) mit am größten sind.

### 4.3 Optimierung der Trommelgeometrie

Die Bordscheiben von Konzept D sollen dahingehend optimiert werden, dass im Vergleich zum Ausgangsmodell im Verhältnis geringere Ver-

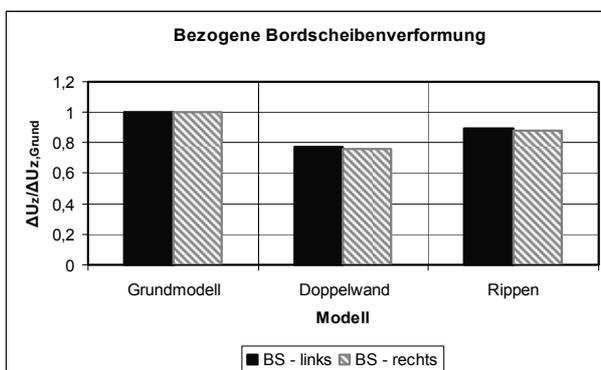
formungen und betragsmäßig kleinere Spannungen auftreten.

Einen Lösungsansatz bietet die Möglichkeit der Versteifung der Bordscheiben mit Hilfe einer Doppelwandkonstruktion oder einer Versteifung durch am Umfang verteilte Rippen. **Bild 16** zeigt die beiden Modelle der Gestaltungsoptimierung der Bordscheiben.

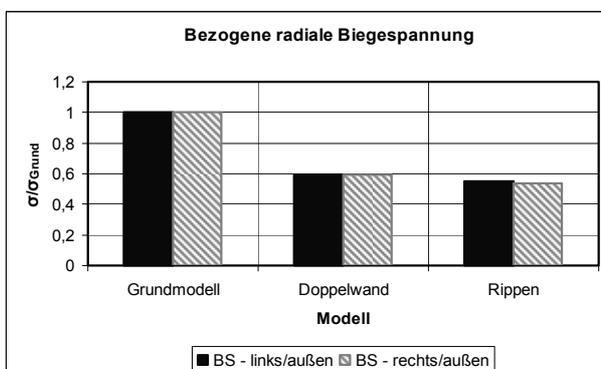


**Bild 16:** Optimierungsvorschläge

**Bild 17** und **Bild 18** stellen die auf das Grundmodell bezogenen Verformungen der Bordscheiben und die radialen Biegespannungen der veränderten Bordscheibengeometrien dar:



**Bild 17:** Bezogene Bordscheibenverformung



**Bild 18:** Bezogene radiale Biegespannung

Es ist zu erkennen, dass bei dem doppelwandigen Aufbau der Bordscheibe im Vergleich zum Grundmodell und zu der Verstärkung der Bordscheiben

durch Rippen die geringste Verformung der Bordscheiben auftritt. Sie beträgt nur noch 77 % der ursprünglichen Verformung, wohingegen bei dem Modell mit Rippen nur eine Absenkung auf 89 % der ursprünglichen Verformung stattfindet.

Bei der Reduzierung der auftretenden radialen Biegespannung sind die beiden Optimierungsvorschläge der Bordscheiben nahezu gleich. So beträgt sie bei der Doppelwandkonstruktion nur noch 60 % und bei der Verstärkung durch Rippen lediglich 55 % der auftretenden Werte des Grundmodells.

## 5 Zusammenfassung

Bei der Verwendung eines Kunststoffseil anstatt eines Drahtseils treten aufgrund der unterschiedlichen Seileigenschaften Veränderungen in der Beanspruchung der Seiltrommel auf. Diese Veränderung macht eine Anpassung der Trommelgestaltung erforderlich. Dazu sind verschiedene gestalterische Maßnahmen an der Trommelgeometrie möglich, wobei im Hinblick auf ein Leichtbaufördermittel auf eine reine Steigerung der Wandstärken verzichtet werden sollte. Speziell im Bereich der Bordscheiben wäre im Hinblick auf eine Reduzierung der auftretenden Verformungen und Spannungen eine Verstärkung durch Rippen oder ein doppelwandiger Aufbau der Bordscheiben geeignet.

## 6 Literatur

- /1/ Mupende, I.: Einfluss der Seildämpfung auf die Trommelbelastung bei Bewicklung mit Kunststoffseilen oder Kunststoff – Stahl Seilen; Institutsmitteilung Nr. 29, IMW Clausthal, 2004
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /3/ Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, Curvillier Verlag Göttingen, 2001
- /4/ Otto, S.: Ein nicht-rotationsymmetrisches Belastungsmodell für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, TU Clausthal, Clausthal, 2003

## Beanspruchungsverhalten und Lebensdauerabschätzung einer Welle zur Unterstützung der Lager eines Drehrohrofens

Hua, Q.

*Drehrohröfen wurden in den letzten Jahren verstärkt zur Herstellung von Klinker in der Zementindustrie eingesetzt. Im Betrieb wird der Ofen über seine gesamte Länge durch zwei oder drei Stationen abgestützt. Die Wellen der Lagerstationen werden durch ein großes umlaufendes Biegemoment belastet. Nach einer bestimmten Anzahl von Lastspielen können Mikrorisse an der Welle bei hoch beanspruchten Stellen auftreten. Diese Risse vergrößern sich über der Lastspielanzahl und können am Ende zum Abbruch der Produktion führen. Zur Erhöhung der Lebensdauer solcher Wellen werden das Beanspruchungsverhalten und die Lebensdauerabschätzung untersucht.*

*Rotary kilns are being used widely for the production of cement clinker in the recent years. The kiln is based on bearing stations. So their axle is loaded under a heavy and oscillating bending moment. This leads to micro cracks, which are spread out along the axle. Due to that, the production of the whole plant could be stopped. In this paper, the state of stress and the lifetime prediction are researched.*

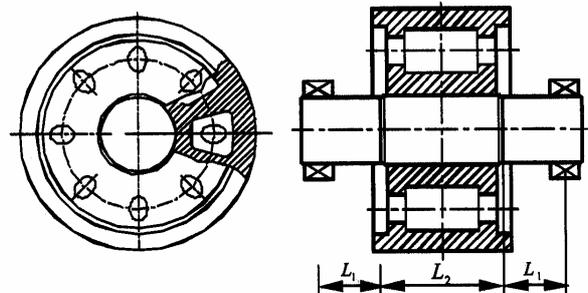
### 1 Einführung

Die Lagerstation eines Drehrohrofens ist in **Bild 1** dargestellt. Das Gewicht des Ofenmantels, des Ofenfutters sowie des Klinkers im Ofen (insgesamt mehrere tausend Tonnen) wirkt von dem Haltring über die Flansche auf die Welle ein. Die Welle wird durch die Fest- und Loslager gestützt. Aufgrund von Reibung zwischen den Haltringen und den Flanschen dreht sich der Flansch mit dem Ofen zusammen.

Die Gestaltung der Lagerstation wird in **Bild 2** verdeutlicht.  $L_1$  ist der Abstand zwischen den Stützlagern und den Flanschen, und  $L_2$  ist die Breite der Flansche (auch für die Quertraktion der Radiallast auf die Welle).



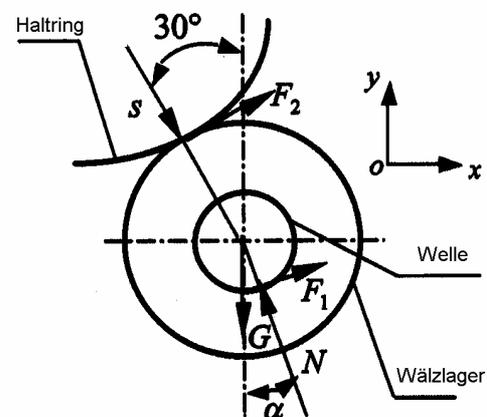
**Bild 1:** Lagerstation an einem Drehrohrofen



**Bild 2:** Gestaltung der Lagerstation

### 2 Beanspruchungsverhalten

Die Lastübertragung zwischen dem Haltring des Ofens und der Lagerstation ist in folgendem **Bild 3** dargestellt. Der Flansch und die Welle haben das Gewicht  $G$ , und  $s$  ist der Anteil des Gewichtes aus dem Drehrohrofen.



**Bild 3:** Lastübertragung zwischen dem Haltring und der Lagerstation /1/

Das Gewicht  $G$  ist im Vergleich zur Radiallast  $s$  sehr klein und kann daher vernachlässigt werden.  $F_1$  und  $F_2$  sind Reibkräfte. Die Wirkungskraft  $N$  bildet mit dem Lot den Winkel  $\alpha$ . Die Reibkraft  $F_1$  trägt

$$F_1 = \mu \cdot N \quad \text{Gl. (1)}$$

Die Kraftanteile in x- und y-Richtung nach Bild 3 erfüllen die folgenden Beziehungen:

$$2N \cdot \cos \alpha + F_2 \sin 30^\circ + 2F_1 \sin \alpha = s \cdot \cos \alpha + G \quad \text{Gl. (2)}$$

$$2N \cdot \sin \alpha = s \cdot \sin 30^\circ + 2F_2 \cdot \cos 30^\circ + 2F_1 \cdot \cos \alpha \quad \text{Gl. (3)}$$

Für die Momente gilt folgende Beziehung:

$$F_2 \cdot r_2 = F_1 \cdot r_1 \quad \text{Gl. (4)}$$

Hierbei sind  $r_1$  der Radius der Welle,  $r_2$  der Radius des Flansches.

Setzt man Gl. (4) in die Gl. (2) und Gl. (3), so erhält man für die Kraft  $F_1$

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{s \cdot \sin 30^\circ}{\frac{1}{\mu} \cdot \sin \alpha + \frac{r_1}{r_2} \cdot \sin 30^\circ + \sin \alpha} \quad \text{Gl. (5)}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{s \cdot \sin 30^\circ}{\frac{1}{\mu} \cdot \sin \alpha - \frac{r_1}{r_2} \cdot \cos 30^\circ - \cos \alpha} \quad \text{Gl. (6)}$$

Aus Gl. (5) und Gl. (6) kann der Winkel  $\alpha$  berechnet werden.

Nimmt man die Mittenlinie der Welle als z-Richtung, so erhält man die Kontraktion in x- und y-Richtung.

$$q_x(z) = \frac{s \cdot \sin 30^\circ + F_2 \cdot \cos 30^\circ}{L_2} \quad \text{Gl. (7)}$$

$$q_y(z) = \frac{s \cdot \sin 30^\circ + G - F_2 \cdot \sin 30^\circ}{L_2} \quad \text{Gl. (8)}$$

Wegen der Symmetrie der Lagerstation muss nur eine Hälfte der Welle untersucht werden. Laut Konvention beträgt die Koordinate des Stützagers  $z = 0$ . So erhält man den Momentverlauf in Axialrichtung für den Bereich  $0 \leq z \leq L_1$  der Welle

$$M_x(z) = (N \cdot \sin \alpha - F_1 \cdot \cos \alpha) \cdot z \quad \text{Gl. (9)}$$

$$M_y(z) = (N \cdot \cos \alpha + F_1 \cdot \sin \alpha) \cdot z \quad \text{Gl. (10)}$$

$$T(x) = F_1 \cdot r_1 \quad \text{Gl. (11)}$$

Für den Bereich  $L_1 \leq z \leq L_2/2$  der Welle

$$M_x(z) = (N \cdot \sin \alpha - F_1 \cdot \cos \alpha) \cdot z - \frac{1}{2} \cdot q_x \cdot (z - L_1)^2 \quad \text{Gl. (12)}$$

$$M_y(z) = (N \cdot \cos \alpha + F_1 \cdot \sin \alpha) \cdot z - \frac{1}{2} \cdot q_y \cdot (z - L_1)^2 \quad \text{Gl. (13)}$$

$$T(x) = F_1 \cdot r_1 - \frac{F_2 \cdot r_2}{L_2} (z - L_1) \quad \text{Gl. (14)}$$

Das gesamte Biegemoment in dem Querschnitt erfolgt aus Gl. (9) bis Gl. (14)

$$M(z) = \sqrt{M_x^2(z) + M_y^2(z)} \quad \text{Gl. (15)}$$

Die maximale Biege- und Schubspannungen befinden sich an der Oberfläche der Welle und betragen

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot M_{\max}(z)}{\pi \cdot r^3} \quad \text{Gl. (16)}$$

$$\tau_{\max} = \frac{2 \cdot T_{\max}(z)}{\pi \cdot r^3} \quad \text{Gl. (17)}$$

$M_{\max}$  und  $T_{\max}$  sind nach Gl. (15) das maximale Biegemoment und die maximale Torsion auf die Welle.

Die Vergleichsspannung an den kritischen Stellen ergibt sich nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) zu

$$\sigma_V(z) = \sqrt{\sigma(z)^2 + 3\tau(z)^2} \quad \text{Gl. (18)}$$

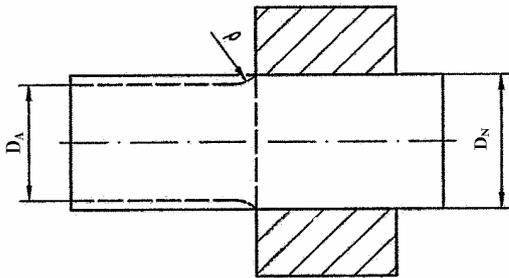
Die Maxima der Biege- und Schubspannung können sich an verschiedenen Stellen befinden, dabei spielt die Gestaltung der Lagerstation eine wichtige Rolle. Bei einer Welle nach Bild 2 liegt die maximale Biegung und Torsion beim Übergang der Bereiche von  $L_1$  zu  $L_2$  auf der Welle.

Im Übergang von  $L_1$  zu  $L_2$  befindet sich ein Wellenabsatz mit dem Radius der Rundung  $\rho$ , **Bild 4**. Die Kerbwirkung durch den Wellenabsatz spielt eine wichtige Rolle für das Ermüdungsverhalten der Welle. Zur Betrachtung der Dauerfestigkeit der Welle muss die maximale Vergleichsspannung aus Gl. (18) folgendermaßen ermittelt werden:

$$\sigma_V = \alpha \cdot \sigma_V(z) \quad \text{Gl. (19)}$$

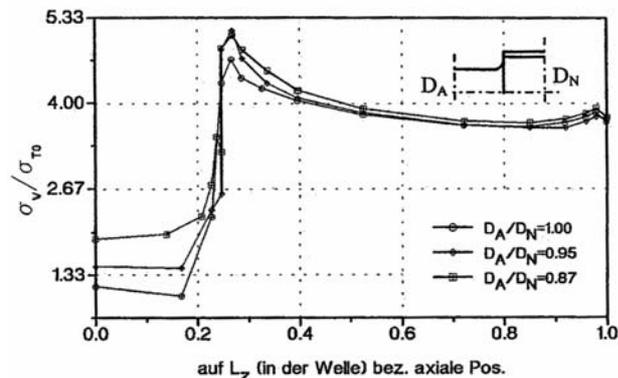
Hiermit ist  $\alpha$  die Formzahl. Sie kann nach folgender Formel berechnet wird.

$$\alpha = \frac{\sigma_{V,max}}{\sigma_V} \quad \text{Gl. (20)}$$



**Bild 4:** Welle-Nabe-Verbindungen mit glatter Welle (—) und mit abgesetzter Welle (--) /2/

Das folgende **Bild 5** zeigt die Spannungserhöhung der Welle unter dem Einfluss des Wellenabsatzes. Es ist zu erkennen, dass die Vergleichsspannung  $\sigma_V$  mit dem abnehmenden Verhältnis von  $D_A/D_N$  ansteigt (Darstellung der Welle unter Torsion).



**Bild 5:** Einfluss des Wellenabsatzes auf die axialen Verläufe der Vergleichsspannung in der Welle /3/

Obwohl der Wellenabsatz eine höhere Spannung in der Welle verursacht, ist die Dauerfestigkeit in der Welle-Nabe-Verbindung besser, denn durch den Wellenabsatz kann die Spannung in der Nabe deutlich reduziert werden.

Zur Erhöhung der Dauerfestigkeit solcher Verbindungen wird ein optimaler Parameter empfohlen /2/.

$$D_A / D_N \approx 0,91 \quad \text{Gl. (21)}$$

$$\rho / D_N - D_A \approx 2 \quad \text{Gl. (22)}$$

### 3 Lebensdauerabschätzung

#### 3.1 Spannungsintensität

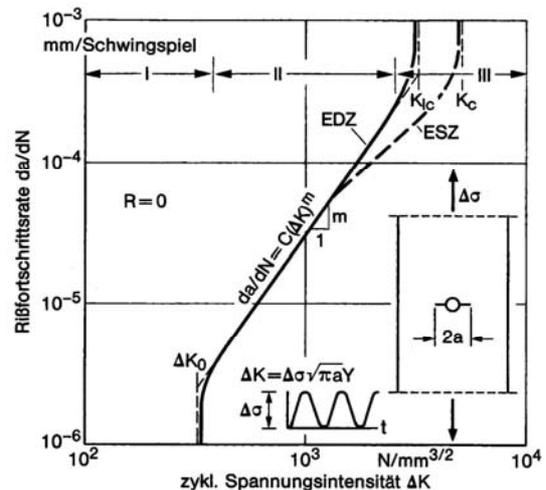
Mit der maximalen Vergleichsspannung  $\sigma_{V,max}$  kann man die Lebensdauer der Welle nach der Theorie der Bruchmechanik abschätzen.

Die zyklische Spannungsintensität  $\Delta K$  für die Rissfortschrittsrate  $da/dN$  wird durch den Geometriefaktor  $Y$  definiert:

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{2\pi a} Y \quad \text{Gl. (23)}$$

Hierbei ist  $\sigma$  die normale Spannungskomponente an der Rissfront und  $a$  die Risslänge.

Die zyklische Spannungsintensität  $\Delta K$  ist von der Rissfortschrittsgeschwindigkeit  $da/dN$  abhängig und lässt sich in drei Bereiche unterteilen. Im Bereich I mit kleinem  $\Delta K$  vergrößert sich der Riss unterhalb des Schwellenwertes  $\Delta K_0$  überhaupt nicht und darüber zunächst nur sehr langsam. Im Bereich II mit mittlerem  $\Delta K$  nimmt die Rissfortschrittsrate bei doppeltlogarithmischer Auftragung etwa proportional zur zyklischen Spannungsintensität zu. Im Bereich III tritt bei Erreichen des kritischen Spannungsintensitätsfaktors  $K_{Ic}$  bzw.  $K_{IIc}$  der Restbruch ein, **Bild 6**.



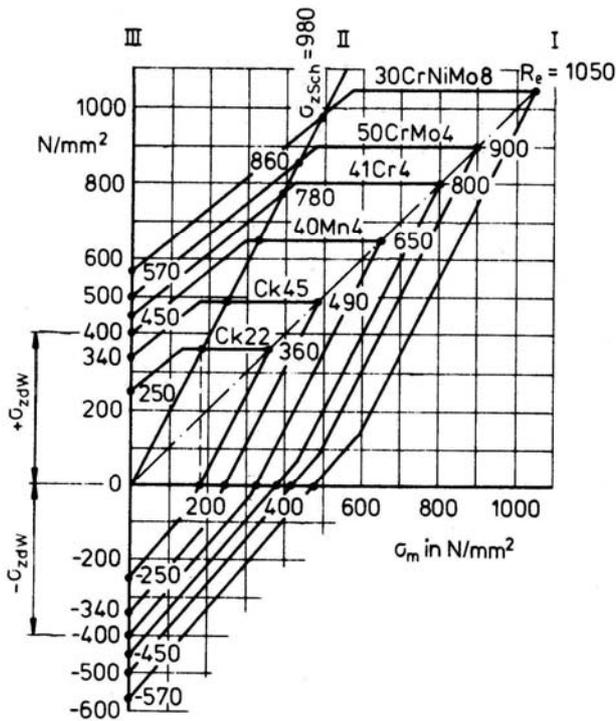
**Bild 6:** Einheitliche Rissfortschrittsrate als Funktion der zyklischen Spannungsintensität, Bereiche I II und III /4/

Nach Radaj wird für den Schwellenwert  $\Delta K_0$  empfohlen /4/

$$\Delta K_0 = \frac{3,48 \times 10^3}{\sqrt{\Delta \sigma_D}} \quad \text{Gl. (24)}$$

wobei  $\sigma_D$  die Dauerfestigkeit des Werkstoffes ist.

Die Dauerfestigkeit der verschiedenen Materialien kann aus dem folgenden Dauerfestigkeitsdiagramm abgelesen werden, **Bild 7**.



**Bild 7:** Dauerfestigkeit von Vergütungsstählen /5/

### 3.2 Rissfortschrittsrate

Im Bereich I ( $\Delta K < \Delta K_0$ ) schreitet der Riss zuerst nicht fort. In diesem Stadium gilt

$$\frac{da}{dN} = 0 \quad \text{Gl. (25)}$$

Im Bereich II (mittlere Spannungsintensität) kann die Rissfortschrittsrate  $da/dN$  proportional zu einer Potenz der Schwingbreite  $\Delta K$  der Spannungsintensität gesetzt werden, wobei die Übergangsbereiche zu  $\Delta K_0$  einerseits und  $K_{Ic}$  bzw.  $K_c$  andererseits unberücksichtigt bleiben.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{Gl. (26)}$$

Die Größen  $C$  und  $m$  sind vom Werkstoff abhängige Parameter, welche die Lage und Steigung der als Gerade im doppeltlogarithmischen Diagramm auftretenden Kurve bestimmen. Nach Clark ergibt sich allgemein die Rissfortschrittsrate für Stähle /6/

$$\frac{da}{dN} = 5,79 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2,25} \quad \text{Gl. (27)}$$

Im Bereich III tritt der instabile Riss auf, wenn die Risslänge  $a$  einen kritischen Wert erreicht; unter der Annahme, dass kleine plastische Verformungen an der Risspitze mit den Lastspielen weiterhin auftreten. Der Bereich III kann durch den kritischen

Wert des Spannungsintensitätsfaktors  $K_{Ic}$  beschrieben werden. Die Risszähigkeit  $K_{Ic}$  ist der eigentliche Werkstoffkennwert und folgt aus der kritischen Spannung  $\sigma_c$ , die bei vorgegebener Risslänge  $a$  den instabilen Restbruch einleitet:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a Y} \quad \text{Gl. (28)}$$

Wenn die Risslänge  $a$  bekannt ist, dann ergibt sich die Lebensdauer gemäß

$$N = \frac{a}{5,79 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2,25}} \quad \text{Gl. (29)}$$

Zur Lebensdauerabschätzung ist die Spannungsintensität  $\Delta K$  erforderlich.

## 4 Zusammenfassung

Anhand des Beispiels einer Welle in einer Lagerstation eines Drehrohrofens wird die Lebensdauerabschätzung eines Maschinenelementes durchgeführt. Die dazu benötigte maximale Vergleichspannung an der kritischen Stelle dieses Maschinenelementes beschreibt ein mögliches Auftreten von Mikrorissen auf der Bauteiloberfläche. Durch die maximale Spannung und den Werkstoffeigenschaften kann die Spannungsintensität ermittelt werden. Mit der Rissfortschrittsrate und der Risslänge können die Lebensdauer abgeschätzt werden.

## 5 Literatur

- /1/ Xiao, Y.; Ma, J. und Chen, Q.: Stress State and its Life Prediction of the Shaft at a Rotary Kiln. China Cement, Vol. 3, Beijing 2005
- /2/ Leidich, E.: Einfluss des Schwingungsverleißes auf die Tragfähigkeit von Welle-Nabe-Verbindungen. VDI-Berichte 1790, VDI Verlage GmbH, Düsseldorf 2003
- /3/ Ziaei, M.: Untersuchungen der Spannungen und Verschiebungen in P4C-Polygon-Welle-Nabe-Verbindungen mittels der Methode der Finiten Elemente. Dissertation, TH Darmstadt 1997
- /4/ Radaj, D.: Ermüdungsfestigkeit- Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2003
- /5/ Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1995
- /6/ Schwalbe, K. H.: Bruchmechanik metallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag, München 1983

## Werkstoffgerechte Lösungsfindung – funktionale Werkstoffe im Konstruktionsprozess

Guthmann, A.

*Immer häufiger wird es nötig, Werkstoffe zu kombinieren und funktionsgerecht einzusetzen. Abhilfe kann durch eine anforderungsgetriebene Methodik geschaffen werden, die die Eigenschaften von Werkstoffen in eine frühe Konstruktionsphase einbindet. Durch eine interdisziplinäre Verknüpfung der Komponenten Werkstoff, Konstruktion und Technologie können neue Lösungsmöglichkeiten gefunden werden.*

*It is often necessary to combine materials and make use of them in a functional way. Relief can be given by a methodology corresponding to the requirements, integrating the material properties into the early phase of the design process. New possibilities can be found by interconnecting the construction components material, design and technology.*

### 1 Einleitung

Für den Konstrukteur stellt der zu wählende Werkstoff aus Gründen der Erfüllung von konkurrierender oder sich widersprechender Anforderungen moderner und marktgerechter Produkte oft eine Restriktion dar.

Durch eine interdisziplinäre Verknüpfung der Komponenten Werkstoff, Konstruktion (Gestaltung, Modellierung) und Technologie können, ausgehend von den Produkthanforderungen, neue Möglichkeiten, Eigenschaften und Prinzipien gefunden und definiert werden, die dann bereits in der Lösungsfindungsphase in den Konstruktionsprozess eingebunden werden und zu innovativen Produkten führen.

Im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens „Anforderungsgetriebene Konzeption (Methodik) von Baukonstruktionen aus inkompatiblen Werkstoffen“ (Di 289/31-1) wurde eine allgemeine Vorgehensweise für den Konstruktionsprozess entwickelt mit Hilfe derer es möglich ist, die Werkstoffauswahl in einer den Produkthanforderungen entsprechenden Weise in die Konzeptionsphase des Konstruktionsprozesses einzubeziehen.

Es wurden Vorgehensweisen zur Analyse und Strukturierung von Werkstoffen erarbeitet sowie ein Modell dargestellt, das anhand von Werkstoffbeispielen zeigt und dazu dienen kann, die aus der Konstruktionsmethodik bekannten Grundfunktionen (Trennen, Wandeln usw.) auf Werkstoffe abzubilden, so dass ein bestimmter Werkstoff aufgrund seiner funktionellen Eigenschaft direkt zur Erfüllung einer Funktion eingesetzt werden kann.

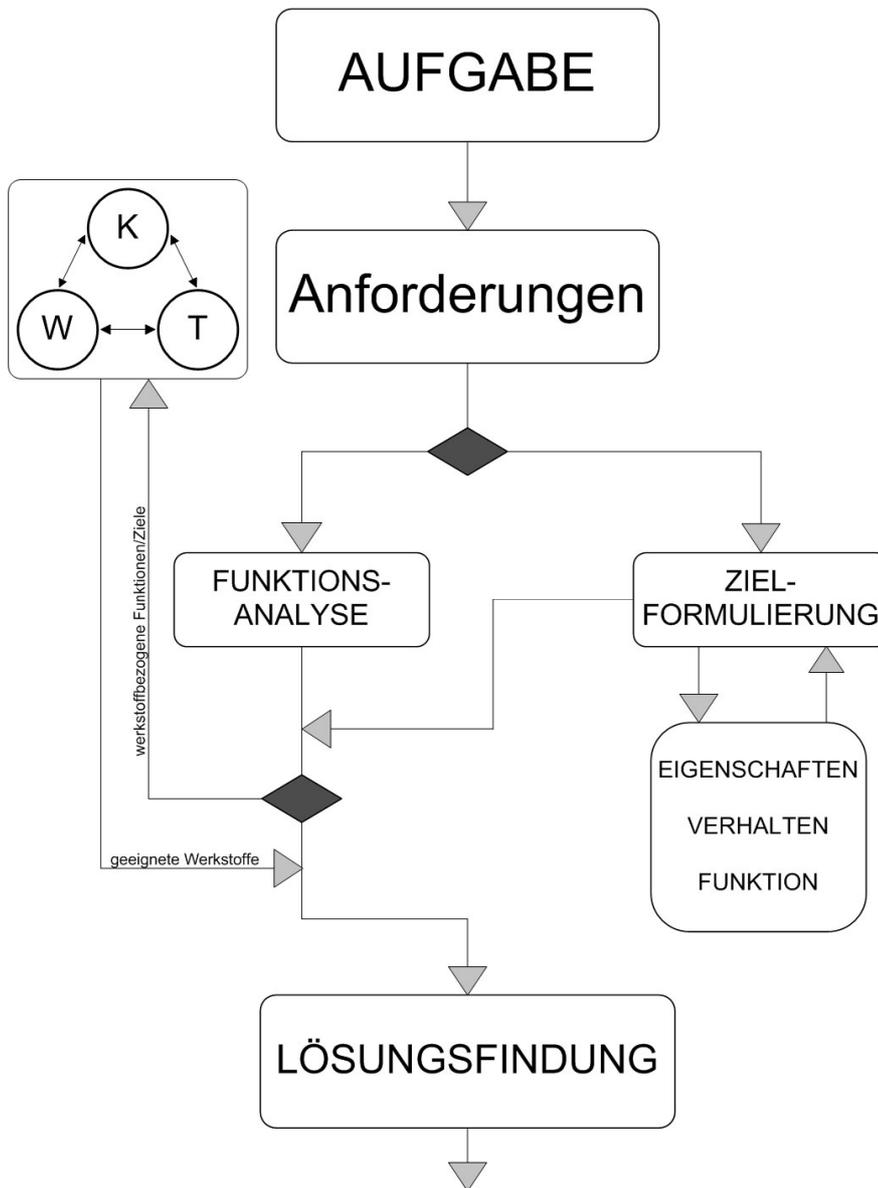
Bereits nach der Klärung der Aufgabenstellung und der Erarbeitung der Produkthanforderungen und Zielen sollte eine Formulierung von Funktionen unter Einbeziehung von Werkstoffen und deren Eigenschaften durchgeführt werden. Hierdurch wird aus dem Werkstoff ein lösungsimmanenter Funktionsträger, der zur Schaffung innovativer Produkte beitragen kann. Dieses Vorgehen soll auch Anforderungen an Werkstoffe definieren, die dann einen Anstoß für eine weiterführende Werkstoffentwicklung darstellen.

Mit Hilfe der Ergebnisse des Forschungsvorhabens soll ein interdisziplinäres Zusammenspiel aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Disziplinen ermöglicht werden, um damit die Entwicklung innovativer Produkte herbeizuführen.

### 2 Werkstoffgerechter Konstruktionsprozess

Es wurde ein Ablauf entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, Werkstoffe - in einer den Produkthanforderungen entsprechenden Weise - in eine frühe Phase des Konstruktionsprozesses einzubeziehen. Dieses weicht von der bisherigen Betrachtungsweise der Werkstoffe im Konstruktionsprozess ab, indem der Werkstoff als möglicher Funktionsträger oder als Mittel zur Erfüllung einer Produkthanforderung bzw. eines Zieles integriert wird. Hierbei werden Funktionen und Ziele des Produktes mit den Eigenschaften und Funktionen von Werkstoffen in Zusammenhang gebracht.

**Abbildung 1** zeigt den Ablauf des werkstoffgerechten Konstruktionsprozesses.



**Abbildung 1:** Ablauf des werkstoffgerechten Konstruktionsprozesses

Zu Beginn des Konstruktionsprozesses erfolgt zunächst eine Klärung der Aufgabenstellung. Die an ein Produkt gestellten Anforderungen müssen ermittelt, analysiert und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachbereiche Werkstoffe, Konstruktion und Technologie, die explizit gewünscht ist, wird das Spektrum der Anforderungen sehr komplex. Aus diesem Grund ist eine präzise und exakte Problem- und Aufgabenformulierung erforderlich. Die Qualität der Anforderungen ist so lange zu überprüfen, d.h. die Anforderungen sind so lange zu überarbeiten, bis alle Qualitätskriterien erfüllt sind. Als Ergebnis erhält man eine Anforderungsliste, die die Ziele und Bedingungen der gestellten Aufgabe in Form von Forderungen bzw. Wünschen darstellt. Im nächsten Schritt erfolgt eine Funktionsanalyse und die Erstellung einer Funktionsstruktur, die Ge-

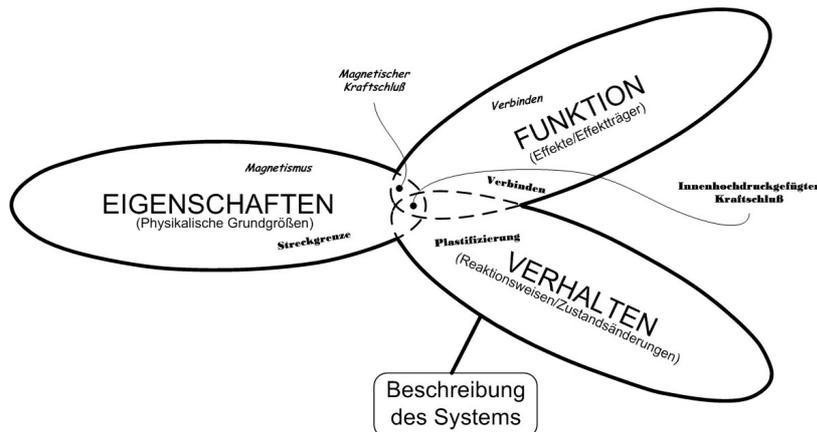
samtfunktion wird in Teilfunktionen geringerer Komplexität aufgespalten. Parallel dazu kann eine Zielformulierung durchgeführt werden, um die Abstraktionsebene zu erhöhen und den Detaillierungsgrad der Anforderungen zu senken. Zielvorstellungen werden aus den an das Produkt gestellten Anforderungen definiert, die qualitativ (textuell) oder quantitativ (messbare Parameter) festgelegt sind /1/.

Eine mögliche Methode zur Formulierung von Zielen ist die Methode Progressive Abstraktion, welche zur Gruppe der systematischen Problemspezifizierung gezählt wird. Die Progressive Abstraktion verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele:

- Herausarbeiten der Beziehungen zwischen einem gegebenen Problem und dem Zielsystem des Problemlösenden
- Aufzeigen jener Maßnahmenebene, auf der Lösungen die wirkungsvollsten Beiträge zur Zielerreichung leisten.

Vorgehensweise: In der einfachsten Form sieht die Progressive Abstraktion vor, auf ein gegebenes Problem die Fragestellung „Worauf kommt es eigentlich an?“ wiederholt anzuwenden und sich jedes Mal um Antworten grundsätzlicher Richtigkeit zu bemühen. Aus diesen Antworten wird das Problem in der jeweils nächst höheren Abstraktionsstufe formuliert. Der Prozess wird weitergeführt bis man zu Lösungsansätzen vorgedrungen ist, die den Gegebenheiten des Problems am besten entsprechen. Wird der Weg der Zielformulierung beschritten ist es denkbar, dass das zu entwickelnde Produkt, bzw. die Elemente/Komponenten aus denen ein Produkt besteht, durch seine Eigenschaften, sein Verhalten und seine Funktion beschrieben wird. Die gestellten Anforderungen können durch die Eigen-

schaften, Funktionen und das entsprechende Verhalten erfüllt werden (**Abbildung 2**).



**Abbildung 2:** Eigenschaften, Funktion und Verhalten eines Produktes

Es ist möglich, die entwickelte Beschreibung eines Produktes auf Werkstoffe abzubilden, indem gezielt nach Eigenschaften, Funktionen und Verhaltensmerkmalen von Werkstoffen gesucht wird, die zur Erfüllung der an das System gestellten Anforderungen, entweder alleine oder in Kombination, genutzt werden können.

Der Weg der Funktionsanalyse ermöglicht ebenfalls eine Integration der Werkstoffe in dieses frühe Stadium des Konstruktionsprozesses. Ein Herunterbrechen der Gesamtfunktion des zu entwickelnden Produktes führt zu einer Anzahl von Grundfunktionen die zur Lösung der Aufgabe erfüllt werden müssen. Die Abstraktionsebene wird bei diesem Vorgehen, im Gegensatz zur Zielformulierung, wesentlich niedriger gehalten. Hierbei ist es durch ein systematisches Analysieren von Werkstoffen und ihren Eigenschaften möglich, aktive Werkstoffe zu finden, die bedingt durch ihre Eigenschaften zum Funktionsträger werden.

### 3 Werkstoffe

Um funktionale Werkstoffe oder Werkstoffkombinationen zu erkennen und einzusetzen ist eine Werkstoff- bzw. Eigenschaftsanalyse notwendig, die den Zusammenhang zwischen den gewünschten bzw. geforderten Funktionen und den Eigenschaften bzw. Möglichkeiten der Werkstoffe verdeutlicht.

#### 3.1 Lösungsimmanente Werkstoffe

Für eine Innovation im Konstruktionsprozess ist es von Interesse, systematisch aktive Werkstoffe im

Konstruktionsprozess zu berücksichtigen, deren Eigenschaften eine Konstruktion erst bedingen und die nicht nur wie bisher als stofflicher Träger einer konstruktiven Funktion gesehen werden.

Als lösungsimmanente (Funktions-)Werkstoffe, die durch ihre Eigenschaften eine Funktion direkt erfüllen sind beispielsweise zu nennen:

**Piezowerkstoffe:** Ermöglichen die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie und umgekehrt. Sie reagieren auf das Anlegen einer Spannung mit einer Längenänderung bzw. es wird durch das Ausüben eines Druckes ein elektrisches Signal erzeugt. Anwendungsbeispiel: Akto-

ren zur Schwingungsdämpfung

**Magnetostruktive Werkstoffe:** Verändern unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes ihre mechanischen Eigenschaften. Anwendungsbeispiel: Motoren, hydraulische Aktoren

**Formgedächtnis Werkstoffe:** Speichern ihre ursprüngliche Form. Verformte Teile nehmen z.B. durch Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur wieder ihre Ursprungsform an. Anwendungsbeispiel: Gefäßprothesen in der Medizintechnik, Pumpen

**Elektorrheologische Werkstoffe:** Fluide, verändern beim Anlegen eines elektrischen Feldes ihre Viskosität. Anwendungsbeispiel: regulierbare Stoßdämpfer

Die Beispiele der lösungsimmanenten (Funktions-)Werkstoffe machen deutlich, in welchem Maße eine Konstruktion durch Werkstoffe beeinflusst bzw. sogar erst ermöglicht wird.

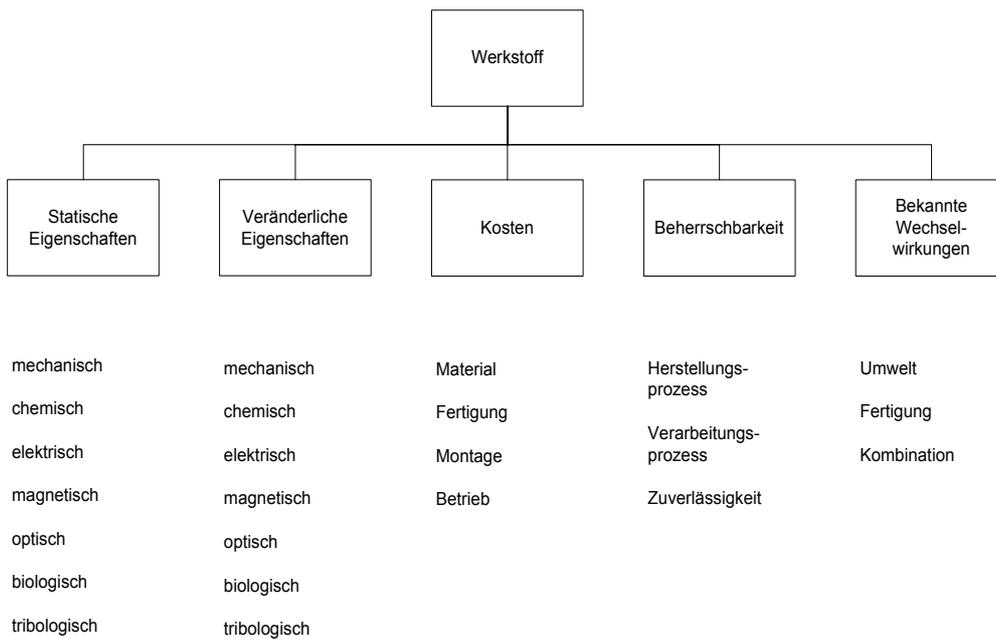
Durch die Betrachtung des Werkstoffes als aktiven Funktionsträger tritt ein hohes Innovationspotenzial zu Tage, nicht nur im Bereich der zu entwickelnden Produkte, sondern auch im Bereich Fertigungstechnologie und Werkstoffe.

#### 3.2 Werkstoffanalyse

Die Verwendung bzw. das Erkennen von funktionalen Werkstoffen setzt zuallererst eine Analyse des Werkstoffes und seiner Eigenschaften voraus. Bisher reichten oftmals Kenntnisse über Festigkeiten, Gewicht und Kosten aus, um eine Konstruktion, ein

Produkt erstellen oder optimieren zu können. Für werkstoffgerechte Lösungen und Innovationen ist jedoch eine weitergehende Werkstoffanalyse erforderlich. Diese dient dazu, nicht nur offensichtliche Eigenschaften, die zur Erfüllung einer Funktion oder Anforderung geeignet sind, sondern auch versteckte, nicht auf den ersten Blick erkennbare, zur Funktionserfüllung geeignete Eigenschaften und Merkmale des Werkstoffs zu erkennen.

**Abbildung 3** zeigt eine funktionale Klassifizierung zur Beschreibung von Werkstoffen.

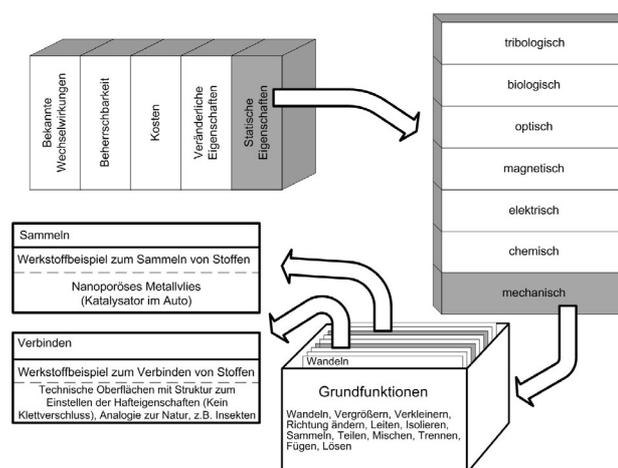


Es entsteht ein System, welches es dem Konstrukteur ermöglicht, für die zu erfüllenden Grundfunktionen bzw. die formulierten Ziele des zu entwickelnden Systems methodisch Werkstoffe mit geeigneten Eigenschaften auszuwählen (**Abbildung 4**).

**Abbildung 3:** Klassifizierung der Werkstoffeigenschaften /2/

Eine Werkstoffanalyse setzt ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit der Fachbereiche Konstruktion, Technologie und Werkstoffe voraus. Problematisch für den Konstrukteur ist insbesondere die Kenntnis der komplexen Werkstoffeigenschaften sowie deren Verfügbarkeit. Um dem Konstrukteur das Wissen bereitzustellen und Produktlösungen planmäßig und nicht zufällig generieren zu können, empfiehlt sich eine Konzeption von Katalogen, die die Zielbestimmung und Lösungsfindung unterstützen. In diesen Katalogen werden die Werkstoffeigenschaften beispielsweise nach Grundfunktionen geordnet. Ausgehend von einer technisch zu realisierenden Funktion beginnt die Lösungssuche bei der entsprechenden Grundfunktion und führt zur relevanten Struktur.

Dafür werden die Werkstoffe zunächst nach statischen Eigenschaften, veränderlichen Eigenschaften etc. kategorisiert. Anschließend erfolgt eine Ein-



**Abbildung 4:** System für werkstoffbezogene Grundfunktionen

#### 4 Prinzipverstärkende Technologie

Eine Integration der Fertigungstechnologie in den Konstruktions- bzw. Lösungsfindungsprozess ist notwendig, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu verstärken und auszuweiten. Diese Integration kann dazu führen, dass bestehende Prinzipien verstärkt werden. Weiterhin ist es möglich, dass durch den Einsatz einer geeigneten Technologie eine Werkstoffeigenschaft zur Funktionserfüllung erst bedingt wird.

Am Beispiel des Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling wird deutlich, wie die Integration der Fertigungs- und Herstellungstechnologien in den Lösungsfindungsprozess dazu beiträgt, Werkstoffe gezielt dahingehend zu verändern, dass sie als Funktionsträger verwendet werden können. Formen für die Herstellung von Faserverbund-Bauteilen die mit Hilfe des Rapid Toolings gefertigt werden weisen eine herstellungsbedingte Porosität auf (durch die Korngröße des verwendeten Pulvers). Aufgrund dieser Porosität kann die Luft beim Pressen der Bauteile durch die Formen hindurch entweichen und muss nicht abgesaugt werden.

Ein möglicher Ansatz durch die Kombination von Werkstoffen und Fertigungstechnologien einen neuen Lösungsansatz zu finden ist, die bekannten Grundfunktionen zunächst in Verfahren die zur Erfüllung der Funktion dienen zu unterteilen (z.B. Trennen von Stoffen: Filtrieren, Zentrifugieren, Sieben, Extrahieren usw.). Die Verfahren werden jeweils mit einer „Tabelle“ belegt, in welcher verschiedene Werkstoffe und Fertigungstechnologien aufgeführt sind. Durch methodisches Abarbeiten der „Tabelle“ werden Kombinationen aus Werkstoff und Fertigungsverfahren gesucht und gefunden, welche dazu beitragen die jeweiligen Verfahren zur Erfüllung der Grundfunktion zu realisieren

Beispielsweise wird es durch das Verfahren des Rapid Prototyping möglich, aus Metall- oder Kunststoffpulver Bauteile mit variabler Porosität herzustellen, welche zur Filtration verwendet werden können, ohne dass eine weitere Bearbeitung notwendig wird. Das Metallpulver allein betrachtet bringt keinen bedeutenden Fortschritt in der Lösungssuche, erst durch eine geeignete Technologie kann eine innovative Lösung entwickelt werden.

Es ist notwendig, dass den Konstrukteuren das Wissen über Werkstoffe und Fertigungstechnologien bereits in einer frühen Phase des Konstruktionsprozesses bereitgestellt wird, um es nachhaltig in die Produktentstehung einfließen lassen zu kön-

nen. Die Informationen über Werkstoffe, Technologien usw. sollten in Datenbanken hinterlegt und mit Abfrage- und Auswahlmöglichkeiten dem Konstrukteur handhabbar gemacht werden.

Weitere Beispiele, wie durch geeignete Fertigungstechnologien die Eigenschaften eines Werkstoffes verändert werden können oder ein Einsatz bedingt wird sind beispielsweise:

**Kugelstrahlen:** Druckeigenspannungen im Werkstück → Dauerfestigkeit wird steigern

**Wärmebehandlungen:** Erhöhung der Festigkeitskennwerte

**Innenhochdruckumformen/-fügen:** Eigenschaftsänderung durch Plastifizieren

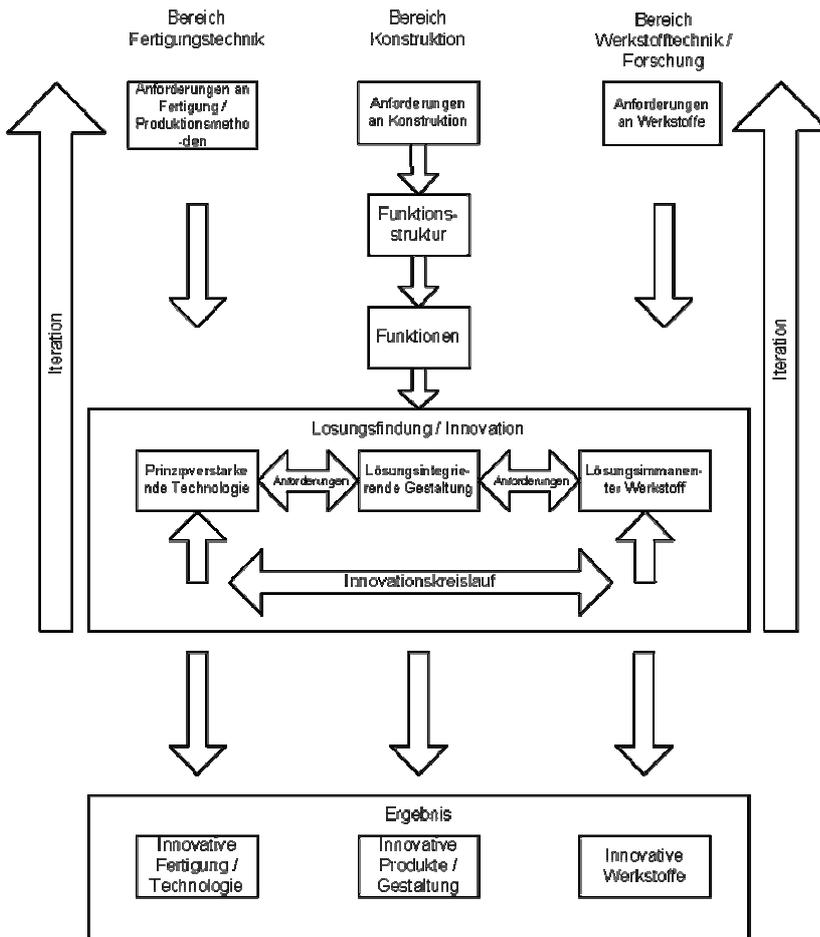
**Oberflächenbeschichtung:** Eigenschaften der Oberflächen werden verbessert z.B. Verschleißschutz.

#### 5 Lösungsintegrierende Gestaltung

Um einen ganzheitlichen Zusammenhang zu schaffen, muss auch die Gestaltung in die Lösungsfindung integriert werden, da in vielen Bereichen für die Anwendung einer Technologie eine dementsprechende Gestaltung der herzustellenden Bauteile notwendig ist.

Innovative, lösungsimmanente Werkstoffe führen auch in der Gestaltung der Produkte zu erhöhten Anforderungen, da herkömmliche Gestaltungsregeln das Potenzial der Werkstoffeigenschaften in der Regel nicht oder nur unzureichend ausnutzen. In bisherigen Konstruktionen wird der Werkstoff oft solange iterativ der Konstruktion angepasst und dimensioniert, bis die Anforderungen an das Produkt erfüllt werden. Innovative Werkstoffe stellen jedoch Anforderungen an die Gestaltung, die ihre aktive Funktion erst bedingen, so dass Werkstoffanalyse und Gestaltung in enger Wechselwirkung zueinander stehen. Der Konstrukteur muss diese teils widersprüchlichen Anforderungen erkennen und umsetzen.

Das bereits genannte Verfahren des Rapid Prototyping stellt auch zur Verdeutlichung der notwendigen Interdisziplinärität von allen drei Fachbereichen (Konstruktion, Werkstoff und Technologie) ein geeignetes Beispiel dar. Um mit Hilfe des Rapid Prototyping ein innovatives und erfolgreiches Produkt zu entwickeln, muss bereits in der Konstruktion auf eine Rapid Prototyping-gerechte Gestaltung des Produktes geachtet werden, da ansonsten Probleme bei der Herstellung entstehen können. Details



**Abbildung 5:** Innovationsprozess durch lösungsimmanente Werkstoffe /2/

zur Rapid Prototyping-gerechten Gestaltung eines Produktes sind u. a. /3/ zu entnehmen.

## 6 Innovationsprozess

Durch die Berücksichtigung aller Disziplinen und durch die Anwendung lösungsimmanenter Werkstoffe wird es möglich, einen Innovationskreislauf zu schaffen, aus dem neue, innovative und den heutigen Marktanforderungen entsprechende Produkte entstehen. Innovative Produkte entstehen nicht zwangsläufig aus neuen Technologien, Werkstoffen oder Erkenntnissen. Erst die Kombination und Integration aller beteiligten Disziplinen und ihrer Erkenntnisse führt zu verwertbaren Neuerungen. Es ist dabei nicht ausreichend, dass den jeweiligen Bereichen fachliche Informationen zur Verfügung gestellt werden. Vielmehr ist es erforderlich, dass gezielte Anforderungen ausgetauscht und gemeinsam erarbeitet und die Gestaltung, Werkstoffwissenschaften und Fertigung als Einheit, das heißt ganzheitlich betrachtet werden. Die Suche

nach lösungsimmanenten Werkstoffen führt idealer Weise zu einem sich selbst verstärkenden Kreislauf sich gegenseitig bedingender Innovationen und Inventionen (**Abbildung 5**).

## 7 Zusammenfassung

Es wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, die es bereits in der Konzeptionsphase des Konstruktionsprozesses ermöglicht, den Werkstoff mit in die Lösungsfindung einzubeziehen. Vorgehensweisen zur Analyse und Strukturierung von lösungsimmanenten Werkstoffen wurden entwickelt, sowie ein Modell dargestellt, welches dazu dienen kann Grundfunktionen auf Werkstoffe abzubilden. Auch die Fachbereiche Technologie und Gestaltung wurden näher betrachtet, da die Entwicklung neuer und innovativer Produkte nicht allein durch die Untersuchung und Einbeziehung von Werkstoffen in den Konstruktionsprozess durchgeführt werden kann.

Das interdisziplinäre Zusammenspiel führt zu einer Erhöhung des Innovationspotenzials der Produkte zu einem Innovationskreislauf.

## 8 Literatur

- /1/ Kruse, P.: Anforderungen in der interdisziplinären Systementwicklung: Erfassung, Aufbereitung, Bereitstellung. Dissertation, TU Clausthal, 1995
- /2/ Korte, T.: Funktionale Werkstoffe im Konstruktionsprozess. Unveröffentlichte Studienarbeit, IMW, TU Clausthal, 2003
- /3/ Klemp, E.: Unterstützung des Konstrukteurs bei der Gestaltung von Spritzgussbauteilen hergestellt im Rapid Prototyping und Rapid Tooling Verfahren. Dissertation, TU Clausthal, 2002

## I\*PROMS: Innovative Production Machines and Systems

Rolshofen, W.; Soroka, A.; Eldukhri, E.; Müller, D.

*Das Institut für Maschinenwesen (IMW) ist stellvertretend für die Technische Universität Clausthal (TUC) Mitglied im Europäischen Exzellenznetzwerk Innovative Produktionsmaschinen und Systeme (I\*PROMS). Dort arbeiten 30 Partner aus 14 Ländern an Forschungsaufgaben der Fertigung und Produktion. Die Vision einer wissensbasierten Fabrik der Zukunft wird in vier unterschiedlichen Teilgruppen (Cluster) untersucht. Außerdem wird die Möglichkeit der Teilnahme an den Forschungsaktivitäten vorgestellt.*

*Manufacturing is important to the European Union. Solving problems of fragmentation and lack of coordination of research concerning manufacturing within the EU, the Commission of the European Community has adopted Networks of Excellence (NoEs) as an instrument for promoting integration in its Sixth Framework Programme. One of this NoEs is called I\*PROMS-Innovative Production Machines and Systems. It aims to address many of the challenges facing the manufacturing sector in the 21st century. The paper discusses the strategy this NoE is pursuing to achieve.*

### 1 Introduction

Manufacturing in the EU is increasingly being challenged by global competition /1/. Experts acknowledge that, for the EU to attain and sustain a leading role in the global market, radical measures are necessary to stimulate restructuring of the European Research Area and closer collaboration in manufacturing research. The newly enlarged EU comprises over 25 million enterprises employing more than 120 million people. The number of manufacturing businesses is calculated as being about 10% of this total, i.e. some 2.5 million /1/. European manufacturing activity today represents approximately 22 % of the EU GDP and 18-20% of the workforce.

An interesting characteristic of European enterprises is that the majority of them are SMEs, with 93% being micro-enterprises employing fewer than 20 people. Such a characteristic can be positive in relation to opportunities, as SMEs tend to be more flexible in operation and innovative in nature, but

can also be a weakness. For instance, micro enterprises have smaller export impacts: SMEs export only 13% of turnover, whereas large enterprises gain 21% of their total turnover from abroad. Furthermore, SMEs are more concerned with short-term 'fire-fighting' rather than longer-term RTD commitments /1/. However, as SMEs are at the very heart of manufacturing within the European Union, it is essential that they participate in research or at least that the results of RTD activities are passed onto them so the full benefit to the EU economy can be derived.

In most sectors, global comparisons show that European manufacturing industry continues to be successful in maintaining its leadership. However, this position is challenged on two fronts. On the one hand, EU industry faces continuing competition from other developed economies, particularly in the high-technology sector. On the other hand, low-wage economies are increasingly threatening the more traditional manufacturing sectors /1/.

The European manufacturing sector has strengths that it needs to build upon. In many respects, industry throughout Europe is modern and competitive and most sectors have made significant efforts to upgrade their production infrastructures and integrate new forms of organisation /1/. However, European industry cannot afford to be complacent and needs to adapt its production systems and methodologies to meet the challenges of the 21st century.

Europe has embraced the sustainable development dimension with significant investments in environmental protection, clean technologies and environmentally friendly production processes having led to new manufacturing and consumption paradigms. This could give a strong impetus to EU industries, offering the potential to expand and/or create new markets /1/.

Advanced manufacturing research holds the key to the future competitiveness of Europe. European industry needs to concentrate on innovation, high technology, high-value adding processes and high knowledge-content products to maximise its future potential.

However, research investment in the EU is considered to be too low. These raises many potential problems linked to the sustainable competitiveness of the European manufacturing sector in a complex and globalise environment /1/. Significant investment in relevant research would help to sustain not only competitiveness but also employment. Evidence of this comes from the Netherlands where, between 1994 and 1998, 8% of fast-expanding firms created 60% of employment growth /2/.

Research within the EU also has a tendency to be highly fragmented with research being conducted by thousands of organisations with little coordination and with duplication of resources and efforts. This is compounded by duplication of funding for research at regional, national and EU levels.

## 2 Networks of Excellence (NoE)

Networks of Excellence (NoEs) are a new 'instrument' introduced to FP6 by the European Commission. NoEs are aimed primarily at overcoming fragmentation of European research. The main deliverable of a NoE is durable structuring and shaping of the way that research in Europe is carried out on particular topic /3/.

NoEs are designed to strengthen scientific and technological research excellence in particular subjects in a cost-effective way. Through integration,

NoEs can eliminate duplication of efforts and maximise resource utilisation. This is to be achieved by assembling at the European level the critical mass of human and material capital needed to provide European leadership in the chosen spheres of activity. Central to a NoE is a joint work programme aimed principally at creating progressive and long-term integration of the research capacities of the network members. At the same time, the programme also includes joint research activities to advance the state-of-the-art in the particular field.

The sizes of NoEs can vary. However, they are all characterised by being virtual centres of excellence with strong governance. Their common driving factor is to pursue ambitious research objectives and mobilise the resources needed to achieve their targets and to meet the primary goal of integrating research within the European Union. In addition, part of their mission is also to spread excellence well beyond their own boundaries.

This paper outlines a Network as example of FP6 NoEs designed to help integrate research in advanced manufacturing in the EU. The Innovative Production Machines and Systems (I\*PROMS) NoE is an umbrella network covering the whole area of knowledge-based production technology and organisation, an area critical to manufacturing competitiveness.

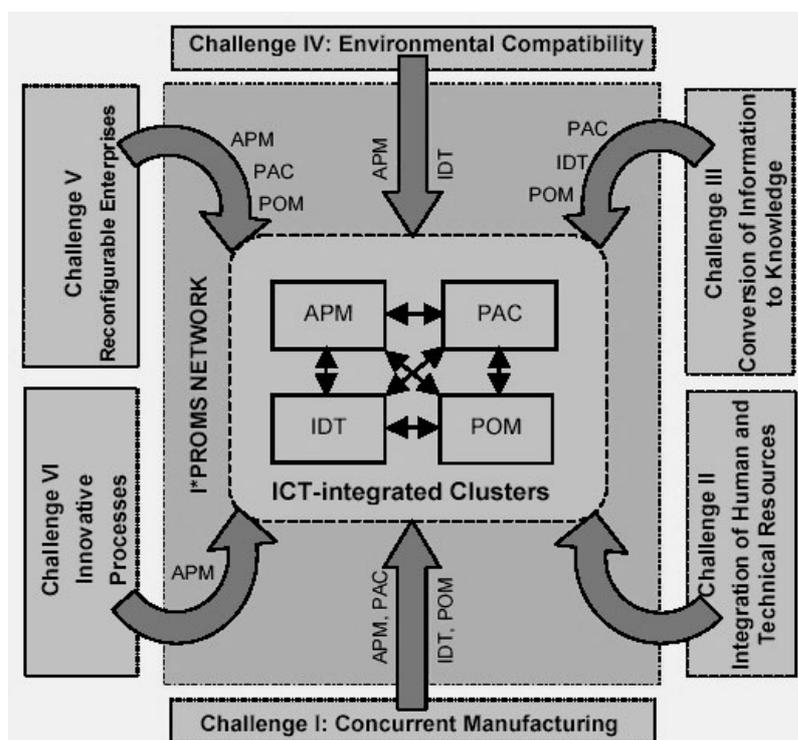


Fig. 1: I\*PROMS and the Six Manufacturing Challenges /6/.

### 3 Innovative Production Machines and Systems (\*PROMS)

I\*PROMS NoE integrates the activities of 30 like-minded research institutions and companies in the field of production research from 14 European countries. It seeks to achieve the goal of strengthening the European research base in the umbrella area of Innovative Production Machines and Systems. Like other FP6 NoEs, I\*PROMS focuses on integration but also includes joint research and dissemination activities to advance the re-search frontier in the area and spread excellence widely.

#### 3.1 Research Challenges

Addressing the NMP (Nanotechnologies and Nanosciences, Knowledge-based Multifunctional Materials and New Production Processes and Devices) thematic area /4/, I\*PROMS aims to facilitate the development of common concepts, tools and techniques enabling the creation and operation of flexible, re-configurable, fault-tolerant and eco- and user-friendly production systems that can react to changing customer needs, environmental requirements, design inputs and material, process and labour availability to manufacture high quality, cost-effective products.

I\*PROMS will address the six 'Visionary Manufacturing Challenges for 2020' published by the National Academy of Sciences /5, 6, 7/, namely,

- Concurrent Manufacturing,
- Integration of Human and Technical Resources,
- Conversion of Information to Knowledge,
- Environmental Compatibility,
- Re-configurable Enterprises,
- Innovative Manufacturing Processes and Products.

Research on the above challenges will be pursued by four interconnected research clusters (s. Fig. 1): Advanced Production Machines (APM), Production Automation and Control (PAC), Innovative Design Technology (IDT) and Production Organisation and Management (POM).

The APM cluster is concerned with machines for processing new/nano/smart/high-performance materials, micro-manufacture machines, rapid manufacturing machines, and manufacturing robots. The PAC cluster includes self-adaptive control, flexible/re-configurable manufacturing, adaptive quality systems, agent-based distributed architectures, (machine) knowledge management, and human-machine interaction. IDT relates to the designers of the factory and products of the future, designing the innovative, customisable, value-added products of the future, and the factory machines and systems required to produce them. POM represents the management of the factory of the future. It includes advanced process control, enterprise and manufacturing simulation, (human) knowledge management

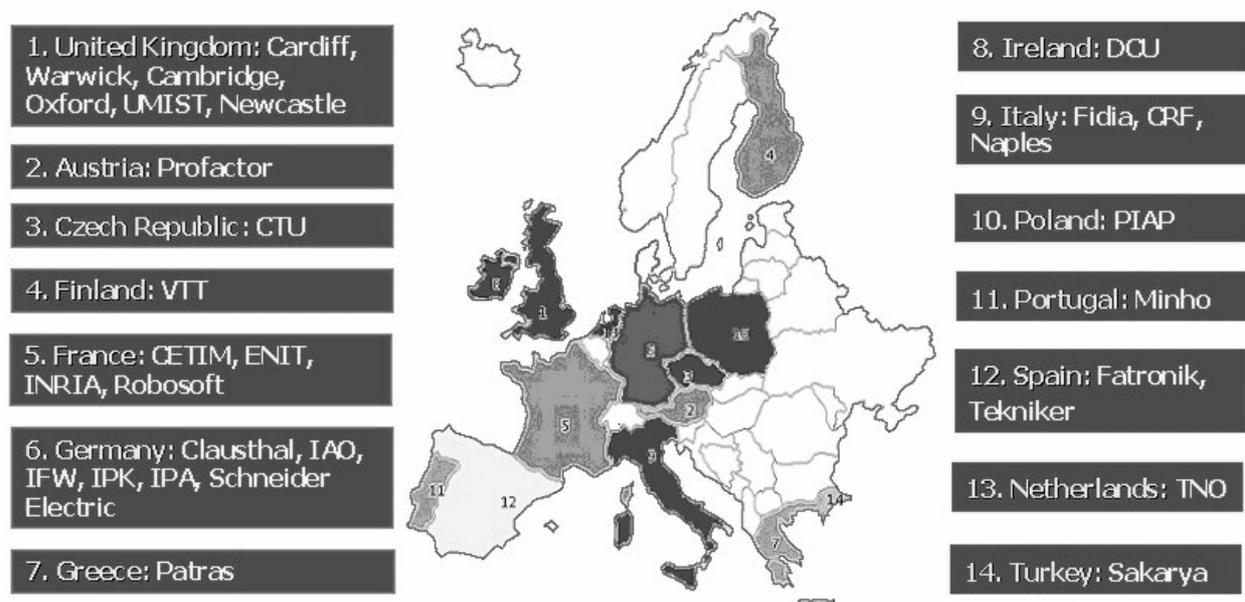


Fig. 2: Core team from different expertise inside Europe.

and human-computer interaction at the organisational, enterprise level.

### 3.2 Activities

Under I\*PROMS umbrella the four research clusters will undertake the following activities:

- Integration, I\*PROMS aims to integrate its operations within 5 years to become a globally recognised and industrially effective Virtual Centre of Excellence, with its own management structure and vision for delivering increased competitiveness and value for manufacturing.
- Joint Research Activities, I\*PROMS's jointly executed research will address the six Manufacturing Challenges for 2020 /8/ through the above mentioned I\*PROMS clusters - achieved through collaborative research.
- Spreading of Excellence, I\*PROMS will exploit results produced through its activities, disseminating knowledge, both to those outside and inside the net-work.
- First Virtual International Conference /9/ on Intelligent Production Machines and Systems was held in July 2005. This activity was organised in a way that participants can meet and discuss themes of common interest through the use of communication tools at a central location on the Internet.

### 4 Possible Opportunities

With this NoE, enterprises interested in the field of innovative production machines and systems (as well as universities) can be connected through associate membership of the NoE. This allows co-operation and new research assignments with some of the thirty core partners (s. Fig. 2) supported by the European Commission. Moreover, through this partnership every activity in I\*PROMS NoE can be benefited from, first access to published documents about results is available and international scientific relations with experts can be established. Therefore, I\*PROMS can be considered a platform for everybody who attaches importance to future tasks in European manufacturing /10, 11/.

### 5 Acknowledgement

The Innovative Production Machines and Systems (I\*PROMS) Network of Excellence FP6-500273-2 is

funded by the European Commission under the Sixth Framework Programme. The authors would like to thank the Commission and the partners of I\*PROMS Network of Excellence for their contributions and support.

### 6 References

- /1/ European Manufacturing of the Future, Role of research and education for European leadership, Manufacture 2003 conference, Milan, Italy 1-2 December 2003
- /2/ Entrepreneurship in the Netherlands, Innovative entrepreneurship, New policy challenge, Ministry of Economic Affairs and EIM, February 2002
- /3/ Provisions for implementing networks of excellence: Background document, European Commission, 12 May 2003
- /4/ Integrating and strengthening the European Research Area, Thematic Area 3 Nanotechnology and nanosciences, knowledge-based multifunctional materials, new production processes and devices Work Programme, European Commission, December 2003
- /5/ Visionary Research Challenges for 2020, Committee on Visionary Manufacturing Challenges, Board on Manufacturing and Engineering Design, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, National Academy of Sciences, 1998
- /6/ Pham, D. T., Eldukhri, E. E., Setchi, R., Soroka, A., Packianather, M. S., Thomas, A., Dadam, Y. and S. Dimov: Integrating European advanced manufacturing research: The FP6 I\*PROMS Network of Excellence, Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. INDIN 2005, Berlin, pp 543-548.
- /7/ Pham D.T., Eldukhri E.E., Setchi R., Soroka A.J., Packianather M.S., Thomas A., Dadam Y., Dimov S. Integrating European Advanced Manufacturing Research: The FP6 I\*PROMS Network of Excellence. Intelligent Computation in Manufacturing Engineering 4, 2004
- /8/ [www.iproms.org](http://www.iproms.org)
- /9/ <http://conference.iproms.org>
- /10/ Düsing, C., Grünendick, T., Müller, D., Rolshofen, W.: Institutsmittellung Nr. 29, IMW Clausthal 2004
- /11/ Grünendick, T., Müller, D. and W. Rolshofen: Die Fabrik der Zukunft- ein europäisches Netzwerk, TU Contact, 16, May 2005

# Drehmomentmessungen an Wellensträngen mit Kreuzgelenkwellen

Ring, C.; Schäfer, G.

*Kreuz-Gelenkwellen (auch Kardan-Gelenkwellen) sind häufig verwendete Kupplungen zum Ausgleich eines axialen und winkligen Wellenversatzes. Soll das Drehmoment an einem Wellenstrang gemessen werden, in den eine Kreuzgelenkwelle integriert ist, bedarf die Vorgehensweise bei Messung in mitten der Gelenkwelle aufgrund des nichtlinearen Übertragungsverhaltens eines Kreuzgelenkes einiger Überlegung.*

*Cardan Shafts are commonly applied as couplings to adjust axial and angular offsets. Torque measurements demand in some cases more consideration because of the non-linear transmission behaviour of cardan couplings.*

## 1 Gelenkwellen

Gelenkwellen werden zur Übertragung von Drehmomenten verwendet, wenn gleichzeitig eine Winkel- und/oder Abstandsänderung zwischen der An- und Abtriebsseite gewährleistet sein muss. Gelenkwellen lassen sich nach /1/ in Kreuz-, Kugel- und Podegelenkwellen einteilen. Trotz der kinematischen Nachteile einer ungleichförmigen Übertragung des Drehmomentes bei Verwendung eines Kreuzgelenkes gegenüber der gleichförmigen Übertragung bei Kugel- oder Gleichlaufgelenkwellen, werden Kreuzgelenkwellen als höchst zuverlässige Maschinenelemente eingesetzt. Aufgrund einfacher Bauweise und somit kostengünstiger Fertigung sind sie weit verbreitet und werden bis zu höchsten Drehzahlen und Drehmomenten verwendet. Eine hohe Auswuchtgüte erlaubt dabei eine größere An-

näherung der zulässigen Drehzahl an die biegekritische Drehzahl.

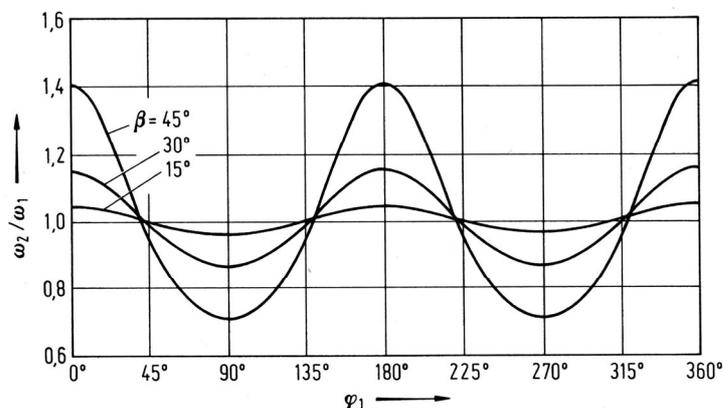
Als Besonderheit der Kreuzgelenkwelle ist die im Mittelteil überlagerte Drehschwingung aus den abgebeugten Kreuzgelenken zu nennen. Diese Drehschwingung ist exakt beschreibbar. Untersuchungen hierzu lassen sich beispielsweise in /2/ finden. Ein Maß für die eingprägten Drehschwingungen ist das Übersetzungsverhältnis der Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  mit

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \sin^2 \varphi_1}$$

wobei  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Motorseite bzw. die Winkelgeschwindigkeit des Mittelteils,  $\varphi$  den Drehwinkel der Antriebsseite und  $\beta$  den Beugewinkel beschreibt. Grafisch ist dieser Zusammenhang in **Bild 1** dargestellt.

## 2 Auswahl des rotierenden Aufnehmers

Die Messung des Drehmoments an Wellensträngen, in die eine Kreuzgelenkwelle integriert ist geschieht meistens unter beengten Platzverhältnissen. Zu berücksichtigen ist bei der Anbringung eines zusätzlichen Bauteiles in Form eines Messaufnehmers der benötigte Bauraum sowie eine eventuelle Längenänderung bei Gelenkwellen mit Längenausgleich während des Betriebes, da die zusammen geschobene Länge nicht unterschritten und die maximal zulässige Betriebslänge nicht überschritten werden darf. Da in der Mehrzahl der Untersuchungen eine Messung an umlaufenden



**Bild 1:** Verlauf der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_2$  für Beugungswinkel  $\beta = 15^\circ, 30^\circ$  und  $45^\circ$  /1/

Maschinenteilen mit höheren Drehzahlen erfolgt, konzentriert man sich auf elektrische Messeinrichtungen für die Übertragung der Messsignale von der drehenden Welle auf einen stationären Teil. Dies sollte einerseits mit hoher Zuverlässigkeit, andererseits mit möglichst geringem Aufwand erfolgen. Bei der Auswahl geeigneter Aufnehmer sind Fragen hinsichtlich der Montage des Aufnehmers, Einsatzbedingungen, Überlastbarkeit, Messprinzip und Messgenauigkeit zu beachten. Soll das durch eine Kreuzgelenkwelle übertragene Drehmoment gemessen werden, bietet sich grundsätzlich eine einfach realisierba-

re Möglichkeit der elektrischen Sensorapplikation durch die Verwendung eines DMS-Aufnehmers mit zylindrischem Messkörper, Verdrillung der Oberfläche und Erfassung durch Dehnungsmessstreifen (DMS) an, wobei die DMS in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Längsachse appliziert sind.

Fußausführung Wellenausführung Messflansch



**Bild 1:** Bauformen rotierender DMS-Drehmomentsensoren /4/

Die Übertragung von Brückenspannung und Ausgangssignal wird durch Schleifringe oder kontaktlose (meist induktive) Übertragung realisiert (**Bild 2**). Für die Messaufgabe im vorliegenden Fall standen mehrere Möglichkeiten der Realisierung zur Auswahl:

a) Drehmomentmessung mit Hilfe von DMS und der Verwendung einer Telemetrie

Ohne großen Eingriff in das Gesamtsystem der Gelenkwelle und der anschließenden Komponenten wäre die Applikation eines Torsions-DMS mit zwei unter  $\pm 45^\circ$  gegen die Hauptachse angeordneten Messgittern zur Bestimmung der Torsionsspannungen, kleinem Messverstärker als Blackbox, eventuell direkt kombiniert mit einer Telemetrie als kostengünstige Lösung zu nennen. Vorteilhaft ist diese Vorgehensweise, wenn ein Zwischenkuppeln eines Drehmomentaufnehmers beispielsweise aufgrund sehr beengten Platzverhältnissen nicht möglich ist. Als Nachteil ist bei dieser Methode der notwendige Abgleich mit einem Referenzempfänger, und die auf der Oberfläche der Gelenkwelle angebrachte Elektronik (Messaufbau und Telemetrie)

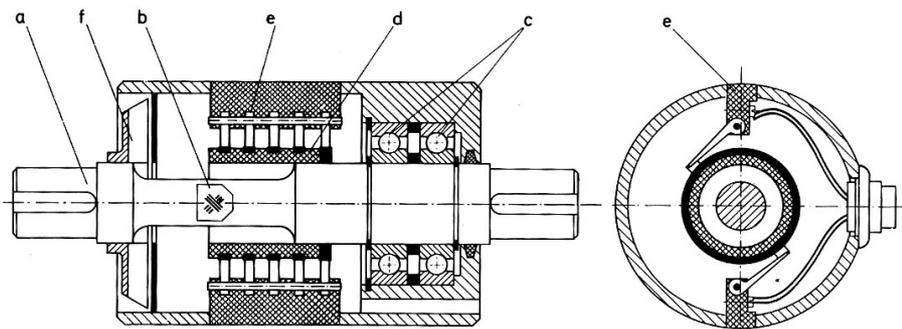
wirkenden Fliehkräfte und Stöße zu berücksichtigen. Ein solcher Aufnehmer in Eigenbauweise kann bezüglich geforderter Genauigkeiten und Unempfindlichkeiten gegen sonstige Störgrößen dem Vergleich mit industriellen Drehmomentaufnehmern nicht immer standhalten.

b) DMS-Drehmomentaufnehmer in Flanschbauweise

Ist die Montage eines zusätzlichen Bauteiles zwischen der Gelenkwelle und dem Anschlussbauteil möglich, eignet sich ein DMS-Drehmomentaufnehmer in Flanschbauweise. Bevorzugt verwendet man hier Messwellen mit schleifringloser Übertragung, wobei die von einem stationären Generator (Stator) induzierte Wechselspannung induktiv auf den Messkörper übertragen wird. Durch die Umformung in eine Gleichspannung erfolgt die Speisung der DMS. Das Messsignal wird in eine modulierte Pulsfrequenz umgewandelt und kapazitiv auf den Stator übertragen. Vorteil dieser Vorgehensweise ist der verschleiß- und wartungsfreie Betrieb dieser Übertragungsart. Probleme können der zusätzlich benötigte Bauraum des Aufnehmers und die Anbringung des Stators bereiten. Gerade bei Getriebegehäusen mit Rundungen und Freiformflächen und unter Zeitdruck durchzuführenden Versuchen im Feld ist die sichere Befestigung des Stators nur mit großem Aufwand zu bewerkstelligen.

c) Messwelle im Mittelteil der Gelenkwelle in Fuß- oder Wellenausführung

Drehmomentaufnehmer mit Schleifringübertrager, wie er von der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH im Modell T1 angeboten wurde (**Bild 3**), sind über Passfederverbindungen für eine Integration in Wellenstränge geeignet. Die Speisespannungs- und Messsignalübertragung erfolgt mittels fünf



Prinzipbild eines Drehmomentaufnehmers mit Schleifringen  
(Bauart Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH)

a Meßwelle

b Dehnungsmessstreifen (je 2 Stück in plus/minus  $45^\circ$ -Richtung)

c Gehäuse mit einseitiger Kugellagerung

d Schleifringsatz

e Schleifbürstensätze

f Ventilator

**Bild 3:** Drehmomentaufnehmer mit Schleifringübertragung /3/

Hartsilberschleifringen mit Silbergraphitkohlebürsten.

In einem konkreten Messeinsatz waren dem IMW Randbedingungen mit Stößen bis zu 50 g, Drehzahlen bis zu  $2000 \text{ min}^{-1}$  und zu messende Drehmomente bis zu 7000 Nm vorgegeben. Für einen

solch anspruchsvollen Feldeinsatz fiel die Wahl auf die unkonventionelle Lösung, einen solchen Aufnehmer in eine entsprechend gekürzte Gelenkwelle zu adaptieren. Da das Messsignal des Drehmomentes im Mittelteil der Gelenkwelle aufgezeichnet wird, sind in diesem Signal somit die kreuzgelenkwellentypischen asynchronen bzw. nicht homokinetischen Schwingungen enthalten. Was in der Praxis störend erscheint, bzw. mit Rechenaufwand erst wieder linearisiert werden muss, ist für grundsätzliche Untersuchungen am Maschinenelement „Kreuzgelenkwelle“ wissenschaftlich interessant. Die mit diesem Schleifringübertrager durchgeführten Messungen wurden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. **Bild 4** zeigt ausschnittsweise mit dieser Methode aufgezeichnetes Signal.

Gemeinsam ist allen vorgestellten Messmethoden die Gefahr der Überlastung des Aufnehmers. Das mittlere Drehmoment, das sich aus Torsionsimpulsen zusammensetzt, ist je nach dem verwendeten Drehmomenterzeuger pulsierend, da beispielsweise oft unter Verwendung von Gelenkwellen eine Koppelung mit Verbrennungsmotoren realisiert wird. Zudem bildet die zu untersuchende Anlage ein schwingungsfähiges System, bei dem Torsionsschwingungen auftreten können. Beim Durchlaufen von Resonanzen können die auftretenden Spitzenwerte ein Mehrfaches des mittleren Momentes erreichen. Die Auslegung eines Messaufnehmers sollte daher nach den auftretenden Drehmomentspitzen erfolgen, zumal mit dem Einbau eines zu-

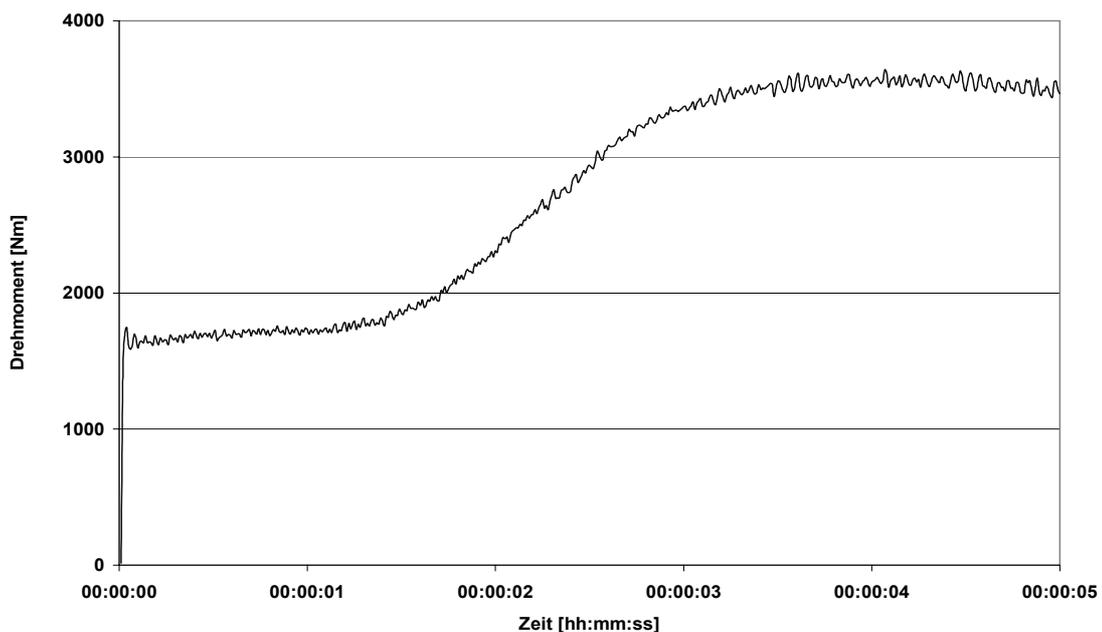
sätzlichen Bauteiles in eine Gelenkwelle eine Veränderung des Schwingungsverhaltens der Gesamtanlage einhergeht.

### 3 Messwerterfassung

Eine praktikable und zuverlässige Datenerfassung spielt gerade bei nicht wiederholbaren Messungen eine gewichtige Rolle. Die Aufzeichnung der Messwerte kann durch einen Messverstärker und dessen Bedien- und Erfassungssoftware oder durch eine separate Messwerterfassung erfolgen. Im konkreten Einsatzfall der vom IMW gebauten Messgelenkwelle kam ein Messverstärker Picas der Firma Peekel zum Einsatz, der über die Software SignalSoft bedient wurde und die gleichzeitig eine Speicherung der Messwerte sicherstellte. Für eine redundante Datenspeicherung wurde das analoge Ausgangssignal des Messverstärkers jedoch direkt an eine Messwerterfassungskarte weitergegeben, die über PCMCIA an einen Laptop angeschlossen war. Mit Hilfe von LabView von National Instruments wurden die Daten sequentiell gespeichert. Zur nachträglichen Synchronisation der aufgezeichneten Messwerte mit weiteren von diesem Messaufbau unabhängigen Messsystemen wurden weitere Signale z.B. in Form von Drehzahlsignalen an die Messwerterfassungskarte geliefert und aufgezeichnet.

### 4 Auswertung der Messergebnisse

Bei der Aufzeichnung von Messwerten mit 100 Hz über mehrere Stunden kontinuierlich hinweg, fällt ei-



**Bild 4:** Drehzahlsignal an der Zwischenwelle (Aufzeichnung mit 100 Hz)



**Bild 5:** IMC Cronos PL2 /5/

ne große Datenmenge an, die es im Anschluss an die Messungen auszuwerten gilt. Häufig eingesetzte Software zur Tabellenkalkulation, mit der scheinbar problemlos eine Auswertung beispielsweise in Form der Erstellung von Diagrammen vorgenommen werden kann, ist nicht nur fehleranfällig hinsichtlich der Genauigkeit, sondern auch aufgrund der Fülle an Daten nicht zweckmäßig einsetzbar, da je nach verwendeter Software eine Begrenzung zur Erstellung von Diagrammen auf eine maximale Anzahl von Zeilen vorliegen kann. Dies entspricht zeitlich gerade einmal der grafischen Darstellung von wenigen Minuten bei 100 Hz Aufzeichnungsfrequenz. Mit professionelleren Hilfsmitteln wie dem am IMW eingesetzten MathLab ist eine bequeme und genaue Auswertung durchführbar. Alternativ verwendbar ist ebenso moderne integrierte Software, die entweder von Messwerterfassungsspezialisten oder Messverstärkerhersteller angeboten wird. Zur Aufzeichnung von Messsignalen mit Hilfe der am IMW vorhandenen Messtechnik sowie externer Signale und deren anschließender Auswertung steht Hardware von National Instruments in Verbindung mit den Softwarepaketen LabVIEW 8 und DIAdem zur Verfügung. Diese Kombination erlaubt auch den gleichzeitigen Einsatz unterschiedlicher Messverstärkerarten und -generationen.

Die neueste Anschaffung des IMW auf dem Gebiet der integrierten Messwerterfassung bilden zwei Cronos PL2 der Firma IMC aus Berlin (**Bild 5**). Diese Universalverstärker mit je 8 Kanälen sind in der Lage DMS-Signale, Spannung, Strom und ICP-Sensoren zu erfassen. Gerade für den Einsatz der Messgelenkwelle bieten diese Verstärker die Möglichkeit alle anfallenden Signalarten wie Beschleunigungen, externe Spannungen, Temperaturen und das Drehmoment durch den Einsatz nur einer Hardware zu erfassen. Die integrierte Lösung von der Messwerterfassung bis hin zur Auswertung

stellt IMC durch die Software FAMOS 5.0 mit umfangreichen Funktionen der Signalanalyse sicher.

## 5 Zusammenfassung

Moderne Messtechnik erlaubt dem experimentell tätigen Ingenieur eine komfortable Datenerfassung und bequeme Auswertung der aufgezeichneten und oft immensen Datenmengen. Am IMW existieren verschiedene Messverstärkersysteme parallel, die beständig durch Anschaffung modernster Software und Messtechnik auf dem Laufenden gehalten werden. Dennoch wird auch auf altbewährte Technik zurückgegriffen, wie im vorliegenden Fall mit der T1 von HBM geschehen, da diese Bauteile aufgrund ihrer robusten Bauweise an Zuverlässigkeit kaum zu übertreffen sind.

„Upgrade“-Maßnahmen der vorhandenen Messgelenkwelle sind auch schon angedacht: Bei gleichzeitiger Montage eines zusätzlichen einfach zu montierenden Drehzahlfühlers erlaubt die Drehmomentmessung gleichzeitig die Bestimmung der übertragenen Leistung.

## 6 Literatur

- /1/ Graf v. Seherr-Thoss, H.-C.; Schmelz, F.; Aucktor, E.: Gelenke und Gelenkwellen. Berechnung, Gestaltung, Anwendungen. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2002
- /2/ Reuthe, W.; Untersuchungen von Kreuzgelenken auf ihre Bewegungsverhältnisse, Belastungsgrenzen und Reibungsverluste. Diss. TH Berlin, 1944
- /3/ Profos, P.; Pfeifer, T.: Handbuch der industriellen Messtechnik. 6. Auflage. München : R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1994
- /4/ Hoffmann, J.: Handbuch der Messtechnik 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2004
- /5/ imc Meßsysteme GmbH, [www.imc-berlin.de](http://www.imc-berlin.de)

## Berührbare Schnittstelle basierend auf Akustischer Holografie

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.

*Dieser Artikel beschreibt einen neuartigen Ansatz für die Entwicklung von berührbaren akustischen Schnittstellen basierend auf Akustischer Holografie. Außerdem werden der Hintergrund und die Ziele innerhalb des Europäischen Forschungsprojektes Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction (TAI-CHI), sowie das holografische Prinzip vorgestellt. Ein neues mobiles Testsystem wird für Experimente eingesetzt und erste Ergebnisse mit Hilfe des Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus sind verfügbar. Hierbei wurde das Berühren und Klopfen auf einen Schreibtisch aus Holz untersucht.*

*This paper describes a new approach to the development of tangible acoustic interfaces based on acoustic holography. The background and aim of the European Research Project Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction (TAI-CHI) is presented. Briefly, the holographic principle is explained. Mobile test equipment has been set up. New results of Rayleigh-Sommerfeld Algorithm are available and summarized in chapter outcome. The tapping and knocking on a wooden writing table were examined.*

### 1 Einführung

Kein anderes Sinnesorgan als die Augen befähigt den Menschen schnell neue Informationen aufzunehmen. Daher werden komplexe Abläufe graphisch dargestellt. Können akustische Quellen ähnlich wie optische Hologramme sichtbar gemacht werden?

Dieser Frage wird innerhalb des EU-Forschungsprojektes „Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction (TAI-CHI)“ /1/, /2/ erforscht. Zurzeit wird eine solche Methode entwickelt, welche in unterschiedliche Computeranwendungen des Konsortiums implementiert wird. Am Ende sollen neue Anwendungen für die Mensch-Maschine-Interaktion auf der Basis von akustischen Wellen verfügbar sein.

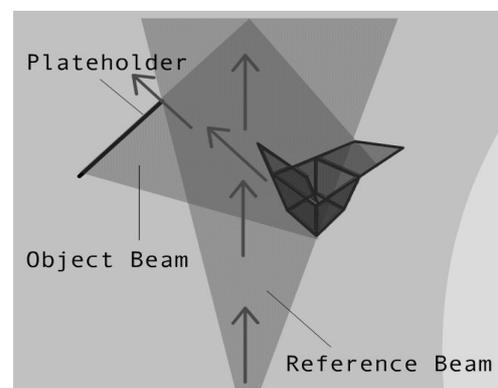
### 2 Die Methode

Das Projektziel ist eine berührbare, akustische Schnittstelle zu entwerfen, die eine akustische

Quelle aufgrund der Vibration eines Objektes nach dessen Berührung, Klopfen usw. erkennt.

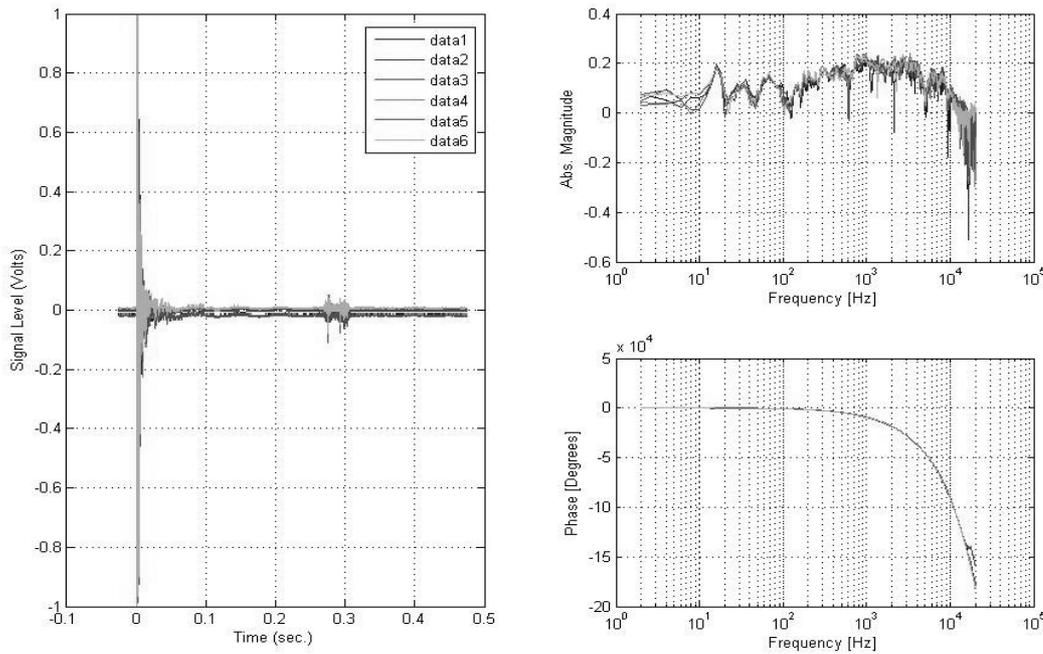
### 2.1 Prinzip der Holografie

Die Idee der optischen Holografie wurde zuerst von Gabor /3/ im Jahre 1948 formuliert. Doch es waren zahlreiche weitere Erfindungen notwendig (z.B. Laser) bis Gabors Prinzip experimentell nachgewiesen wurde. Eine holografische Abbildung entsteht durch die Aufnahme eines Hologramms und anschließend dessen räumlicher Rekonstruktion. Das bedeutet, wenn eine Wellenfront auf einen Objektpunkt trifft, dann bildet sich eine neue Welle nach dem Huygens-Fresnel-Prinzip aus. Diese wird Objekt-Welle genannt, im Gegensatz zu der vorher existierenden Referenzwelle. Eine Überlagerung beider Wellen kann beispielsweise durch eine Platte, die mit lichtempfindlichem Material beschichtet ist, aufgezeichnet werden. Hierbei sorgt die Überlagerung für Verstärkungen oder Auslöschungen des Lichts, aufgrund von Unterschiedlicher Phasenlage der beiden Wellen (s. **Bild 1**).



**Bild 1:** Überlagerung der Objekt- und Referenzwelle auf einer photosensitiven Platte, wo das optische Hologramm aufgezeichnet wird /4/.

Der große Vorteil von Holografie ist, dass Hologramme mit einem großen Informationsgehalt produziert werden können. Der Grund hierfür ist, dass ein dreidimensionales Wellenfeld aus einer zweidimensionalen Oberfläche, wie einer Fotoplatte, rekonstruiert werden kann, wenn die Phaseninformationen berücksichtigt werden /5/.



**Bild 2:** Auf der linken Seite sind das Signal der einzelnen Sensoren [Volt] gegen die Zeit [s] aufgetragen und auf die rechte Seite zeigt das Amplituden- und Phasenspektrum der aufgezeichneten Daten.

## 2.2 Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus

Die akustische Wellenausbreitung zwischen Hologramm- und Bildebene kann mit der folgenden Formel (1) berechnet und dargestellt werden, welche Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus genannt wird.

Eine solche Rechenvorschrift beschreibt die holografische Rekonstruktion [6] eines komplexen Wellenfeldes  $\tilde{\Psi}(x_B, z_B)$  mittels der Hologrammdaten  $\tilde{\Psi}(x_H, z_H)$ , wobei  $F$  die Fourier- und  $F^{-1}$  die Inversefourier-Transformation symbolisiert. Außerdem sind die räumlichen Koordinaten  $x$  und  $z$ , sowie die Wellenzahl  $k$  angegeben.

$$\tilde{\Psi}(x_B, z_B) = F^{-1} \left\{ F \left[ \tilde{\Psi}(x_H, z_H) \right] \cdot e^{ikz \sqrt{1 - \lambda^2 (\gamma^2 + \delta^2)}} \right\} \quad (1)$$

In der Gleichung (1) stehen die Indizes  $B$  und  $H$  für die Quell- und Hologrammebene,  $\lambda$  beschreibt die Wellenlänge und  $\gamma$  sowie  $\delta$  die lokalen Frequenzen.

## 3 Anwendung

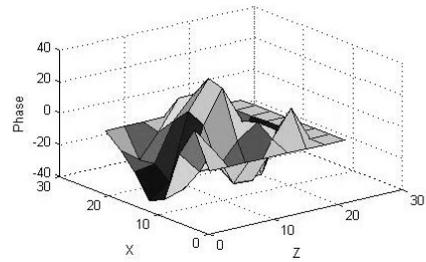
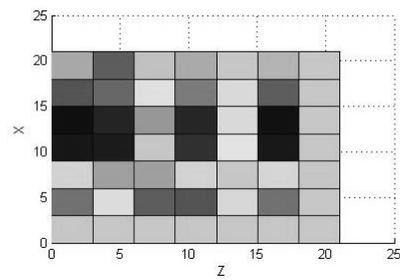
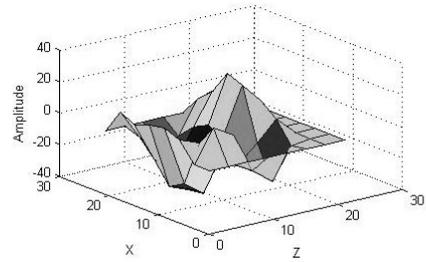
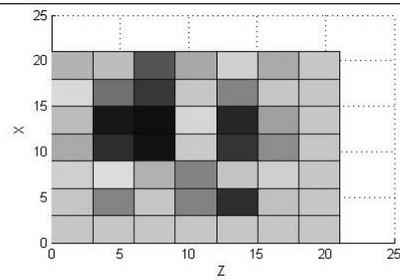
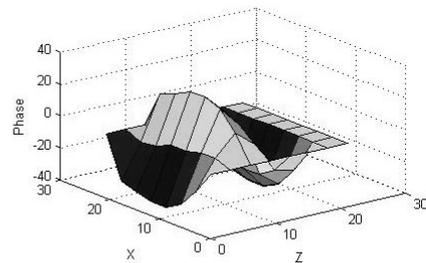
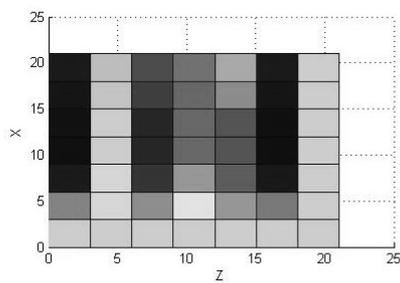
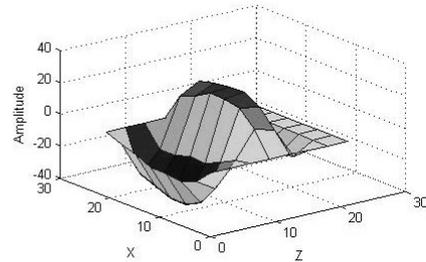
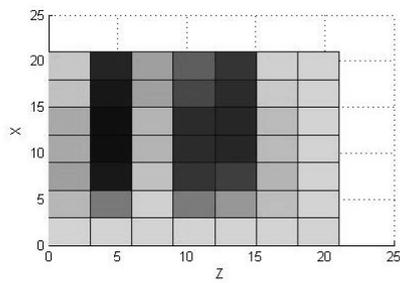
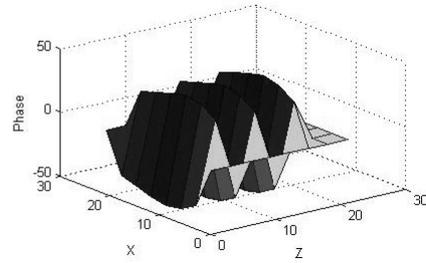
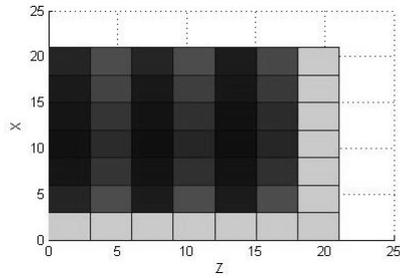
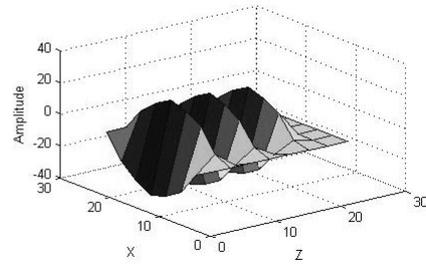
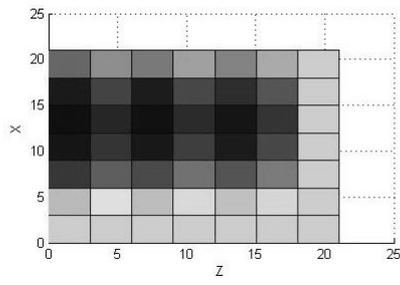
Auf der Basis des Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus wurde ein Matlab-Programm zur Lokalisierung von akustischen Quellen geschrieben. Die benutzte

Ausstattung besteht aus ICP-Beschleunigungsaufnehmern, die über eine National-Instruments PCMCIA Datenerfassungskarte mit einem mobilen Computer verbunden ist. Auf dem Rechner befindet sich die Software mit dem Algorithmus. Als ein Testobjekt wurden die Sensoren auf einem Schreibtisch aus Holz befestigt.

Zuerst musste der entwickelte Algorithmus verbessert werden. Dabei wurde die Berechnung auf einen großen Frequenzbereich ausgeweitet. Außerdem sind vorbereitende Tests mit synthetischen Daten ausgewertet worden, wo ein Dirac-Impuls die Interaktion mit einem Objekt simulieren sollte.

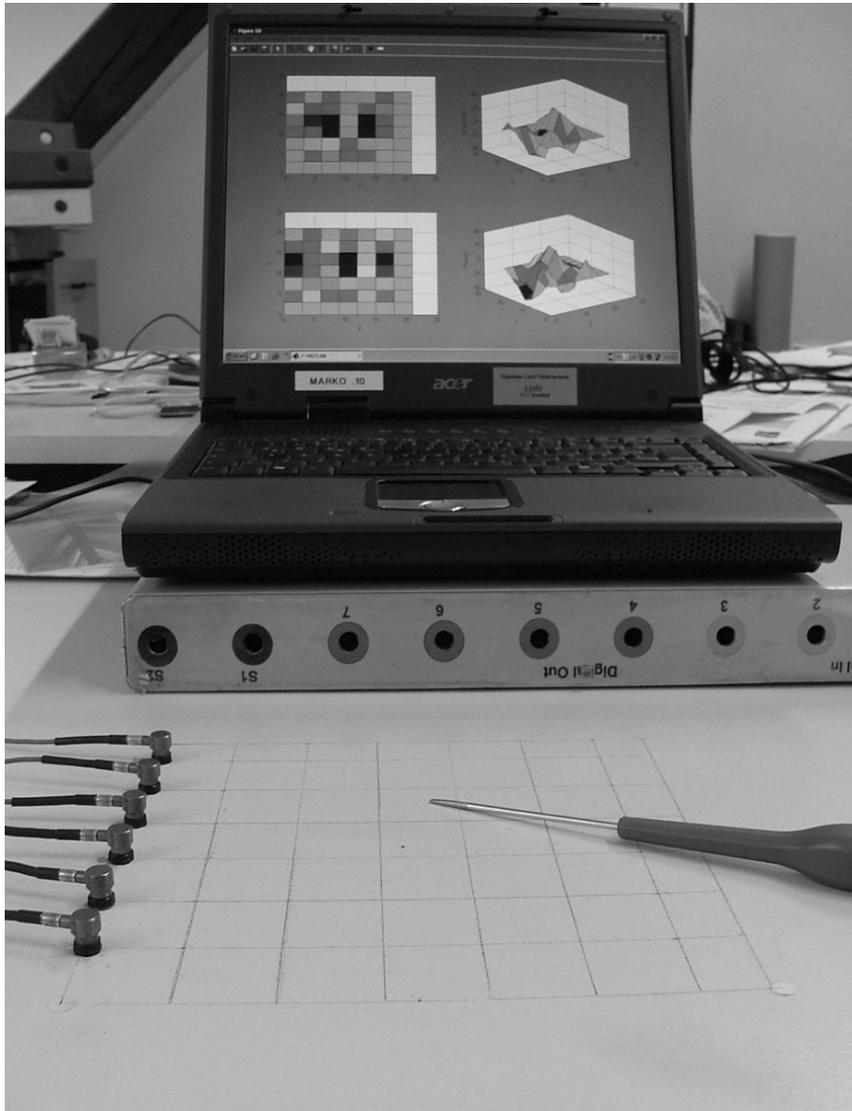
Am Anfang wird die Laufzeit des Signals für jeden Sensor aufgezeichnet (s. **Bild 2**, links), wonach eine Fourier-Transformation auf die Daten des Zeitbereichs angewendet wird. Danach wird sowohl das Amplituden als auch das Phasenspektrum der Signale berechnet (s. **Bild 2**, rechts). Als nächstes wird die Berechnung nach dem Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus für unterschiedliche Frequenzen durchgeführt, wobei die Quelle ein Schraubendreher auf einer Schreibtischplatte war. Einen Eindruck des Experiments vermittelt das **Bild 4**.

Da für die Auswertung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Wellen im Material bekannt sein muss, wurde diese durch eine Art Kalibrierung



**Bild 3:** Ergebnis der Quelllokalisierung für die Frequenzen 500, 600 und 1600 Hz.

in Vorversuchen an dem Messobjekt ermittelt. Die Methode für diese Berechnung basiert auf dem Laufzeitverfahren für die Ersteinträge des Signals entlang einer bekannten Distanz. Mit Hilfe dieser Voraussetzung kann der Algorithmus für die Transformation eingesetzt werden, die zu einer Rückprojektion entlang des Ausbreitungsweges führt.



**Bild 4:** Aufnahme der Ausstattung und Ergebnis einer Quellenlokalisierung auf dem Monitor, die dem Inhalt des Bildes 5 entspricht.

#### 4 Ergebnisse

In **Bild 3** werden erste Ergebnisse für die Quelllokalisierung mit dem Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus vorgestellt. Es handelt sich hierbei um die berechnete Rückprojektion für die Frequenzen 500, 600 und 1600 Hz. Auf dem Schreibtisch befand sich ein aufgemaltes Gitter um das Klopfen und Schlagen zu koordinieren, welches für diese Bilder

bei der X-Koordinate 13 und Z-Koordinate zehn erfolgte.

Für alle gezeigten Frequenzen kann ein Maximum in der Amplituden und Phasenverteilung beobachtet werden. Diese Maxima korrelieren mehr oder weniger mit der Klopfposition, wobei der Fehler nicht mehr als ein benachbartes Quadrat ist. Vermutlich ist der Grund für diese Abweichung eine

Ausbreitungsgeschwindigkeit, die nicht genau genug ermittelt wurde. Andererseits könnte die Abweichung vielleicht durch andere Frequenzen in der Berechnung verringert werden. In weiteren Messungen wird ebenfalls überprüft, ob eine größere Anzahl an Sensoren und deren Anordnung zu einer Verbesserung führen.

Insgesamt ist nun ein mobiles Testsystem vorhanden, welches nach Klopfen oder Schlagen die Quelllokalisierung aufgrund eines holografischen Ansatzes ermittelt.

#### 5 References

- /1/ TAI-CHI Konsortium: Technical Annex of the project. Vertragsdokument, 2004
- /2/ Reference to the TAI-CHI homepage. URL: <http://www.taichi.cf.ac.uk/>
- /3/ Gabor, D.: A new microscopic principle. Nature, 161 (1948), 777-778
- /4/ Reference to MIT Museum's Holography homepage: eye on holography. URL: <http://www.mit.edu/~sdh/holography/eoh/index.html>
- /5/ Roye, W.: Beitrag zur Weiterentwicklung der akustischen Holografie beim Einsatz in der Materialprüfung. VDI-Verlag, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 117, 1987
- /6/ Rolshofen, W., Yang, M., Wang, Z.: Acoustic Holography in-Solids for Computer-Human Interaction, I\*PROMS Virtual Conference, Cardiff, 2005

## Vergleich zwischen der numerischen und experimentellen Modalanalyse einer Stahlplatte

Backhaus, S.-G.; Söver, A.

*Während der Detaillierung eines Prüfstandes zur experimentellen Ermittlung des Körperschallübertragungsverhaltens von Wälz- und Gleitlagern wurden wesentliche, im Schalleitungspfad des Prüfstandes liegende, Bauteile auf ihre dynamischen Eigenschaften untersucht. Hierbei kamen sowohl experimentelle als auch numerische Methoden zum Einsatz.*

*During detailing of a test bed for the experimental determination of the impact sound characteristic of ball and friction bearings, different components were tested according to their dynamical behavior whereas are experimental and numerical methods were used.*

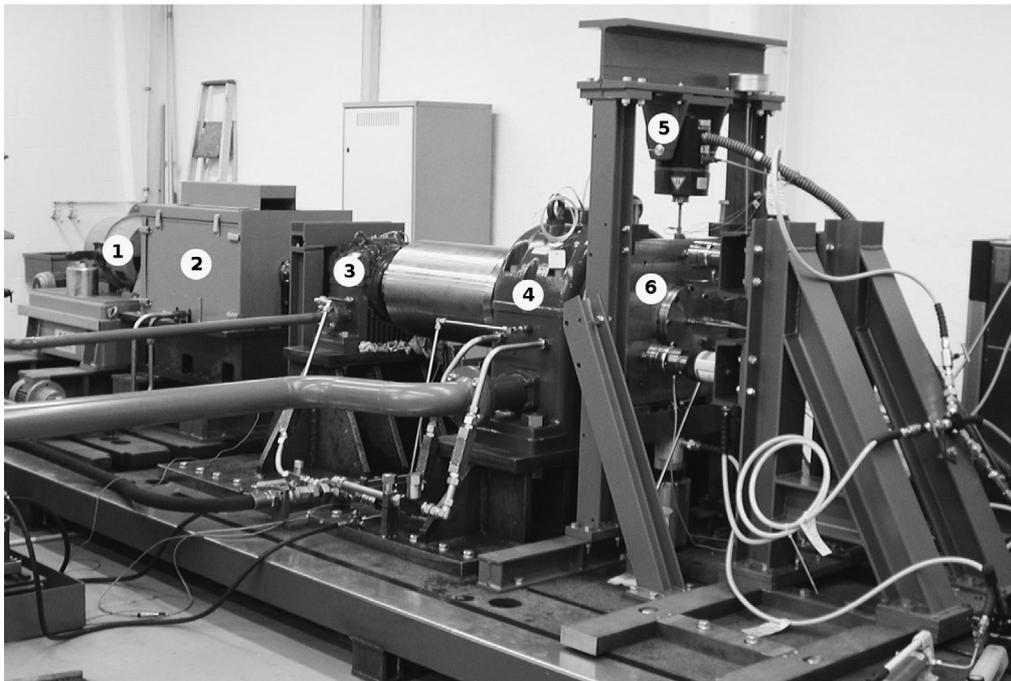
### 1 Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA), gefördert von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.

(AiF) wurde am Institut für Maschinenwesen ein Prüfstand zur messtechnischen Ermittlung der Körperschallübertragungseigenschaften von Wälz- und Gleitlagern entwickelt und gebaut /7/. Um die dynamischen Eigenschaften des Prüfstandes (**Bild 1**) abschätzen zu können, wurden wesentliche, an der Körperschalleitung beteiligte, Elemente wie die Lagerplatte, die einen Ausschnitt aus dem Gehäuse beispielsweise eine Getriebes darstellt, untersucht. Dazu wurden bereits während der Konstruktion der Platte numerische Rechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) auf Basis der bestehenden grafischen 3D-Modelle durchgeführt, deren Ergebnisse nach der Fertigstellung des Bauteils anhand einer experimentellen Modalanalyse überprüft wurden.

### 1.1 Modalanalyse

Die Modalanalyse ist ein Verfahren zur Beschreibung der natürlichen dynamischen Eigenschaften (Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Schwingungs-Eigenformen) einer Struktur /2/, /3/. Zur Ermittlung dieser Parameter können sowohl rechnerische als auch experimentelle Methoden eingesetzt werden. Bei beiden Verfahren wird die reale Struktur auf ein idealisiertes lineares mathematisches Modell zurückgeführt /1/, /8/.



**Bild 1:** Prüfstand zur messtechnischen Ermittlung der Körperschallübertragungsfunktionen von Wälz- und Gleitlagern. 1 Hauptantrieb, 2 Untersetzungsgetriebe, 3 und 4 Prüfstandshauptlagerung (3 Radialgleitlager, 4 Radial-Axial-Gleitlager), 5 elektrodynamischer Schwingerreger, 6 Lagerplatte

## 1.2 Numerische Modalanalyse der Stahlplatte

Soll eine numerische Modalanalyse mit Hilfe der Finite Elemente Methode durchgeführt werden, sind drei Schritte notwendig. Zunächst muss das Modell erstellt werden, das so genannte Preprocessing. Danach folgt die Lösung des Problems (Solving) mit anschließender Darstellung der Ergebnisse (Postprocessing) /9/.

Das Preprocessing beginnt in dem hier dargestellten Fall mit der CAD-Zeichnung der zu berechnenden Struktur. Je nach Komplexität des Systems und den Anforderungen an das Ergebnis wird dieses Modell mit Finiten Elementen vernetzt. Diesen Finiten Elementen werden anschließend verschiedene Eigenschaften wie beispielsweise Werkstoffparameter zugewiesen.

In dem hier betrachteten Fall lag eine 3D-Zeichnung in Pro/ENGINEER der Stahlplatte vor, die ohne weitere zusätzliche Schritte (Export, Import) in das zur Pro/ENGINEER®-Familie gehörenden FEM-Modul Pro/MECHANICA® (ProM) eingeladen werden konnte. In ProM wurden der Struktur anschließend die Werkstoffeigenschaften zugewiesen und die Vernetzung (Meshing) vorgenommen. Das Meshing ist dabei von den Gegebenheiten der Struktur und den Anforderungen an das Simulationsergebnis abhängig. Die Ergebnisse der Berechnung sind in **Bild 5** und **Bild 8** dargestellt.

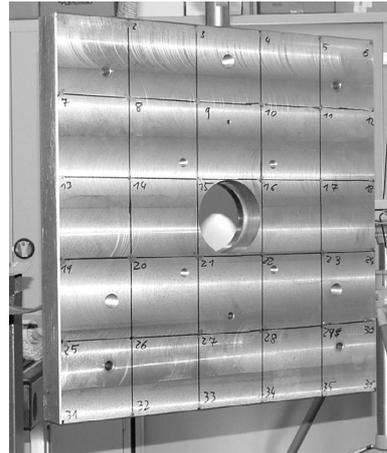
Zusätzlich zu den oben genannten Berechnungen wurden die gleichen Analysen mit LMS Virtual.Lab (LMS-VL) durchgeführt. Für die Simulation des dynamischen Verhaltens von mechanischen Strukturen bietet LMS-VL eine vollständige und integrierte Lösung /10/. Dazu muss das 3D Model aus Pro/ENGINEER® in ein STEP-File gewandelt werden, um es in LMS-VL importieren zu können. Nach der Definition der Werkstoffeigenschaften wurde die Struktur der Stahlplatte mit ähnlich vielen Finiten Elementen vernetzt, um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Finite Element Rechnungen zu bekommen. Die Ergebnisse sind in **Bild 4** und **Bild 7** zu sehen.

## 1.3 Experimentelle Modalanalyse der Stahlplatte

Um eine experimentelle Modalanalyse an der Stahlplatte durchführen zu können ist weit umfangreicheres Equipment als bei der numerischen Modalanalyse erforderlich. Neben der Stahlplatte, die zumindest im Prototypenstadium vorliegen muss, wird eine messtechnische Ausrüstung bestehend

aus einem Modalhammer (in der passenden Gewichtsklasse) ein Beschleunigungs- oder Wegaufnehmer sowie ein zweikanaliges Aufzeichnungsgerät für die Signale und ein PC mit entsprechender Auswertungssoftware benötigt.

Zur Durchführung der experimentellen Modalanalyse wird der Beschleunigungsaufnehmer an einem Punkt der Platte fixiert um diese anschließend Punkt für Punkt, vergleiche **Bild 2**, anzuregen. Dies dient dazu jede Anregung und Antwort als Einzelmessung zu speichern.



**Bild 2:** Markierungen definierter Messpunkte auf der Stahlplatte zur Vorbereitung der experimentellen Modalanalyse

Nach erfolgreicher Aufzeichnung aller Messungen werden diese in die verwendete Modalanalysesoftware, hier Vibrant MeScope /4/ eingeladen.

Bevor jedoch die modalen Parameter der Platte ermittelt werden können, muss mit Hilfe eines Preprocessors ein Gitter-Modell der Platte erstellt werden, um dessen Knotenpunkten die jeweils zugehörigen Einzelmessungen zuweisen zu können. Anschließend erfolgt analog zur numerischen Berechnung das Solving mit anschließender Darstellung der Ergebnisse, vergleiche **Bild 3** und **Bild 6**.

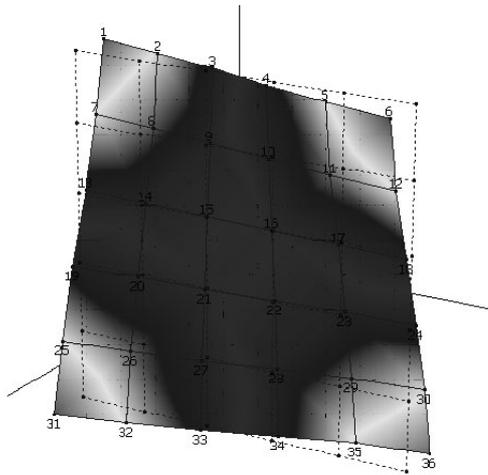
## 1.4 Vergleich der numerischen mit der experimentellen Modalanalyse

### 1.4.1 Vergleich der Ergebnisse

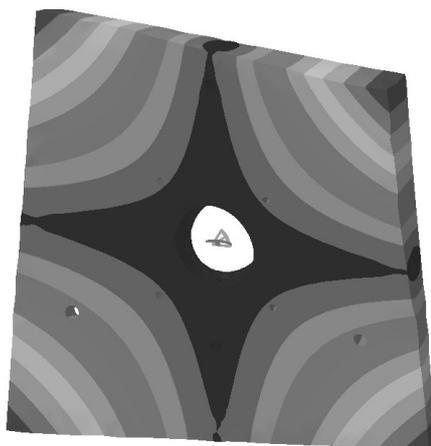
Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass sowohl die numerischen Berechnungen mit ProM als auch die mit LMS-VL ähnliche Ergebnisse für die Eigenschwingungen der Platte liefern. Die erste Eigenfrequenz der Stahlplatte liegt demnach bei ca. 500 Hz (vergleiche **Bild 4** und **Bild 5**), die zweite bei ca. 890 Hz (vergleiche **Bild 7** und **Bild 8**). Die Ergebnisse der Auswertung der experimentellen Modalanalyse mit MeScope zeigen die gleichen Schwin-

gungsformen wie die Ergebnisse der numerischen Modalanalyse, jedoch unterscheiden sich die ermittelten Eigenfrequenzen. Sie liegen bei der experimentellen Modalanalyse bei 510 Hz und 920 Hz, vergleiche **Bild 3** und **Bild 6**.

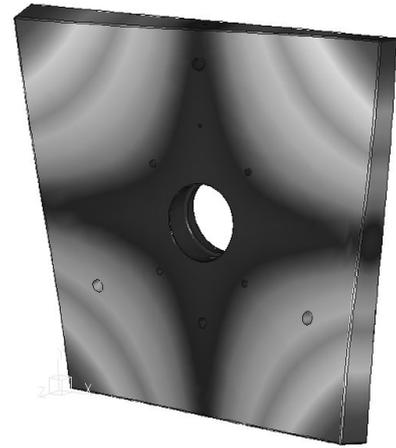
Die Abweichung der Ergebnisse der experimentellen und der numerischen Modalanalyse liegen somit zwischen 2% und 3,4%. In Anbetracht der Tatsache, dass es sich bei der experimentell untersuchten Platte um einen ersten, nicht vollständig bearbeiteten, Prototypen handelt und die Einspannbedingungen während des Versuchs an der Platte bei der numerischen Modalanalyse nicht berücksichtigt wurden, ist das Ergebnis als gut zu bezeichnen.



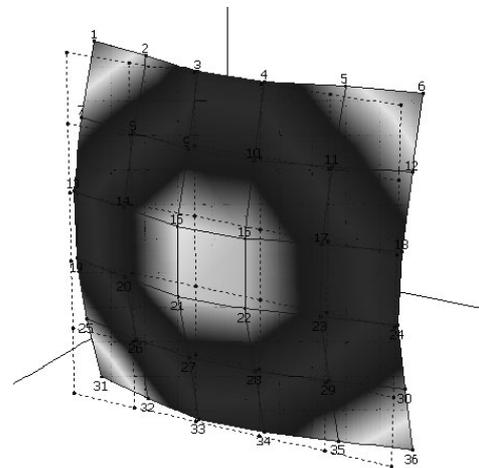
**Bild 3:** Schwingungsmode der Platte bei der ersten Eigenfrequenz von 510 Hz, Ergebnis der Auswertung der experimentellen Modalanalyse mit MeScope /4/



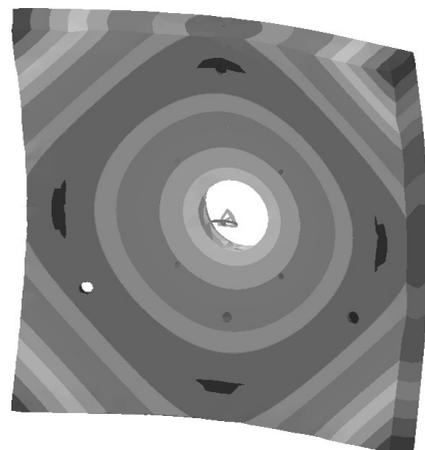
**Bild 4:** Schwingungsmode der Platte bei der ersten Eigenfrequenz von 500 Hz, Ergebnis der Auswertung der numerischen Modalanalyse mit LMS-VL /6/



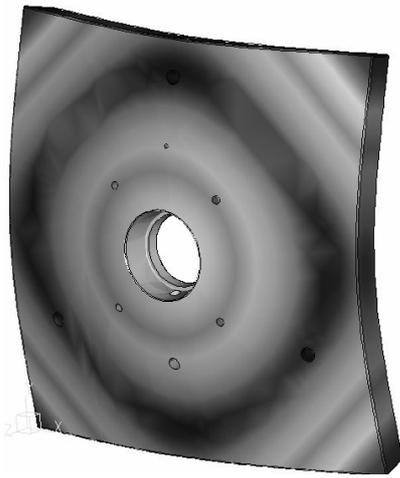
**Bild 5:** Schwingungsmode der Platte bei der ersten Eigenfrequenz von 499 Hz, Ergebnis der Auswertung der numerischen Modalanalyse mit ProM /5/



**Bild 6:** Schwingungsmode der Platte bei der zweiten Eigenfrequenz von 920 Hz, Ergebnis der Auswertung der experimentellen Modalanalyse mit MeScope /4/



**Bild 7:** Schwingungsmode der Platte bei der zweiten Eigenfrequenz von 887 Hz, Ergebnis der Auswertung der numerischen Modalanalyse mit LMS-VL /6/



**Bild 8:** Schwingungsmoden der Platte bei der zweiten Eigenfrequenz von 889 Hz, Ergebnis der Auswertung der numerischen Modalanalyse mit ProM /5/

### 1.4.2 Vergleich des Aufwandes

Ausgehend von der Annahme, dass ein 3D-Modell des zu untersuchenden Objekts besteht, ergeben sich wesentliche Unterschiede beim Durchführungsaufwand zwischen der experimentellen und der numerischen Analyse Modalanalyse. Zur Durchführung der numerischen Modalanalyse ist lediglich ein geeignetes Finite Elemente Programm wie ProM oder LMS-VL notwendig. Sollen jedoch zusammenhängende Strukturen untersucht werden, wird die Ermittlung der Kontaktparameter zwischen den einzelnen Teilen der Struktur notwendig. Für eine experimentelle Modalanalyse wird das reale Objekt, die Messtechnik zur Aufnahme der modalen Parameter sowie ein Programm zur Analyse der Messwerte benötigt.

## 2 Zusammenfassung

Sollen modale Parameter eines Objekts oder gar einer Struktur mit hoher Genauigkeit ermittelt werden, ist die experimentelle Modalanalyse vorzuziehen. Müssen jedoch die modalen Parameter eines Objekts oder einer Struktur ermittelt werden, um deren Einflüsse auf andere Objekte oder Strukturen abschätzen zu können, lassen sich diese mit numerischen Methoden einfach ermitteln, vor allem jedoch lassen sich Änderungen kostengünstig vornehmen, was an realen Objekten wie Prototypen oder gar Vorserien- oder Serienmodellen nur mit vergleichsweise hohen Kosten realisierbar ist. Immer leistungsfähigere Rechner ermöglichen zudem die Erfassung und Lösung immer komplexerer Probleme in kürzerer Zeit.

## 3 Literatur

- /1/ Kollmann, F. G.: Maschinenakustik - Grundlagen, Messtechnik, Berechnung, Beeinflussung; 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York; Springer; 2000
- /2/ Avitabile, P.: Experimental Modal Analysis; Modal Analysis and Controls Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of Massachusetts Lowell; Lowell; Massachusetts; USA
- /3/ The Modal Handbook; A Multimedia Computer Based Training and Reference Guide, Dynamic Decisions, Merrimack, NH
- /4/ Vibrant Technology, Inc.: ME'scope VES, <http://www.vibtech.com>
- /5/ The Product Development Company: Pro/MECHANICA<sup>®</sup>, <http://www.ptc.com/>
- /6/ LMS<sup>®</sup> Engineering Innovation: LMS Virtual.Lab Rev 4B, <http://www.lmsintl.com/>
- /7/ Backhaus, S.-G.: Konzeption und Bau eines Prüfstandes zur Ermittlung des Körperschallübertragungsverhaltens von Wälz- und Gleitlagern, Mitteilungen des Instituts für Maschinenwesen, Institut für Maschinenwesen der Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2004
- /8/ Kim, H. J.; Cho, Y. M.; Chou, Rudy: Noise source identification in a rotary compressor: a multidisciplinary synergetic approach. ICECP 2000: 15th International Compressor Engineering Conference at Purdue, Proceedings, Band 2 (2000), Seite 579-586.
- /9/ Fröhlich, P.: FEM-Leitfaden: Einführung und praktischer Einsatz von Finite Elemente Programmen, Springer-Verlag, Berlin, 1995
- /10/ [http://www.digital-engineering-magazin.de/index.php3?page=news-show\\_neu.php3&naechster=8545](http://www.digital-engineering-magazin.de/index.php3?page=news-show_neu.php3&naechster=8545)

## 3D-Koordinatenmesstechnik am Institut für Maschinenwesen

Korte, T.

*Das Institut für Maschinenwesen verfügt über einen klimatisierten Messraum mit einem 3D-Koordinatenmessgerät der Firma Zeiss. Es handelt sich um ein komplett ausgestattetes Messzentrum mit integriertem Rundtisch zur Messung rotations-symmetrischer Bauteile, messendem Tastkopf für Scanning-Betrieb und vollständiger 3D-CAD-Anbindung.*

*The Institute for Mechanical Engineering has an air-conditioned laboratory with a 3D coordinate measuring machine (CMM) manufactured by ZEISS at one's disposal. It involves a completely equipped measurement system with integrated rotary table for rotation-symmetrically components, probe for scan mode and full connection for 3D-CAD.*

### 1 Einleitung

Moderne Produktionsmethoden fordern bezüglich Genauigkeit und entsprechender Komplexität der Messaufgabe adäquate Techniken der Qualitätsprüfung. 3D-Koordinatenmessgeräte (KMG) sind heute ein wichtiger Bestandteil des gesamten Qualitätssicherungsprozesses. Sie erlauben nicht nur einzelne qualitative und quantitative Aussagen, sondern können gemessene Werte rechnerisch miteinander in Beziehung setzen. Dies erlaubt Aussagen, ob beispielsweise ein Ausschussteil noch nachzubessern ist oder ob komplexe Form- und Lagetoleranzen eingehalten werden.



**Bild 1:** Koordinatenmessgerät des IMW

### 2 Nutzen von KMG

Die Vorteile eines CNC-gesteuerten KMG gegenüber konventionellen Messmitteln sind:

- Messrepertoire: Alle Maß-, Form- und Lageabweichungen können ermittelt werden.
- Genauigkeit: Die Wiederholgenauigkeit des KMG des Institutes für Maschinenwesen beträgt bei einer Messlänge von 100 mm nur 1 µm.
- Flexibilität: Es können ohne aufwändige Umbauten und Umrüstungen verschiedene Werkstücke nacheinander geprüft werden.
- Messgeschwindigkeit: Durch automatisierte Messabläufe erhält man schnell die gewünschten Messdaten.
- Dokumentation: Alle Messergebnisse werden protokolliert. Die Daten können graphisch aufbereitet sowie zur statistischen Auswertung weiter verwandt werden.
- Universalität: Die Standardsoftware löst die wichtigsten Messaufgaben. Für spezifische Aufgaben stehen Sonderprogramme zur Verfügung.
- Störeinflusserfassung: Durch die Analyse der Messergebnisse können systematische Abweichungen schnell ermittelt und an die Fertigung weitergegeben werden.

### 3 Modernisierung des KMG

Das Koordinatenmessgerät UMM 550 der Firma Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH in Oberkochen wird im Rahmen des IMW CIM-Labores betrieben. Es hat folgende technische Eigenschaften (**Tab. 1**):

Messbereich	550x500x450 mm
Auflösung	0,1 - 0,2 µm
Stellgeschwindigkeit	0,5 µm/s - 65 mm/s
Messkraft	0,1 - 2 N
Nettogewicht	1,8 t

**Tab. 1:** Eigenschaften des Zeiss KMG UMM 550

Die gesamte Anlage wurde unlängst vollständig modernisiert. **Bild 1** zeigt den Messraum nach den Umbauarbeiten.

Im Rahmen der Modernisierung wurde die bestehende Steuerung des Messgerätes durch eine 16 bit Steuerungseinheit ausgetauscht. Der Unix-Rechner mit der Mess- und Auswertesoftware UMESS wurde durch einen PC mit Windows-Betriebssystem ersetzt. Als Standardmesssoftware wurde CALYPSO und für die Freiformflächenmessung HOLOS der holometric technologies GmbH installiert. CAD Daten können als VDA-FS und IGES nun vom System eingelesen werden.

Um dennoch bereits bestehende Messprogramme nutzen zu können, wurde zudem die Mess- und Auswertesoftware UMESS als Linuxversion installiert.

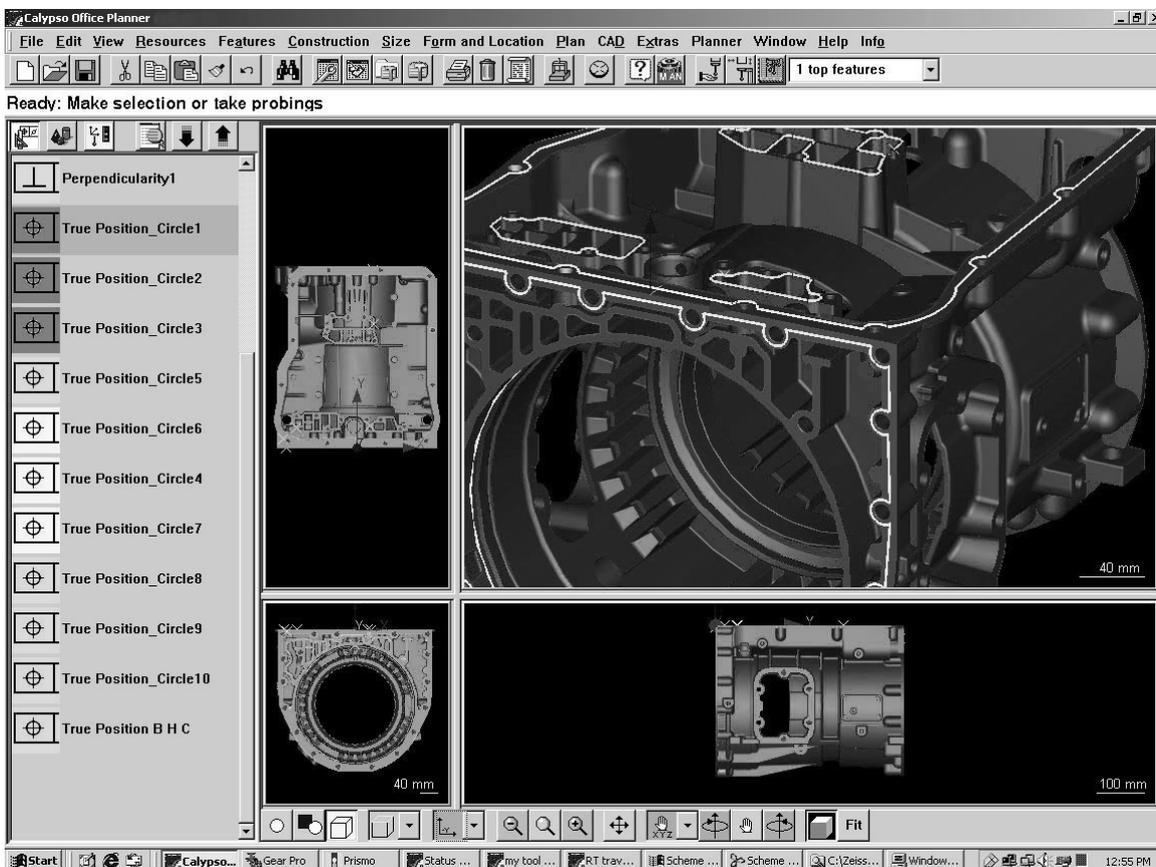
### 3.1 Mess- und Auswertesoftware CALYPSO

CALYPSO ist auf einen CAD-Kern aufgebaut. Dadurch ist ein Import umfassender 3D-Modelle aus dem CAD-System möglich. Alle geometrischen Elemente des Modells stehen der Messsoftware zur Prüfplangenerierung zur Verfügung. Bei der Messung von Bauteilen sind in erster Linie einzelne Merkmale der Geometrien von Interesse. Dies sind zum Beispiel Maße oder Form- und Lagetoleranzen. Für komplexe Toleranzsysteme können die

einzelnen Merkmale der Geometrielemente beliebig miteinander kombiniert und in Beziehung zueinander gesetzt werden. Alle Verfahrenswege, die während der Prüfung erforderlich sind, werden dabei ständig dynamisch berechnet. **Bild 2** zeigt einen Screenshot der CALYPSO Benutzeroberfläche.

Durch die neue Mess- und Auswertesoftware ergibt sich eine Reihe von Vorteilen bei der Durchführung Messabläufen:

- Die gängigsten CAD-Dateiformate wie IGES, VDA-FS, STEP können eingelesen werden. Bei CAD-Modellen, die nach dem Stand der Technik einwandfrei generiert werden, erübrigt sich eine Nachbereitung der Daten. Das CAD-Modell kann zudem verwandt werden, um offline einen komplexen Prüfplan zu erstellen. Falls keine CAD-Modelle vorhanden sind, werden die Elemente aus dem zu prüfenden Bauteil generiert.
- Die Sollgeometrien können durch Auswählen der entsprechenden Elemente im Modell definiert werden.
- Die Maß- und Lagetoleranzen können direkt aus dem CAD-Modell ausgelesen und zugeordnet werden.



**Bild 2:** CALYPSO Benutzeroberfläche

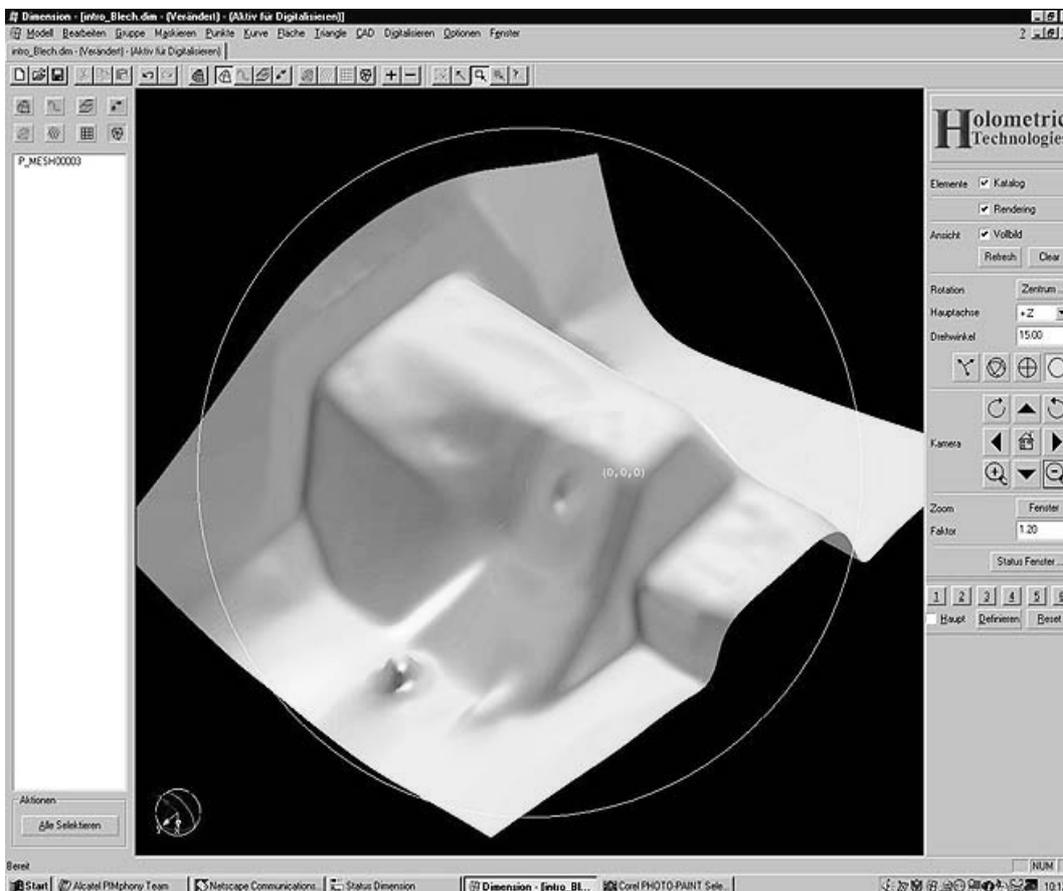
- Die aufwändige Programmierung von Umfahrwegen und Zwischenpositionen kann weitgehend entfallen. Die Software generiert aus dem CAD-Modell einen Sicherheitsquader, um beim Messen der verschiedenen Merkmale eine Kollision zu verhindern.

### 3.2 Freiformflächen Messsoftware HOLOS

Die Software HOLOS dient dem Messen von Freiformflächen und einzelner Regelgeometrien. Ähnlich dem Vorgehen bei der Verwendung der Standardsoftware können Modelle VDA-FS- und IGES-Format eingelesen werden. Punkte auf der Bauteiloberfläche werden gemessen und die Abweichung von der Sollgeometrie des Modells dargestellt. **Bild 3** zeigt einen Screenshot der Bedienoberfläche von HOLOS.

Grobausrichtung wird ein Ausrichteprogramm erstellt und so lange automatisiert iterativ durchgeführt, bis eine ausreichende Minimierung des Fehlers gegeben ist (Best Fit Ausrichtung). In der Regel reichen hierzu fünf bis sechs Iterationsabläufe. Eine weitere Ausrichtungsmöglichkeit ist die RPS-Ausrichtung (Referenz Punkte System). Sie wurde entwickelt, um durch Angabe von Regelgeometrien als Referenzpunkte Ausrichtungen reproduzierbar zu machen.

HOLOS bietet eine Reihe von Auswerte- und Darstellungsmöglichkeiten, um die gemessenen Abweichungen von der Sollgeometrie aufzubereiten. Grafische Methoden sind zum Beispiel Abweichungssymbole am 3D-Modell, Markierungen mit unterschiedlichen Farben für einzelne Abweichungsbereiche, chromatische Koordinaten und vektorielle Darstellungen. Die Ergebnisse können



**Bild 3:** HOLOS Bedienoberfläche

Von besonderem Interesse bei der Messung von Freiformbauteilen, wie zum Beispiel umgeformten Karosserieteilen, ist die Art der Ausrichtung. Bei der 3D-Ausrichtung wird zunächst eine Grobausrichtung durchgeführt. Das bedeutet, mindestens drei Punkte werden am Bauteil angetastet und dann dem CAD-Modell manuell zugeordnet. Nach der

auch numerisch ausgewertet werden und stehen für weiterführende statische Untersuchungen bereit.

## 4 Einsatz des KMG am Institut für Maschinenwesen

Die Koordinatenmessmaschine wird am Institut für Maschinenwesen in Forschung und Lehre sowie im täglichen Werkstattbetrieb eingesetzt.

### 4.1 Koordinatenmesstechnik in der Lehre

In zwei der acht CIM-Labor Praktikumsversuche wird das KMG für Lehrzwecke verwandt. Im Versuch „Qualitätsdatenerfassung“ wird die im CIM-Umfeld integrierte Qualitätssicherung durchgeführt. Dabei wird zunächst das Koordinatenmessgerät vorgestellt und anschließend ein konkretes Messproblem gelöst. Dieser Versuch umfasst die vorbereitenden Arbeiten wie Tasterwahl, Ausrichten des Werkstückes, die Erstellung eines Messablaufes und die Auswertung und Aufbereitung der Ergebnisse. Besonderes Augenmerk wird in dem Versuch auf die Bedeutung korrekter CAD-Modelle sowie einer gezielten Auswahl der Messmerkmale gelegt.

In einem weiteren Versuch werden insbesondere Form- und Lagetoleranzen behandelt. Es werden grundsätzliche Möglichkeiten der Tolerierung von Bauteilen dargestellt und unterschiedliche Messstrategien gezeigt.

Außerdem werden im Versuch „Welle-Nabe-Verbindungen“ des Maschinenlabor Grundpraktikums die Verformungen durch verschiedene Verbindungsarten an Naben gemessen.



**Bild 4:** Messung an einer Passfederverbindung

### 4.2 Koordinatenmesstechnik als Werkzeug der Forschung

Das KMG wird in unterschiedlichen Forschungsprojekten eingesetzt. Zum Beispiel werden im Rahmen der Forschungsarbeiten an Zahnwellen die Teil-

lungsfehler, der Verschleiß und die Verformung der Zahnflanken gemessen.

Ferner werden an Welle-Nabe Verbindungen vor und nach im Versuch aufgebrachten Belastungen die plastischen Verformungen bestimmt. Zudem können durch einen Verspannkasten, der auf dem Messtisch des Koordinatenmessgerätes montiert wird, die Verformungen an Welle-Nabe-Verbindungen bestimmt werden, während Belastungen aufgebracht werden. Der Verspannkasten erlaubt die Einbringung von Drehmomenten bis  $\pm 5000$  Nm. **Bild 4** zeigt die Untersuchung der Oberfläche einer dünnwandigen Nabe einer Passfederverbindung.

## 5 Zusammenfassung

Das Koordinatenmessgerät des IMW wurde vollständig modernisiert. Durch den CAD-Kern der neuen Software sind Messungen erheblich einfacher und schneller durchzuführen, auszuwerten und zu präsentieren als zuvor. Die Verfahrenskette innerhalb des CIM-Labores ist durch die CAD-Anbindung geschlossen, so dass CAD Modelle von der Konstruktion über die Fertigung durch CNC-Maschinen und Rapid Prototyping bis zur Qualitätsdatenerfassung durchgängig verwendet werden können.

## Einsatz eines Lernmanagementsystems am IMW

Guthmann, A.; Sambale, B.; Schäfer, G.

*Nach einer einjährigen Testphase wird seit dem Wintersemester 05/06 am Institut für Maschinenwesen (IMW) das Lernmanagementsystem StudIP eingesetzt. Der folgende Artikel gibt einen Überblick über die Nutzung des Systems und legt Erfahrungen aus Sicht des IMW sowie aus Sicht der Studierenden dar.*

*After a one year long introduction phase, the learning-management-system StudIP is being used in the Institut für Maschinenwesen from the winter term 05/06 onwards. In the following article gives an overview about the use of the system and reflects experiences of the IMW as well as of students.*

### 1 Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal ist durch seine breiten Lehrverpflichtungen in den Grundveranstaltungen vieler Studiengänge stark durch organisatorische Aufgaben belastet. Die längerfristig absehbaren ansteigenden Studierendenzahlen, die in diesem Wintersemester die Erwartungen trotzdem noch deutlich übertrafen, haben die Verfasser veranlasst, über den Einsatz von Organisationshilfsmitteln weiter nachzudenken. Da das Institut auch in die Multimediaaktivitäten der Hochschule und des Landes Niedersachsen eingebunden ist, lagen die Gedanken zur Nutzung eines umfangreichen Lern-Management-Systems (LMS) nahe. Im Vorfeld dieser Entwicklungen hatte das IMW bereits eine Datenbank-Applikation zur Verwaltung von Studiumsteilleistungen im Rahmen des Technischen Zeichnens und der Konstruktionselemente-Übungen entwickelt und seit drei Jahren erfolgreich betrieben. Der nächste angedachte Schritt war die Erweiterung und Einführung eines Web-basierten Anmeldesystems für Studierende zu den seminaristischen Übungen in kleinen Gruppen, wie es das Institut für Elektrische Energietechnik der TU Clausthal bereits einsetzt. Vor diesem Gesamt-zusammenhang hat sich das IMW dann für die Mehrwert-Lösung eines kommerziellen LMS entschieden. Dieser Entscheidung gingen noch diverse Gespräche zur Evaluation verschiedener LMS in Zusammenarbeit mit unserem Rechenzentrum voran. Entscheidend war dabei für uns einerseits die

Integration in unsere Teilleistungsdatenbank, den bestehenden LDAP-Server zur Authentifizierung, bestehende Lerninformationsangebote der TU Clausthal (online Vorlesungsverzeichnis) und die im Immatrikulations- und Prüfungsamt genutzten Softwareprodukte und andererseits die Abbildbarkeit der für die Clausthaler Lehre spezifischen Geschäftsprozesse.

### 1.1 Erster Einsatz und Nutzungsszenarien

Als bester Kompromiss unter den genannten Auswahlkriterien stellte sich das LMS „StudIP“ dar. Das StudIP-System und ein weiteres Vergleichssystem wurden schon seit über einem Jahr in einer Testinstallation in unserem Rechenzentrum (RZ) betrieben und StudIP wurde in dieser Zeit vom IMW für einzelne Veranstaltungen eingesetzt. Im Sommersemester 2005 wurde dann die Entscheidung zum generellen Einsatz des LMS „StudIP“ herbeigeführt und die vorlesungsfreie Zeit bis Mitte Oktober genutzt um die notwendigen Vorbereitungen zu treffen. In Zusammenarbeit mit dem im RZ verantwortlichen Mitarbeiter wurden weitere Dozenten und Lehrveranstaltungen angelegt, für die kleinen Gruppenübungen Kontingentierungen eingerichtet und die kurzfristige Übernahme der Immatrikulationsdaten in den LDAP-Server vorbereitet. Erste Probleme ergaben sich dabei bereits durch die Übernahme von Lehrveranstaltungszeiten aus dem TUC eigenen System ODIN bei den kleinen Gruppenübungen, die aus Kapazitätsgründen mehrfach innerhalb einer Woche angeboten werden müssen. Gleichzeitig wurden die Studierenden zum Ende der Sommersemester-Lehrveranstaltungen auf den neuartigen Belegungsmodus mit seinem Webinterface und die notwendige Beachtung der Meldetermine hingewiesen. Unsere neuen Erstsemester wurden von ihren Tutoren mit der Nutzung des Systems innerhalb ihrer Einführungswoche vertraut gemacht.

Das zunächst angestrebte Nutzungsszenario sieht folgende Module vor:

- Online-Anmeldung der Studierenden zu Gruppenübungen und Praktika mit gleichzeitiger selbstorganisierter Gruppeneinteilung

- Online-Anmeldungen zu Wahlveranstaltungen im Hauptstudium.
- Gruppenmailing an einzelne Übungsgruppen durch die Betreuer
- Stammdatentransfer Übungsgruppenteilnehmer in Teilleistungsdatenbank
- Bereitstellung von Lehrunterlagen

Der deutlich darüber hinausgehende Leistungsumfang zur Lernunterstützung soll zukünftigen weiteren Entwicklungsschritten vorbehalten sein. Mit dem letzten Punkt, der Bereitstellung von Lehrunterlagen, wird bereits ein Schritt in diese Richtung getan, in dem der Teilbereich Content-Management-System (CMS) genutzt wird. Hier finden sich die Aufgabenblätter und Lösungswege als pdf-Dokumente zur Vor- und Nachbereitung der großen Rechenübungen zur Maschinenlehre und zu den Konstruktionselementen. Ein Dozenten-Chat wird kurzfristig sicherlich nicht aktiviert, da die Clausthaler Lernumgebung bessere persönliche Kontakte erlaubt. Ebenso ist auch noch nicht an die Nutzung von Online-Prüfungen gedacht, dies ist in den Prüfungsordnungen in dieser Art noch nicht vorgesehen. Grundsätzlich sollten zunächst die Vitalfunktionen einer bewährten Präsenzlehre problemlos unterstützt werden, bevor weitere Features aktiviert werden.

Neben der Etablierung des Lernmanagementsystems wurde an der TU Clausthal, initiiert durch das IMW, auch die Frage der weiteren eLearning-Unterstützung in der Lehre diskutiert. Ein besonders wichtiger Punkt in der Weiterentwicklung der Lehre ist die Evaluation der Lehrveranstaltungen. Zu diesem Zweck wurde von der TU Clausthal zum Wintersemester 2005/06 das System EvaSys eingeführt. Erste Erfahrungen zu diesem Projekt werden zum Ende des Wintersemesters vorliegen und können bei den Autoren abgefragt werden.



## StudIP an der TU Clausthal



Dipl.-Math. Bianca Sambale  
Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen

03.06.2005

Bild 1: Intro



Über die Erfahrungen mit der Einführung des Lernmanagementsystems wurde im Verlauf der Einführungsphase bereits berichtet. Die Bilder stammen aus einem Telekonferenzvortrag (**Bild 1 - 3**) im Rahmen eines Nutzerforums innerhalb des ELAN-Netzwerkes ([www.elan.de?](http://www.elan.de?)).



### Übersicht

- Motivation ein Lernmanagementsystem zu nutzen, Anforderungen an das System
- Anwendung von StudIP am IMW
- Erfahrungen positiv/negativ
- Wünsche für die Zukunft
- Zusammenfassung

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



Bild 2: Übersicht



Bild 3: Telekonferenzvortrag in Clausthal mit Braunschweig, Göttingen, Hannover, Lüneburg und Oldenburg

Über die bisher genannten Gründe hinaus sind in **Bild 4** zwei wesentliche Gründe die besonders aus Sicht der Studierenden für die Einführung eines LMS sprechen aufgeführt. Es handelt sich dabei um die zeitlich unbeschränkte Zugangsmöglichkeit zu allen darin abgelegten Informationen, aber vor allem sind die Studierenden in der Lage sich z.B. vor dem Schlafengehen noch für eine Lehrveranstaltung anzumelden, nachdem sie darüber auf dem informellen Weg am Biertisch von Kommilitonen gehört haben. Insgesamt kann durch dieses zusätzliche asynchrone Angebot eine Studienzeiterkürzung erwartet werden.



### Motivation ein Lernmanagementsystem zu nutzen, Anforderungen an das System

- einfache Handhabung für die Studenten/Dozenten
- Aushänge dezentral ersetzen
- zeitlich unbeschränkt zugänglich
- Gruppenbildung für Laborpraktika und Übungen wird erleichtert
- fehlerfreier Export der Studentendaten
- mit vorhandenen Systemen kompatibel z.B. hochschulweit ODIN, institutseigene Datenbank
- Verbindlichkeit für Anmeldungen erhöhen
- Open Source Project
- verbesserte Studieninformation ⇒ Ziel: Studienzeitverkürzung

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



#### Bild 4: Motivation und Anforderungen

Beispiele für Informationen, die die Studienzeiten verkürzen können, sind in **Bild 5** genannt. Dazu gehören sicherlich die guten alten Vorlesungsaushänge, die jedoch durch die Zentralität des neuen Mediums in Form einer Lernplattform eine deutlich verbesserte Zugänglichkeit und Aktualität erhalten. So muss kein Studierender mehr einen Anmeldungstermin verpassen. Zur Realität und der Gewöhnungsbedürftigkeit der Studierenden finden sich im Kapitel 2 Erfahrungen.



### Anwendung von StudIP am IMW

- seit WS 04/05 Testsystem an der TUC
- Anmeldung für Übungsgruppen, Seminare, u.ä.
- Benachrichtigung der Studierenden bei Aktualisierungen
- Aushang von Veranstaltungsinhalten, Übungsaufgaben, etc.
- Export von Studentendaten
- Verknüpfung mit LDAP

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



#### Bild 5: Anwendung



### Erfahrungen

#### Positiv:

- „zentrale“ Art der Anmeldung für Studierende
- Doppelseinträge in Gruppen sind vermeidbar
- unbefugtes Ein- und Austragen durch Dritte wird verhindert
- Gruppenmail erstellbar
- Aktualisierungen von Veranstaltungen einfach durchführbar
- bessere Planbarkeit von Lehrveranstaltungen
- zeitlich leichter handhabbar (Plätze kontingentieren)
- „Aushang“ von Übungsunterlagen möglich
- Kopieren von Veranstaltungen möglich

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



#### Bild 6: Positive Erfahrungen

Noch weiter hinterher tragen kann man aktuelle Informationen wie z.B. Vorlesungsverchiebungen durch die Nutzung des lehrveranstaltungsgebundenen Mailings, siehe auch **Bild 6**.

Die ersten Alltagserfahrungen an der TU Clausthal ergaben aber auch konkrete Einzelpunkte, die sich als vermeidbare Schwierigkeiten darstellen und in der zukünftigen Nutzung durch unterschiedliche Maßnahmen vermieden werden sollen. Der erste wesentlichste Punkt auch aus Studierenden-Sicht in **Bild 7** ist die momentan noch inselartige Nutzung innerhalb der Hochschule. Dieses soll aber in absehbarer Zeit durch einen organisatorischen Beschluss des Präsidiums und auf Fakultätsebene zum Hochschulstandard erhoben werden.



### Erfahrungen

#### Negativ:

- Konkurrierendes Anmeldeverfahren ⇒ Unsicherheiten bei den Studierenden ⇒ Lösung: campusweiter Einsatz
- Export: keine Auswahlmöglichkeiten aus vorhandenen Informationen
- Matrikelnummer ist keine Pflichtangabe
- kein Zugriff auf archivierte Veranstaltungen möglich
- unübersichtliche Listen u.a. durch unsichtbare Veranstaltungen, Gruppen
- stark gewöhnungsbedürftige Menüführung ⇒ intuitiv?!
- Kopplung ODIN ⇒ doppelte Pflege

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



#### Bild 7: Negative Erfahrungen

Neben der konsequenten hochschulweiten Einführung des LMS gibt es jedoch noch einige „Ecken“ an dem System, die die tägliche Anwendung in jedem einzelnen Institut betreffen und in **Bild 8** zusammengefasst sind. Besonders genannt werden sollte in diesem Zusammenhang die fehlende Zwangsabfrage nach der Matrikelnummer, was bei „Allerweltsnamen“ schnell zur datentechnischen Kollision von zwei Studierenden führen kann.



### Wünsche für die Zukunft (IMW)

- Verbesserung der Menüführung
- Problematik archivierte/unsichtbare Veranstaltungen
- Matrikelnummer als Pflichtangabe, dabei Überprüfung mit Datenbestand aus LDAP
- Kombination von Vorlesung und Übung
- Bestätigung des Empfangs von Vorbereitungsunterlagen wie z.B. Sicherheitsregeln
- Vereinfachung der Termineingabe bei unregelmäßige Veranstaltungen (z.B. Block) durch Kalenderauswahl o.ä.
- Übergabe von Studierenden in weiterführende Veranstaltungen

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



#### Bild 8: Wünsche auf der Ebene des IMW

### Wünsche für die Zukunft (TUC)

- Prüfungsanmeldung (intern, extern)
- Einbindung und Bereitstellung von Bescheinigungs- oder Prüfungsleistungen
- automatisierte Überprüfung von notwendigen Vorleistungen
- Übersicht offener Prüfungsleistungen (Studenten, Prüfungsamt)

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



Bild 9: Wünsche auf der Ebene der TU Clausthal

### Zusammenfassung

- erhöhter Aufwand in der Einführungsphase (Dozenten)
- campusweiter Einsatz wird benötigt
- grundsätzlich hohe Akzeptanz (Studierende)
- gute Schnittstelle zwischen der Präsenzlehre und eLearning-Angeboten
- erweiterter Studierendenservice

Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal



Bild 10: Zusammenfassung

## 2 Anwendererfahrungen

Bereits in der Testphase seit dem Wintersemester 2004/05 wurden die ersten Probleme sichtbar. Kommerzielle LMS sind in der Regel für den normalen semestralen Universitätsbetrieb ausgelegt. Das Intensivstudienprogramm „Maschinenbau/Mechatronik“ an der TU Clausthal nutzt zusätzlich die Vorlesungsfreizeiträume. Diese „Phasen“ ließen sich in StudIP zunächst nicht mit Veranstaltungen füllen. Nachdem diese Zeiträume freigegeben waren konnten Blockveranstaltungen dort terminiert werden. Eine ähnliche Unflexibilität des Systems zeigt sich beim Anlegen von Veranstaltungen, die nur einen Teil der Semesterlaufzeit nutzen. Das System akzeptiert nur ganzsemestrige Einträge, die nachträglich um einzelne Termine gekürzt werden können, Beispiele dafür sind unsere zeitlich in einem Semester geschachtelten TZ/CAD-Veranstaltungen. Weitere Probleme ergeben sich bei der studiengangswisen Kontingentierung von Lehrveranstaltungen. Die momentan erfreulich hohen Studierendenzahlen machen dieses Instrument

notwendig, um studienplankonforme Veranstaltungsbelegungen für möglichst viele Studierende zu erreichen. D.h. einige Studiengänge setzen die TZ-Kenntnisse gemäß Studienplan erst im dritten Semester voraus, so dass diese Studierenden die TZ-Kurse des schwächer belegten Sommersemesters nutzen können. Die Kontingentierung ist aber immer nur für jede Gruppe einzeln möglich, nicht übergreifend für alle. Daraus resultieren Probleme, da die auf den Studiengang anteilig vergebenen Plätze nicht innerhalb der Gruppen frei wählbar sind, sondern z.B. in jeder Gruppe nur 10% für einen Studiengang vorgesehen sind. Es muss also im Voraus in Erfahrung gebracht werden, zu welchen Zeiten für welche Studiengänge ein größeres Kontingent eingerichtet werden muss. Die Studierende können sich aber auch über die angelegte Kapazität hinaus in ihrer „Wunschgruppe“ eintragen und landen damit auf der entsprechenden Warteliste. Leider ist dies gleichzeitig in mehreren Gruppen möglich, ohne dass das Aufrücken in einer Gruppe vom System selbständig zur Löschung der übrigen Wartelisteneinträge führt. Eine Benachrichtigung der Teilnehmer beim Aufrücken aus der Warteliste erfolgt auch nicht.

Die Probleme, die aus der Übertragung aus unserer Uni-internen Vorlesungsdatenbank ODIN entstanden sind, wie das Überschreiben von Daten, etc. brauchen nicht weiter erörtert werden, da zwischenzeitlich beschlossen wurde, ODIN durch ein anderes System (HIS-LSF) zu ersetzen.

Probleme entstanden teilweise auch noch bei der Anmeldung für Erstsemester. Diese erhielten in manchen Fällen nicht rechtzeitig ihre RZ-Accounts mit denen sie erst Zugriff auf StudIP erhalten, um sich anzumelden. Ein letztes Manko ergibt sich daraus, dass noch nicht alle Institute dieses Anmeldesystem nutzen. Die Studierende sind dadurch noch nicht an das System gewöhnt und es kommt zu Irritationen zwischen erwarteten Papier-Anmeldelisten in Institutseingängen und den zwischenzeitlich abgelaufenen online-Anmeldefristen im LMS.

## Weiterentwicklung dualer Studienangebote im tertiären Bereich

Sambale, B.; Schäfer, G.; Wächter, M.

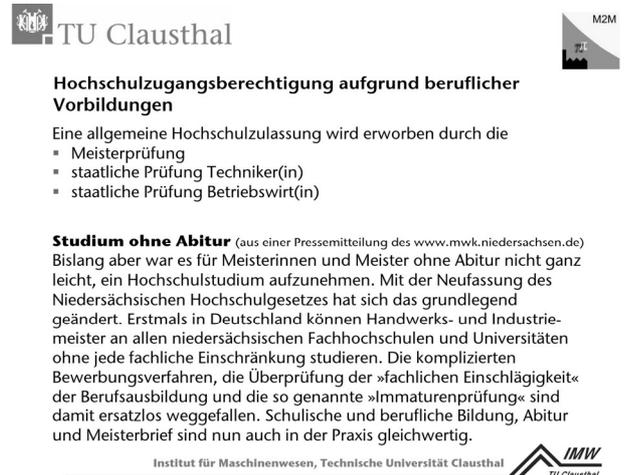
*Viele Weiterbildungsangebote sind nur auf die Bedürfnisse von Hochschulabsolventen ausgerichtet. Die im Rahmen des Projektes geplanten Studienangebote richten sich dagegen auch an Studieninteressierte ohne akademischen Abschluss und stellen durch die Einbeziehung des Kompetenzzugewinns durch die berufliche Praxis eine Innovation in der universitären Ausbildung dar. Die novellierten Hochschulgesetze stellen dazu die notwendigen Rahmenbedingungen bereit. Das Erarbeiten flexibler Curricula, sowie die Kombination des Wissenserwerbs durch universitäres Direkt- und Weiterbildungsstudium und Praxistätigkeit, eröffnen neue Wege für die Qualifizierung von Fachkräften für die Industrie. Die Aufgabe besteht in der Entwicklung von dualen universitären Masterstudienprogrammen im Bereich Maschinenbau / Mechatronik an den beteiligten Hochschulen.*

*Most of the adult higher qualification programs are orientated to academic labour. The planned course offers inside the borders of these project are also addressed to people, who are interested on studies without being graduated and produces a gain of competence through the inclusion of job experience. Therefor new regulations for the university law are delivering the basic conditions. The developing of flexible curricula as well as the combination of acquisition of knowledge by academic direct and further educational study and occupational activity*

### 1 Ausgangssituation

Die in den letzten Jahren erweiterten Hochschulzugangsmöglichkeiten gestatten es jetzt persönlich geeigneten und motivierten Studieninteressierten aus verschiedenen Vorbildungsniveaus heraus ein wissenschaftliches Hochschulstudium auf direktem Weg zu beginnen. D.h. es müssen nicht zwingend verschiedene Zwischenniveaus mit den entsprechenden Prüfungen und dem damit verbundenen zeitlichen Aufwand durchlaufen werden. Die länderspezifischen Hochschulgesetze sehen dazu jetzt geradlinigere Wege vor, wie sie in **Bild 1** z.B. für den Fall Niedersachsens auszugsweise dargestellt sind.

Das im Folgenden vorgestellte Projekt der Bundesländer-Kommission (BLK) verfolgt die Erstellung möglicher Studienangebote im Fach Maschinenbau/Mechatronik mit den neuen erweiterten Zu-



### Bild 1: Hochschulzugangsmöglichkeiten im NHG

gangsvoraussetzungen aus der beruflichen Praxis heraus. Dieser Ansatz integriert Komponenten des lebenslangen Lernens ebenso wie die Anrechnung von außeruniversitären informalen Qualifizierungen mit dem Ziel eines wissenschaftlichen Hochschulstudiengangs der nach den aktuellen Regeln akkreditiert werden soll. Damit könnte über die bisher schon zahlreich existierenden Fachhochschulangebote hinaus z.B. erstmalig aus der Meisterqualifikation heraus ohne Umwege die Qualifizierungsstufe eines Masterabschlusses TU Clausthal auf Niveau des Dipl.-Ing. (TU) erreicht werden. Als Acronym für diesen neuen Qualifizierungsweg vom Meister zum Master wurde die Kurzbezeichnung M2M gewählt. Um mit diesen Studienangeboten keinen Bruch in der beruflichen Beschäftigung zu erzeugen, ist ein Aufbau als duales Studienangebot mit Beteiligung der industriellen Praxis gewählt worden.

### 2 Anforderungen an moderne duale Studienangebote zur Weiterbildung

Der Forderung nach lebenslangem Lernen können die Hochschulen durch eine nachgeschaltete, integrierte Ausbildung im Rahmen von modularisierten akkreditierten Masterstudiengängen nachkommen. Wenn dabei die Möglichkeiten der Präsenzlehre, des E-Teachings bzw. E-Learnings und der be-

trieblichen Bildung genutzt werden, entstehen Modelle für integrierte, berufsbegleitende Studiengänge mit abschließender Qualifikation. Jede Hochschule kann hier individuelle Konzepte verfolgen, unter der Bedingung, dass ein übergreifendes Leistungspunktesystem, das eine Akkumulierung und den Transfer der studienbegleitenden Prüfungsleistungen auch auf nationaler Ebene zwischen den verschiedenen Bundesländern und gegebenenfalls den verschiedenen Hochschultypen ermöglicht, in die moderne wissenschaftliche Weiterbildung integriert wird. Eine Akkreditierung der Weiterbildung - in Form dualer Studienangebote - sowie des angestrebten Qualifikationszieles führt zu einer breiten Akzeptanz des innovativen berufsbegleitenden Wissenserwerbs.

Weiterbildungsangebote außerhalb der üblichen Semesterzeiten, z. B. auch in den Abendstunden und am Wochenende oder durch Blockveranstaltungen, bringen natürlich Veränderungen im Hochschulalltag mit sich, die zu berücksichtigen sind. Durch Nutzung von neuen Medien in der Bildung z. B. ist eine wünschenswerte zeit- und ortsunabhängige Verbreitung und Betreuung der Lehrmodule jeder einzelnen Hochschule bzw. der Unternehmen möglich.

Auf diese Weise können einführende Fachmodule bereits vor Aufnahme des vollen Studienbetriebs von den Interessierten absolviert werden. Dies hat zwei wesentliche Vorteile: Zum einen gewinnen die Studierenden eine realistische Einschätzung ihrer Studienmöglichkeiten, bevor sie Entscheidungen mit umfangreichen zeitlichen Auswirkungen treffen müssen. Zum anderen ist es so möglich, die Studieninteressierten aus den unterschiedlichen Vorbildungsrichtungen auf ein weitgehend angeglichenes Niveau vorzubereiten. So sind beispielsweise die Differenzen zwischen einem Feinmechanikermeister und einem Elektromechanikermeister frühzeitig angleichbar.

### 3 Ziel und Gegenstand des Projektes

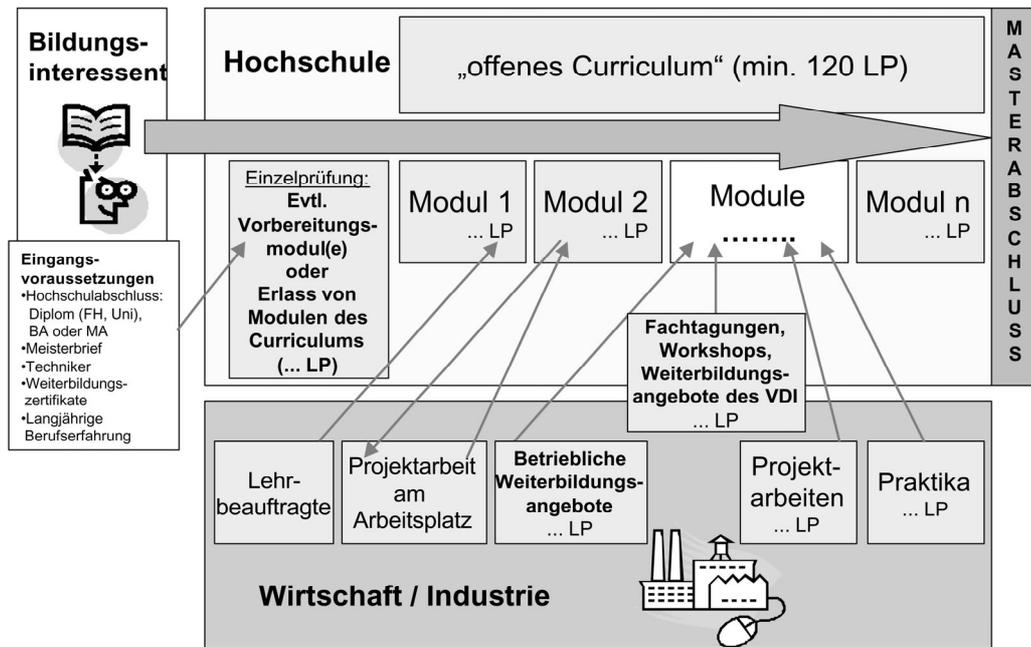
Berufliche oder am Arbeitsplatz erworbene fachliche und allgemeine Kompetenzen sollen durch Bewertung mit Leistungspunkten in die tertiäre wissenschaftliche Bildung einbezogen werden. Dabei kann es sich einerseits um die Erfüllung der Hochschulzulassungsberechtigung handeln (z. B. unter bestimmten Umständen ein Meisterbrief mit mehrjähriger Berufserfahrung als Zulassungsvoraussetzung für ein Masterstudium). Andererseits und ins-

besondere geht es dabei um eine Anerkennung von Teilleistungen im Rahmen der Curricula des Studiums.

Die Aufgabe besteht in der Entwicklung von dualen universitären Masterstudienprogrammen im Bereich Maschinenbau/Mechatronik unter Einbeziehung des Kompetenzzugewinns durch die berufliche Praxis der Studieninteressenten.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen stellen eine konsequente Weiterentwicklung schon bestehender Ansätze dar.

- Da sich das menschliche Wissen mittlerweile alle acht bis zehn Jahre verdoppelt, ist es unumgänglich, dass in regelmäßigen Abständen von ca. vier bis fünf Jahren der tatsächliche Bildungsbedarf ermittelt wird, um ein bedarfsgerechtes Weiterbildungsangebot aufzustellen. Laut aktuellen Umfragen liegen Schwerpunkte derzeit bei Kosten, Grundlagen sowie Methoden der Produktentwicklung, neuen Verfahren, Technologien und Werkstoffen sowie dem Projektmanagement. Fächerübergreifende Qualifikationen wie die zum Mechatroniker oder die Erweiterung bisheriger Verfahren und Methoden z. B. vom konventionellen über das Rapid bis hin zum virtuellen Prototyping erweisen sich in zunehmenden Maße als unumgänglich. Ein tertiäres Weiterbildungsangebot muss diesen Gesichtspunkten durch „offene Curricula“ Rechnung tragen, **Bild 2**.
- Gegenwärtig ist es so, dass Lehrbeauftragte aus der Industrie ihr Spezialwissen an Studierende weitergeben. Warum sollten diese Veranstaltungen nicht als modularisierte Bildungsangebote für Studierende, Lehrende und Berufstätige als Kompetenzzuwachs im Rahmen eines dualen Studienprogramms mit Leistungspunkten versehen und für einen Abschluss im Rahmen einer tertiären Weiterqualifikation akkumuliert werden? In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit Unternehmen direkt in die Aus- und Weiterbildung mit eingebunden werden können. Die Einbeziehung der Unternehmen betrifft dabei nicht nur deren Mitwirkung an Weiterbildungsmodulen sondern schließt auch die Initiierung und Betreuung industrierelevanter Projektarbeiten ein.
- Im Rahmen von fachbezogenen Tagungen und Workshops bietet die Hochschule der Industrie ihr Wissen an. Werden solche Veranstaltungen als anerkannte Module für ein angestrebtes uni-



**Bild 2:** Curriculumsaufbau für duale Studienangebote

versitäres Qualifikationsziel akkumuliert, so erhöht dies die Akzeptanz sowohl von Seiten der Industrie als auch der Hochschulen.

Auf den Erfahrungen mit existierenden Aufbau-, Ergänzungs- und Weiterbildungsstudiengängen aufbauend können durch Modularisierung und Anwendung eines Leistungspunktesystems flexible und individuelle duale Studienangebote aufgestellt werden. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Bewertung des persönlichen Eingangsprofils zu legen. Dies meint, dass bei feststehendem akkreditiertem Ausbildungsziel und -umfang aufgrund unterschiedlicher Eingangsqualifikationen ein persönlicher Studienplan ausgearbeitet wird. Der persönliche Studienplan garantiert einerseits das angestrebte Qualifizierungsziel bei andererseits vollständiger Berücksichtigung des persönlichen Vorbildungsstandes im Sinne einer verkürzten Studiendauer.

Die dualen Bildungsangebote fördern den Wissenstransfer von der Hochschule in die Unternehmen und vom Unternehmen in die Hochschule. Die Einbindung der Kompetenzzentren „Hochschule“ in die erwünschte tertiäre Qualifikationsnachfrage der regionalen Wirtschaft könnte gerade in strukturschwachen Gebieten Synergieeffekte für Hochschule und Unternehmen durch bessere Auslastung der vorhandenen Einrichtungen bringen.

#### 4 Notwendige Arbeiten aus Sicht des Projektes

Die zuvor beschriebenen dualen Weiterbildungsangebote, mit dem Ziel einen Studienabschluss an einer wissenschaftlichen Hochschule zu erreichen, und deren Realisierungsmöglichkeiten werden an der TU Clausthal vom IMW im Rahmen eines BLK-Projekts in Kooperation mit der TU Ilmenau bearbeitet. Das Projekt ist im Lauf des Jahres 2005 gestartet worden und verfolgt dazu die nachstehenden Arbeitspunkte.

##### 4.1 Ermittlung des Bildungsbedarfs

Bei der Ermittlung des Bildungsbedarfes muss man die allgemeine Entwicklung des künftigen Ingenieurbedarfs sowie die demografischen Gegebenheiten und die sich daraus ableitenden Anforderungen zum lebenslangen Lernen berücksichtigen.

Nach einer VDI-Studie von 2003 droht dem deutschen Mittelstand Ingenieurmangel. Dieses wird danach für die Zukunft als Innovationsbarriere Nummer 1 gesehen, gefolgt von Führungskräfte-mangel allgemein, gesetzlichen Rahmenbedingungen, zu wenig Kooperation mit anderen Partnern (z.B. Hochschulen), erst an letzter Stelle werden zukünftig Finanzierungshemmnisse Innovationen blockieren. Wobei die kleinen und mittelständischen Unternehmen in Deutschland mit 99% aller Firmen nicht nur zahlenmäßig führend sind, sondern auch etwa drei Viertel aller Arbeitsplätze in Deutschland bereitstellen.

Hier müssen moderne Weiterbildungskonzepte ansetzen und Kaufleute, Naturwissenschaftler, Informatiker und sonstige Arbeitnehmer auf den Gebieten Forschung, Entwicklung und Konstruktion qualifizieren. Zunehmend in der Praxis gefragt sind dabei fachgebietsübergreifende Hybrid- oder Querschnittsqualifikationen.

#### **4.2 Ausarbeiten der Curricula nach Inhalt und Struktur**

Auf Grundlage des präzisierten Bildungsbedarfs sowie der differenzierten Vorkenntnisse der Weiterbildungsbildenden sind flexibel anpassbare Curricula zu entwickeln. Angestrebt wird im Sinne der Studieninteressierten eine Minimierung des Aufwandes beim Erwerb der für eine zu leistende Arbeit erforderlichen Qualifikation. Ausgehend von der angestrebten Zielqualifikation und den Vorkenntnissen der oder des Studierenden sind die nötigen Lehrmodule zu ermitteln. Aufgabe des Projektes wird es sein, Kriterien oder andere geeignete Hilfsmittel zu erarbeiten, die eine Beurteilung der Situation und die Auswahl der Module unterstützen. Ebenso müssen beim Bestimmen und Ausarbeiten der Lehrinhalte (Lehrmodule) die beim Studierenden erforderlichen Vorkenntnisse präzise ausgewiesen werden.

#### **4.3 Bestimmen der Lehrleistungen der Universitäten und der Industrie**

Hierbei ist zu prüfen, inwieweit die Industrie als Partner in die universitäre Weiterbildung mit eingebunden werden kann. Denkbar sind hier Vorlesungen über Praxiserfahrungen, Praktika in Unternehmen bis hin zur Vergabe und Betreuung betrieblicher Studienarbeiten.

#### **4.4 Konzept für ständige Anpassungen an den tatsächlichen Weiterbildungsbedarf**

Aufgrund der geschilderten dynamischen Entwicklung sind die Weiterbildungsangebote stetig an die tatsächlichen Erfordernisse anzupassen. Hierzu sind Wege aufzuzeigen, die trotz wechselnder Studieninhalte eine gleichbleibend hohe Qualität der Weiterbildung absichern. Dieser Punkt ist besonders im Kontext der angestrebten Akkreditierung zu diskutieren.

#### **4.5 Erarbeiten der Lehrunterlagen**

Die benötigten Lehrmaterialien sind zu ermitteln und die Erstellung der bisher nicht vorliegenden Materialien zu planen und zu organisieren. Für die im letzten Absatz von Punkt 2 genannten propädeutischen Module sind aufgrund ihrer autodidaktischen Zielstellung in der wissenschaftlichen Eingewe-

öhnungsphase besondere Anforderungen von den Lehrunterlagen zu erfüllen.

Als Lehrmaterialien für Präsenz- und Teleteaching-Veranstaltungen können bereits vorhandene Materialien herangezogen werden, die zu überarbeiten bzw. um multimediale Komponenten zu ergänzen sind. Nicht vorhandene Lehrmaterialien, insbesondere zu aktuellen Themen und Forschungsergebnissen, sind gänzlich neu zu erstellen.

#### **4.6 Akkreditierung des Studienganges**

Es ist eine Akkreditierung der dualen Studienangebote abzusichern. Dazu ist eine frühzeitige Kontaktaufnahme mit der Akkreditierungsagentur erfolgt. Die projektbegleitende Einbindung der Akkreditierungsagentur ist zwingend notwendig um die einzelnen Projektschritte zeitnah zu validieren und notwendige Korrekturen im Lösungsweg einarbeiten zu können. Als Ergebnis des ersten Gesprächs ergab sich die gemeinsame Einschätzung des Projekts als: „aus den gesetzlichen (NHG) Randbedingungen heraus notwendig und sehr innovativ“. Die Notwendigkeit ergibt sich aus den faktisch bestehenden Hochschulzugangsberechtigungen aus dem gewerblichen Beschäftigungsbereich heraus. Insgesamt sehr innovativ ist das Projekt vor dem international noch nicht gefestigten Hintergrund der Umstellung auf Bachelor-/Master-Abschlüsse.

### **5 Vorarbeiten**

Die Kooperationshochschulen arbeiten bereits seit 1998 auf dem Gebiet der Flexibilisierung der studentischen Ausbildungswege im Rahmen der BLK-Modellversuche „Modularisierung“ (<http://www.tu-ilmeneau.de/blk>) und „Leistungspunktesystem an Hochschulen“ (<http://www.tu-ilmeneau.de/lps>). Mit einer nachhaltigen Förderung des Multimedia-Einsatzes in Lehre, Studium und Weiterbildung hat das Land Niedersachsen ein eLearning Academic Network (ELAN) aufgebaut und damit ein Szenario von alltagstauglichen multimedialen und telematischen Studienangeboten umgesetzt (<http://video.tu-clausthal.de/vorlesungen/>).

### **6 Zusammenfassung**

Duale Studienangebote im tertiären Bereich stellen eine deutliche Stärkung der persönlichen Innovationskraft durch Mitarbeiter-Weiterbildung in den überwiegend mittelständischen Unternehmen dar. Der akkreditierte Studienablauf mit Anerkennung individueller Eingangsqualifikationen führt zu einer hoch effektiven Qualifizierungsmöglichkeit.

## **Konstruktion und Simulation mit Pro/ENGINEER – CAD im Hauptstudium am Institut für Maschinenwesen**

Guthmann, A.

*Nach der erfolgreichen Umstrukturierung der CAD-Lehre des Instituts für Maschinenwesen (IMW) zum Wintersemester 2004/2005, erfolgte zum Wintersemester 2005/2006 eine Anpassung des Lehrangebotes für die Studenten des Hauptstudiums. Im Folgenden wird ein kurzer Einblick in die neu gestaltete Ausbildung gegeben.*

*After restructuring the CAD education of the Institut für Maschinenwesen (IMW) in the winter term 2004/2005 successfully, the offered courses for students in the main degree was adjusted for the winter term 2005/2006. Below a short insight into the newly designed structure will be given.*

### **1 Einleitung**

Zum Wintersemester (WS) 2004/2005 wurde die CAD-Lehre des Instituts für Maschinenwesen dahingehend umgestellt, dass Studenten bereits in den ersten Semestern im Rahmen des Technischen Zeichnens das 3D-CAD-System Pro/ENGINEER „Wildfire 2.0“ kennen und handhaben lernen. Studenten des Maschinenbaus vertiefen die Grundkenntnisse im Rahmen der Veranstaltung Konstruktionselemente, indem sie die Konstruktionsübungen mit Pro/ENGINEER absolvieren [1].

Nach dieser sehr erfolgreichen und von den Studenten gut angenommenen Umstrukturierung erfolgte zum WS 2005/2006 eine Anpassung des IMW-Lehrangebotes für das Hauptstudium. Das bis zum WS 2004/2005 bestehende Pro/ENGINEER-Praktikum des Hauptstudiums beschäftigte sich zum größten Teil mit den gleichen Inhalten, wie sie den Studenten seit einem Jahr im Vordiplom vermittelt werden. Es wurde Grundlagenwissen zur Bauteil und Baugruppenerstellung vermittelt sowie die Generierung von technischen Zeichnungen erläutert. Aus diesem Grund wurde beschlossen, im Hauptdiplom ein Praktikum anzubieten, welches interessierten Studenten die Möglichkeit bietet vorhandene Kenntnisse zu vertiefen. Voraussetzung zur Teilnahme am Praktikum „Konstruktion und Simulation mit Pro/E“ sind die Grundkenntnisse aus dem Vordiplom.

### **2 Inhalt, Aufbau und Ziel des Praktikums**

Ziel des Praktikums ist es, den Studenten Wissen über die Möglichkeiten der Bewegungssimulation und der FE-Berechnung mit Pro/ENGINEER zu vermitteln und eigenständiges Arbeiten mit dem Programm zu fördern.

Um die Eigenständigkeit im Umgang mit Pro/ENGINEER zu erreichen, ist das Praktikum anders aufgebaut als die Kurse im Vordiplom. Das Praktikumsskript ist als eine Sammlung von Tipps und Hinweisen zu verstehen, die dem Anwender die Arbeit erleichtern sollen. Es wird nicht wie im Vordiplomkurs jeder für die Bauteil- oder Baugruppenerstellung notwendige Arbeitsschritt aufgeführt und ausführlich erklärt. Lediglich die im Skript enthaltenen Übungsbeispiele erklären ausführlich neue, den Studenten aus den Vordiplomkursen nicht bekannte, Arbeitstechniken.

Das Praktikum ist in vier Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase sollen von den Studenten selbständig Bauteile modelliert werden, die in der zweiten Phase, nach Bearbeitung der dazugehörigen Übungsaufgaben, zu Baugruppen zusammengesetzt werden, die entsprechen ihrer Funktion Bewegungen ausführen. Die dritte Phase des Praktikums beschäftigt sich mit der FE-Betrachtung einzelner Bauteile, nachdem auch hierbei das notwendige Wissen in Übungsaufgaben vermittelt wurde. In der vierten Phase sollen die Studenten ihre Einzelbaugruppen zu einer Gesamtbaugruppe zusammensetzen, wobei eventuell Veränderungen an Einzelkomponenten oder sogar Neukonstruktionen erforderlich werden.

Zu Beginn des Praktikums sollen sich kleine Gruppen aus jeweils drei Studenten bilden. Die Mitglieder dieser Dreiergruppen sollen sich während des Praktikums gegenseitig unterstützen, ihr Wissen austauschen und dadurch erweitern.

Jedes Mitglied der Dreiergruppe erhält zu Beginn des Praktikums den Zeichnungssatz einer Komponente eines Antriebsstranges. Ein Teilnehmer bearbeitet ein Getriebe, ein Zweiter eine Kupplung und der dritte Teilnehmer einen Motor. Zunächst soll jeder Dreiergruppenteilnehmer die Einzelteile

„seiner“ Antriebsstrangkomponente erstellen. Im Skript sind für diesen Praktikumsabschnitt keine Hinweise zu finden, da die notwendigen Kenntnisse aus dem Vordiplom vorhanden sind. Schwierigkeiten sollen die Gruppenmitglieder untereinander beraten und beheben. Dieses soll einer zusätzlichen Wissenserweiterung dienen. Selbstverständlich werden die Praktika von Assistenten und studentischen Hilfskräften begleitet und betreut, so dass auch dort Fragen geklärt werden können. **Abbildung 1** zeigt beispielhaft ein für das Getriebe zu erstellendes Zahnrad.

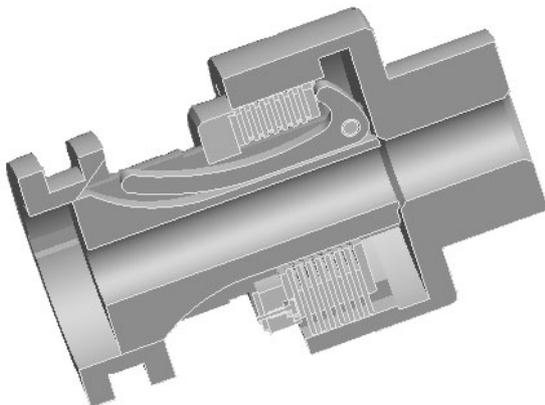


**Abbildung 1:** Beispiel für ein Einzelteil

Im nächsten Schritt werden in Übungsaufgaben verschiedene Möglichkeiten der Bewegungssimulation mit Pro/ENGINEER vorgestellt. Die hierfür notwendigen Bauteile sind für die Studenten vorgefertigt.

Anschließend sollen die Studenten ihre Antriebsstrangkomponente entsprechend den Vorgaben beweglich zusammenbauen, wobei im Skript ein Vorschlag zur Vorgehensweise enthalten ist.

**Abbildung 2** zeigt einen Schnitt durch die Kupplungsbaugruppe.



**Abbildung 2:** Schnitt durch die Kupplung

Nachdem die einzelnen Antriebsstrangkomponenten erstellt worden sind, wird im Skript anhand von Übungsbeispielen der Umgang mit dem FE-

Berechnungswerkzeug Pro/MECHANICA vorgestellt. Anschließend sollen die Studenten die Beanspruchungen in ein Einzelteil ihrer Antriebsstrangkomponente bestimmen. Anhand dieser Aufgabe soll jedoch nur eine weitere Möglichkeit von Pro/ENGINEER aufgezeigt werden. Tiefgreifende FEM-Kenntnisse sollen nicht erlangt werden, dafür wird ein eigenständiges FEM-Praktikum angeboten. **Abbildung 3** zeigt das FE-Modell eines Pleuels des Motors.



**Abbildung 3:** FE-Modell des Pleuels

Den letzten Teil des Praktikums müssen alle drei Teilnehmer der kleinen Gruppen gemeinsam bewältigen. Aus den Einzelkomponenten soll ein Antriebsstrang zusammengesetzt werden. Da die Einzelbaugruppen hierfür nicht vorbereitet sind, müssen Umkonstruktionen oder sogar Neukonstruktionen angestrengt werden, welche von den Studenten in Eigenregie erarbeitet werden müssen. Das Skript bietet für diesen letzten Praktikumsteil, der als Bonuspunkt in die Bewertung eingeht, keine Hilfestellung an.

### 3 Zusammenfassung

Das neu gestaltete Praktikum „Konstruktion und Simulation mit Pro/E“ soll dazu dienen, den Studenten durch selbständiges Arbeiten ohne explizite Anweisung einen tieferen Einblick in die Möglichkeiten von Pro/ENGINEER zu geben. Die Arbeit in Gruppen soll zum einen die Teamfähigkeit fördern zum anderen dazu dienen, eine Wissenserweiterung durch Wissensaustausch mit anderen Studenten zu erzielen.

### 4 Literatur

- /1/ Guthmann, A.: Neugestaltung der CAD-Lehre am Institut für Maschinenwesen unter Verwendung von Pro/ENGINEER Wildfire®. Institutsmitteilung 29, IMW, Clausthal 2004

## Doppeldiplom Maschinenbau Ein Besuch von Clausthaler Studenten an der AGH Kraków

Rolshofen, W.; Korte, T.; Ring, C.

*Da das Tätigkeitsfeld des Maschinenbauingenieurs vielfältig und international geprägt ist, bietet die TU Clausthal und die Berg- und Hüttenakademie Krakau mit einer Anschubförderung durch den DAAD den Studiengang Maschinenbau mit binationalem Abschluss an. Um den Clausthaler Studenten einen persönlichen Eindruck zu ermöglichen, hat das Institut für Maschinenwesen zusammen mit den polnischen Partnern eine Exkursion nach Krakau organisiert, deren Verlauf im Bericht beschrieben wird.*

*Due to the field of activity for a mechanical engineer, which are manifold and international, Technical University of Clausthal and the academy for mining and metallurgy Cracow offer a binational course of study promoted by the DAAD. In order to enable Clausthal's students to have a personal impression, the institute for mechanical engineering together with the polish partners organised an excursion to Cracow, what is described in this article.*

### 1 Binationaler Studiengang

Die Technische Universität Clausthal (TUC) und die Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie (AGH, Berg- und Hüttenakademie Krakau) bieten den Studiengang Maschinenbau mit binationalem Abschluss jetzt bereits seit fünf Jahren erfolgreich an. Die Idee und Anschubfinanzierung zu diesem Studienangebot kam vom Deutschen akademischen Austauschdienst (DAAD). Weitere Informationen zu diesem Studienangebot finden sich unter: <http://www.imw.tu-clausthal.de/inhalte/studium/-studieninfo/DOPPELDIPLOM/index.html>

#### 1.1 Das Studium

Nach sechs Semestern Studium an der Heimat-hochschule besuchen die Studierenden für zwei bis drei Semester Lehrveranstaltungen an der Partnerhochschule. Die Diplomarbeit ist im 10. Semester zu schreiben und wird von den Professoren beider Hochschulen gemeinsam betreut und bewertet.

#### 1.2 Die Partnerhochschule

Die Berg- und Hüttenakademie Krakau ist eine der größten und ältesten Hochschulen in Polen. Sie wurde 1919 gegründet und bildet heute ca. 20.000 Studierende aus. Die Akademie besteht aus 14 Fakultäten, darunter Maschinenbau und Robotik, welche der Partner des ehemaligen Clausthaler Fachbereichs Maschinenbau ist, der durch das Institut für Maschinenwesen (IMW) in diesem Doppeldiplomprogramm vertreten wird.

In der Vergangenheit sind schon viele polnische Studenten nach Clausthal gekommen, um dort den gemeinsamen Abschluss Diplom-Ingenieur zu erwerben und ihre Deutschkenntnisse zu vertiefen. Damit mögliche deutsche Vorurteile gegenüber dem Lebensstandard in Polen abgebaut werden oder Ängste bzgl. Sprache und Verständigung zerstreut werden, hat sich eine Gruppe aus Studenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern auf den Weg an die Partnerhochschule gemacht. Unter der Leitung von Dr. Schäfer (TUC) und Dr. Pajak (AGH) besuchte eine Gruppe von 17 Teilnehmern zwischen dem 15.05. und 22.05.2005 die „heimliche“ polnische Hauptstadt. Im Folgenden werden die Impressionen dieser Exkursion wiedergegeben.

### 2 Impressionen in chronologischer Reihe

#### Sonntag, 15.05.2005

Der Treffpunkt zur Abfahrt wurde auf den Bahnhof in Goslar verlegt, da die Abreise aus Clausthal zu früh für die öffentlichen Verkehrsmittel an einem Sonntagmorgen stattfand. Nach einer gemütlichen Zugfahrt mit einigen Spanienurlaubern ging es per Flugzeug nach Katowice. Der Transport nach Kraków erfolgte anschließend in einer beschaulichen Busfahrt.

Als dann alle Zimmerschlüssel verteilt waren, stand eine erste Stadtbesichtigung mit mancher Überraschung auf dem Programm. Der eine freute sich alte Bekannte wieder zu treffen, der nächste war glücklich über ein deutsches Bankhaus direkt am Marktplatz und alle Teilnehmer lächelten dem Trompeter auf dem Turm der Mariacki-Kirche (s. **Bild 1**) zu.

### Montag, 16.05.2005

Nach den anfänglichen Eindrücken stand der erste Kontakt mit den Vertretern der AGH auf dem Programm. Zuerst erfolgte eine Begrüßung durch Herrn Prof. Antoni Kalukiewicz (Dekan der Fakultät für Mechanische Verfahrenstechnik und Robotik), der zugleich auch die Einrichtungen der Fakultät vorstellte.

Anschließend waren die Teilnehmer zu einigen sehr interessanten Vorlesungen des Fachbereichs eingeladen. Diese handelten von „Mechatronik und Robotik“ (Prof. Tadeusz Uhl), sowie „Betriebsfestigkeit und Konstruktionslehre“ (Dr. Bogdan Ladecki), als auch „Seilbahntransport“ (Prof. Andrzej Tytko) und „Digitale Regelungssysteme und Signalübertragung“ (Prof. Janusz Kwasniewski).



**Bild 1:** Mariacki-Kirche auf dem Marktplatz.

Schon zu diesem Zeitpunkt war zu spüren, dass die Hochschulgruppe aus Clausthal willkommen war, da sie mit offenen Armen auf eine sehr herzliche Art durch die polnischen Gastgeber empfangen wurde.

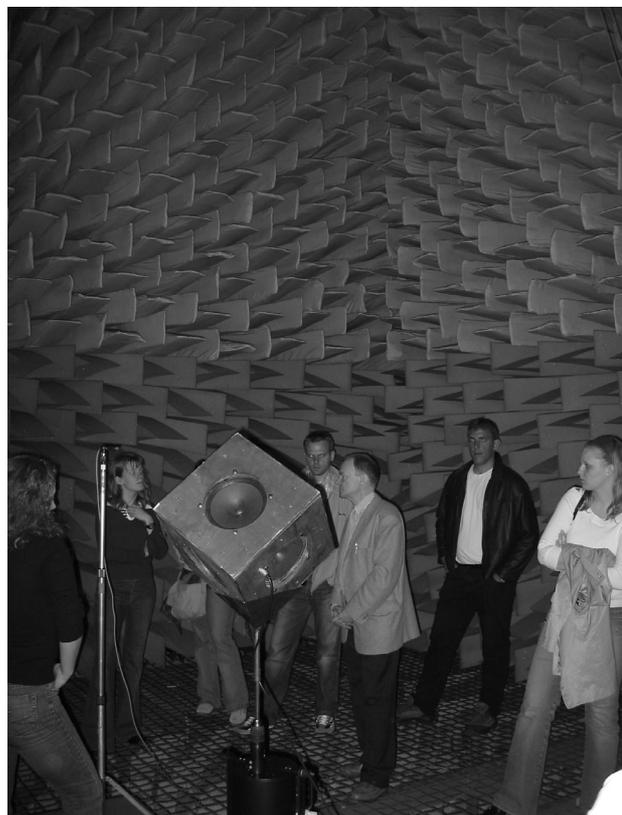
Nun stand nach der Stärkung des Geistes, die des Leibes an. Die Vertreter der AGH ließen es sich nicht nehmen, dass wir täglich zum leckeren Essen in der Mensa eingeladen wurden. Hier sei nur die

vorzügliche Suppe erwähnt, die mancher Teilnehmer gerne wieder essen würde.

Um ein gegenseitiges Kennen lernen der Studenten zu ermöglichen, haben sich einige polnische Studenten des Doppeldiplomstudienganges bereit erklärt, eine Stadtführung und eine Besichtigung eines Wohnheims durchzuführen. Zuerst ging es zum Marktplatz (Rynek Główny) und von dort zum Schlossberg Wawel.

### Dienstag, 17.05.2005

Neben dem persönlichen Eindruck gewannen die Teilnehmer einen Einblick in die Einrichtungen und Ausstattung der jeweiligen Institute. Hierzu fand ein Rundgang statt, der im „Bergbau-Stollen“ begann, wo der Einsatz von Bergbaumaschinen erläutert wurde. Anschließend ging es zu den Prüfständen der Automatisierungstechnik. Dort wurde u.a ein Schachspiel-Roboter und ein Hydraulik-Prüfstand vorgeführt. Die nächste Station war ein Seilprüfstand im Institut für Seilbahntransport, das jedes Jahr die Nachprüfung für die Seilbahn nach Kasprowy Wierch (Hohe Tatra) durchführt (s. Samstag, 21.05.2005). Zu dem Institut für Mechanik und Vibroakustik gehört ein riesiger, schalltoter Raum (s. **Bild 2**), ein Raum mit nicht parallelen Wänden und ein professionelles Tonstudio.



**Bild 2:** Schalltoter Raum für akustische Versuche.

Durch gute Industriekontakte besitzt das Institut für Robotik zahlreiche Roboter, die für den industriellen Einsatz geeignet sind. In Praktika erhalten Studenten die Möglichkeit, die Steuerung dieser Geräte zu erlernen, was uns vorgeführt wurde.

Während des Aufenthaltes der Clausthaler Besucher fand ein wissenschaftliches Festival in Kraków statt, bei dem auch die AGH vertreten war. Im Rahmen dieses Festes wurde u.a. ein Konstruktionswettbewerb für Studenten (s. **Bild 3**) und ein Plenarvortrag zum Thema „Nanotechnologie“ abgehalten.

Nachmittags gab es neben der Studienberatung für die Studierenden des Doppeldiplomprogramms einen Vortrag eines Absolventen dieses Studienganges. Er hatte eine industrielle Diplomarbeit in Deutschland durchgeführt und berichtete darüber vor unserer Gruppe und seinen polnischen Kommilitonen.



**Bild 3:** Studenten während eines Konstruktionswettbewerbes.

### Mittwoch, 18.05.2005

Dieser Tag stand ganz im Zeichen einer Firmenbesichtigung. Es wurde ein amerikanischer Automobilzulieferer (DELFI) besucht, der in der Nähe von Kraków ein neues Werk errichtet hat. Hauptsächlich werden dort Stossdämpfer und Ventile in einer eigenen Forschungs- und Entwicklungsabteilung konstruiert und produziert. Zahlreiche Absolventen des Maschinenbaus an der AGH haben dort einen Arbeitsplatz gefunden. Der Altersdurchschnitt der Mitarbeiter ist sehr jung und liegt bei ca. 30 Jahren.

Auf dem Weg wurde eine Pause eingelegt, um die Aussicht auf Kraków zu genießen. Hierfür sind wir auf einen der umliegenden Hügel der Stadt gefahren, der zu Ehren des Freiheitskämpfers Tadeusz Kosciuszko errichtet wurde.

### Donnerstag, 19.05.2005

Neben dem Austausch fachbezogener Kenntnisse und der studentischen Begegnung sollte auch ein landeskundlicher Einblick gewonnen werden.



**Bild 4:** Wachturm im Konzentrationslager Auschwitz.

Das Verhältnis zwischen polnischen und deutschen Staatsbürgern war nicht immer einfach; manches Mal getrübt durch Missachtung der Menschenrechte. Um aus Fehlern der Vergangenheit zu lernen, sollte sich mit den Umständen, die dazu führten, beschäftigt werden. Aufgrund dessen wurden auch die Konzentrationslager Auschwitz (s. **Bild 4**) und Birkenau besucht. Obwohl dieser Besuch nicht leicht zu verarbeiten ist, so sprach später jeder davon, dass auch dies zu einer solchen Exkursion gehört.

Bevor am Abend das jüdische Stadtviertel Kazimierz besichtigt wurde, stand noch ein Ausflug in die Salzgrube von Wieliczka an. Das Salzbergwerk gehört zu den ältesten der Welt und ist laut



**Bild 5:** Die Seilbahnstation Kasprowy Wierch.

UNESCO ein Weltkulturerbe. In früheren Jahrhunderten sorgte der Salzhandel für den Reichtum Krakóws, u.a. konnten dadurch die Baukosten für das Schloss Wawel bezahlt werden. Heute kommen die Besucher, um die Kunstwerke aus Salz der Bergleute zu besichtigen.

#### **Freitag, 20.05.2005**

Dieser Tag stand zur freien Verfügung, damit jeder individuell auf Entdeckungsreise gehen konnte. Manche sind erneut an der Universität gewesen, andere haben die sozialistische Trabantenstadt Nova Huta besucht oder andere haben in der Vielzahl der kleinen Gassen versucht, die geheimnisvolle Ausstrahlung der Stadt zu entschlüsseln.

#### **Samstag, 21.05.2005**

Als Student am höchsten Hochschulstandort Deutschlands ist man an große Höhen gewöhnt, doch der Anblick der Berge im Gebirge „Hohe Tatra“ versetzt jeden in Staunen. Startpunkt war das als Wintersportort bekannte Zakopane. Dort ging es mit der Seilbahn nach Kasprowy Wierch (s. **Bild 5**), wo bei strahlendem Sonnenschein, die Fernsicht alle Strapazen der Reise vergessen ließ. Der Blick auf die schneebedeckten Gipfel stellte nicht nur topographisch einen Höhepunkt der Exkursion dar. Was als Studienexkursion zu einem binationalen Studienprogramm vorgesehen war, konnte hier oben auf dem Gipfel unter amerikanischer Beteili-

gung mit einer internationalen Diskussionsrunde erweitert werden.

#### **Sonntag, 22.05.2005**

Nach einer erlebnisreichen Woche endete die Exkursion mit der abendlichen Ankunft am Bahnhof in Goslar.

### **3 Zusammenfassung**

An erster Stelle sei hier ein Wort des Dankes an Herrn Dr. Pajak gerichtet, da er sich viel Mühe bei der Organisation der Exkursion gegeben hat und stets um das Wohl aller Teilnehmer bemüht war.

Alle Clausthaler Teilnehmer waren beeindruckt von den Instituten der AGH, der Aufgeschlossenheit der Mitarbeiter und der Schönheit der heimlichen Hauptstadt Polens. Manches Vorurteil hat sich in Luft aufgelöst und viele Exkursionsteilnehmer sind sich sicher, dass dies nicht ihr letzter Besuch in Kraków war. Es bleibt einzig nur die Hoffnung, dass die Partnerschaft von beiden Seiten, AGH Kraków und TU Clausthal, weiterhin unterstützt und vertieft wird.

**dziękuję bardzo**

**Danke schön!**

## Herstellung eines Lehrfilms am IMW zum DMS-Messtechnik-Praktikum

Söver, A.

Heutzutage werden Dehnmessstreifen (DMS) ständig von Ingenieuren und Wissenschaftlern für Neuentwicklungen und Experimente eingesetzt. Ebenfalls sind sie Basiselemente für Sensoren und Aufnehmer. Anwendungsgebiete für DMS können die Ermittlung von Belastungen und Beanspruchungen an Maschinenteilen, Gebäuden, Tragwerken, Druckbehältern und anderen Apparaten sein. Seit drei Jahren wurde jedes Wintersemester ein Praktikum über die Dehnmessstreifen-Messtechnik nach der Richtlinie VDI/VDE 2635 am Institut für Maschinenwesen (IMW) durchgeführt. Während des letzten Praktikums WS 04/05 wurde u.a. ein professioneller Lehrfilm aufgezeichnet, der zur Unterstützung der nächsten Veranstaltungen gedacht ist.

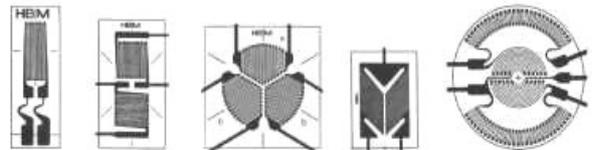
*Strain gages are nowadays constantly used by engineers and scientists for research and experiments. They are also basis elements for different sensors. Application areas for strain gages are strain measurements at machine parts, buildings, structures, pressure vessel and other installations. For three years, a practical training about strain gage applications and strain gages measurements was carried out according to VDI/VDE 2635 guideline at the Institute for Mechanical Engineering (IMW). During the last practical course (WS 04/05,) a professional film was made, which supports future lectures.*

### 1 Vorwort

Dehnmessstreifen ermöglichen die experimentelle Bestimmung von mechanischen Beanspruchungen, welche durch die rechnerische Methode nicht genügend genau ermittelt werden können.

Der DMS besteht aus einem metallischen Messgitter, das aus einer isolierenden Tragfolie aus Kunststoff ausgeätzt wird. Das Messgitter wird mit elektrischen Anschlüssen versehen. Die Dehnmessstreifen sind fast gewichtslos und verursachen kaum Rückwirkungen auf das Messobjekt/1/. Sie lassen sich leicht anbringen und sind für Langzeit-

messungen ebenso geeignet wie für schnell veränderliche Vorgänge.



**Bild 1:** Beispiele für Folien-DMS (HBM)

Die gesuchten mechanischen oder physikalischen Größen, können aus der Dehnung durch Wahl geeigneter DMS Geometrien ermittelt werden, **Bild 1**.

Messapplikationen mit Dehnmessstreifen sind anspruchsvolle Aufgaben. Aus diesem Grund sind für einen erfolgreichen Einsatz und die Benutzung von DMS Schulungen und Beratung notwendig, welche u.a. vom IMW angeboten werden.

### 2 Praktikumsinhalt

Das Praktikum zur Dehnmessstreifen-Messtechnik wird von Studenten sehr gut angenommen, deshalb fand es im Wintersemester 2004/2005 zum dritten Mal im IMW statt. Das Praktikum wurde nach Richtlinie VDI/VDE 2635 unter der Leitung von Professor Stefan Keil (anerkannter Prüfer nach VDI/VDE/GESA 2636) durchgeführt und es bestand auf folgenden Kursen /2/:

**Kurs 1:** Installation von DMS

**Kurs 2:** DMS-Instrumentierung

**Kurs 3:** Experimentelle Belastungs- und Beanspruchungsanalyse mit DMS

**3a:** Ingenieurgrundkurs

**3b:** Ingenieuraufbaukurs

Um ein praktisches Gefühl zu bekommen und die Theorie besser zu verstehen, führen die Studenten während des Praktikums Versuche mit Linear- und Rosettenmessstreifen durch.



**Bild 2:** Praktikumstage (WS 04/05)

## 2.1 Praktikumsablauf

In einem viertägigen Seminar werden den Studenten die Grundlagen, die Anwendung und die Theorie des DMS-Verfahrens und der Messtechnik vorgestellt.

Mit Hilfe von Multimedia-Präsentationen wird den Studenten schrittweise die Vorbereitung der Messstelle, Vorbereitung des DMS, Kleben des DMS mit drei verschiedenen Kleber (Z 70, X 60 und EP 310), Brückenschaltung und Signalverarbeitung mit analog und digital Messverstärkern erläutert, **Bild 3**.

Ziel des Praktikums ist, dass die Studenten mit Hilfe von DMS die Beanspruchung an verschiedenen Proben selber ermitteln können. Jeder Student muss für das DMS Verfahren ein eigenes Messobjekt vorbereiten und daran zwei verschiedenen Belastungsfälle messen. Die Dehnungen werden mit Hilfe eines Messverstärkers ermittelt und danach wird die Spannung berechnet.



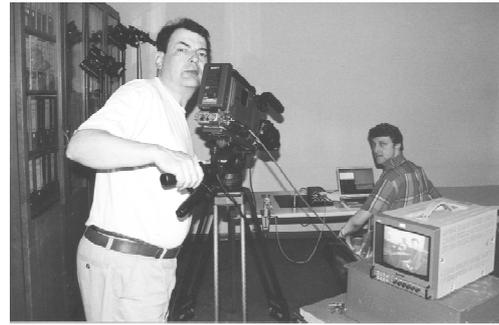
**Bild 3:** Vorbereitung de DMS

Am Ende des Praktikums müssen die Teilnehmer ein detailliertes Protokoll abgeben, das von dem Betreuer überprüft und bewertet wird.

## 3 Filmaufnahme

Als Hilfsmittel für Studenten wurde im WS 04/05 ein professioneller Lehrfilm am IMW mit der Unterstützung des Multimediateams aus dem Rechenzentrum gedreht, **Bild 4**. Der Film beschreibt detailliert den Ablauf aller wichtiger Punkte des DMS-

Messtechnik-Praktikums, wie z.B.: Vorbereitung der Messstelle, Vorbereitung des DMS, Kleben des DMS, Brückenschaltung.



**Bild 4:** Filmdreh am IMW

Der hergestellte Film wird in Zukunft das DMS-Praktikum unterstützen und ein hilfreiches Lehrmittel für alle DMS-Anwender sein.



**Bild 5:** Manchmal ist eine Hilfreiche Hand notwendig!

## 4 Zusammenfassung

Nach drei erfolgreichen Jahren der Durchführung des DMS-Praktikums zeigen die Studenten weiterhin großes Interesse an dem Praktikum. In den folgenden Jahren wird das Praktikum durch neues Lehrmaterial (z.B. Lehrfilm) ergänzt, so dass die Studenten von einer modernen Lehrveranstaltung profitieren können. Die Teilnehmer erhalten am Ende des Praktikums eine Teilnahmebescheinigung.

Für die professionelle Unterstützung bei der Filmaufnahme gilt ein besonderer Dank dem Multimedialeam des Rechenzentrums unter der Leitung von Herrn Stefan Zimmer. Außerdem geht unser Dank an die Sponsoren, die mit der Bereitstellung der notwendigen Materialien das Praktikum ermöglichten.

## 5 Literatur

- /1/ Keil, S.; Experimentelle Beanspruchungsermittlung (mit Dehnungsmessstreifen), Manuskript zur Vorlesung; Cuneus 2003
- /2/ Söver, A.; Dehnungsmessstreifen - Messtechnik Praktikum am IMW, Institutsmitteilungen des Institut für Maschinewesen der TU Clausthal Nr.28, Clausthal, 2003

# Rohstoff oder Sondermüll? Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage

Seitz, T

*In Zusammenarbeit mit der E.ON Kernkraft GmbH wurde die Behandlung der beim direkten Rückbau einer kerntechnischen Anlage anfallenden Reststoffe untersucht und ein Konzept zur Optimierung der Abläufe entwickelt.*

*In co-operation with the E.ON Kernkraft GmbH the treatment of the waste materials resulting from the dismantling of a nuclear power plant was examined and a concept for the optimization of the workflow was developed.*

## 1 Ausgangssituation

Beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage stehen Ingenieure einer gänzlich anderen Herausforderung gegenüber als sich ihnen beim konventionellen Abriss eines Gebäudes bietet. Es dürfen weder unkontrolliert radioaktive Stoffe an die Umwelt abgegeben werden, noch dürfen die am Rückbau direkt beteiligten Mitarbeiter durch die radioaktiven Stoffe einer gesundheitlichen Gefährdung ausgesetzt sein.

Um dies sicherzustellen, werden nach dem produktiven Betrieb kerntechnischer Anlagen zwei grundsätzlich verschiedene Wege beschritten um das Betriebsgelände in einen Zustand zu überführen, der dem vor der Errichtung der Anlage entspricht.

### 1.1 Sicherer Einschluss

Der weitaus einfachere Weg beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage ist der sichere Einschluss mit darauf folgendem Rückbau. Diese Variante, die beispielsweise beim Kernkraftwerk Lingen angewandt wird, sieht vor, die Anlage nach Beendigung des Produktivbetriebs in einen sicheren, nichtkritischen Zustand zu überführen, in dem sie in der Regel mehrer Jahrzehnte verbleibt. Dazu werden bei einem Kernkraftwerk die Brennelemente entfernt und die Infrastruktur der Anlage an den sicheren Einschluss angepasst. Die Anlage wird fortan nur noch überwacht und nur zu Kontrollzwecken betreten. Da außer Wartungs- und Kontrollarbeiten nur der Objektschutz weiterhin sichergestellt werden muss, kommt die Variante des sicheren Einschlusses in dieser Phase mit einer stark reduzierten Anzahl an Mitarbeitern aus.

Während des sicheren Einschlusses kann die Radioaktivität in der Anlage auf ein Maß abklingen,

das den folgenden Rückbau der Anlage vereinfacht. Weiterhin ermöglicht die Zeit, die Entwicklung von notwendigen Rückbautechniken und –gerätschaften. Diesen Vorteilen steht aber der gravierende Nachteil gegenüber, dass während der Phase des Rückbaus keine Mitarbeiter aus der Zeit der Errichtung oder des Betriebs der Anlage mehr zur Verfügung stehen, die die Arbeiten mit ihren Erfahrungen wesentlich unterstützen können. Bei der früheren Stilllegung kerntechnischer Anlagen wurde dieser Weg dennoch beschritten, da geeignete Techniken damals noch nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung standen.

### 1.2 Direkter Rückbau

Die weitaus größere Herausforderung stellt der direkte Rückbau einer kerntechnischen Anlage dar, bei dem die Phase des sicheren Einschlusses ‚übersprungen‘ wird und der Rückbau zeitnah auf die Beendigung des Produktivbetriebs folgt. Somit stehen insbesondere die Fachkenntnisse der beschäftigten Mitarbeiter noch zur Verfügung.

Auch aus diesem Grund entschied sich die PreussenElektra als Inhaberin des Kernkraftwerks Würzgassen (KWW), nach dessen endgültiger Abschaltung, 1995 für diese Variante. Die erste Phase wurde 1997 genehmigt und folglich wird das KWW, mittlerweile im Besitz der E.ON Kernkraft GmbH, seitdem zurückgebaut.

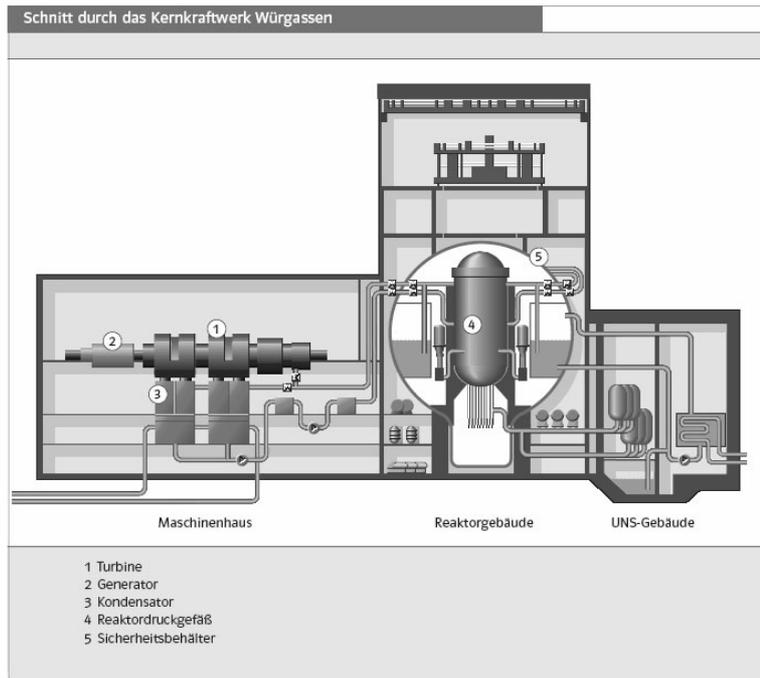
## 2 Das Kernkraftwerk Würzgassen

Das KWW mit einer Nettoleistung von 640 MW war die erste kommerziell betriebene Siedewasserreaktoranlage der Bundesrepublik und wurde 1975, nach einem mehrjährigen Probebetrieb, von der AEG als Errichter an die PreussenElektra übergeben. Bis zur seiner Abschaltung zur routinemäßigen Revision 1994 war der Reaktor 130.045 Stunden in Betrieb und die Anlage erzeugte 72,9 Mrd. kWh Strom. Bei der Revision wurden Rissanzeigen im Kernmantel und an den Kerngitterplatten festgestellt, die 1995 zur Entscheidung der endgültigen Stilllegung und dem Entschluss des sofortigen Rückbaus der Anlage führten.

Es wurde noch 1995 der Antrag auf Stilllegung und des Rückbaus in der Phase I beim zuständigen Ministerium des Landes Nordrhein-Westfalen eingereicht und dieser 1997 genehmigt.

Bis dahin befand sich die Anlage im Stillstandsbetrieb. In dieser Zeit wurde ein detailliertes Rückbaukonzept entwickelt und die technische sowie personelle Infrastruktur den neuen Erfordernissen angepasst. Weiterhin wurden auf Grundlage der noch bestehenden Betriebsgenehmigung die Brennelemente abtransportiert und weitere radioaktive Abfälle und Betriebsmittel entsorgt.

Durch die Ausführung des KWW als Siedewasserreaktor umfasst der Kontrollbereich, in dem offen mit radioaktiven Stoffen umgegangen werden darf,



**Bild 1:** Schnitt durch das KWW im Betriebszustand /1/

neben dem Reaktorgebäude auch das Maschinenhaus sowie einige Nebengebäude (**Bild 1**). Für den Kontrollbereich bestehen besondere Sicherheitsvorschriften. Insbesondere muss verhindert werden, dass radioaktive Stoffe die dort tätigen Mitarbeiter gefährden, sowie ihn unkontrolliert verlassen. Neben weit reichenden Umkleideprozeduren für die Mitarbeiter, die diese beim Betreten und Verlassen des Kontrollbereiches durchzuführen haben, stellen aufwändige Messungen sicher, dass dies gewährleistet ist. Für den Kontrollbereich sowie alle in ihm befindlichen Anlagen und Strukturen gilt zunächst die Annahme, dass sie potenziell radioaktiv kontaminiert sind und somit den Kontrollbereich nicht ohne weiteres verlassen dürfen /2/.

Der Abschluss des Rückbaus des KWW mit der Entlassung aus der atomrechtlichen Überwachung und dem Abbruch der Gebäude ist für das Jahr 2015 geplant /3/.

### 3 Der direkte Rückbau des KWW

Der direkte Rückbau, der zusammen eine Masse von etwa 255.000 Tonnen /1/ umfasst, gliedert sich in insgesamt sechs Phasen.

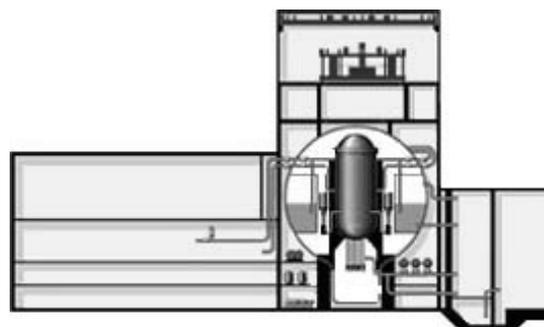
Es wird beginnend von Anlagenteilen mit keiner, bzw. geringer Kontamination hin zu immer stärker kontaminierten und aktivierten Teilen zurückgebaut. Dabei gilt die für eine Phase erteilte Genehmigung immer für bestimmte Teilsysteme der Anlage. Die Phasen müssen also nicht zeitlich aufeinander folgen sondern laufen zum Teil auch parallel ab.

Während des Rückbaus werden sämtliche Anlagenteile so zerlegt, dass generell alle Oberflächen für eine spätere Behandlung und Messungen ungehindert zugänglich sind. Das heißt normalerweise eine Zerlegung auf eine Größe, die einen Transport in handelsüblichen Gitterboxen möglich macht. Nur bei Großteilen, wie z. B. dem Generator ist es möglich, diese als Ganzes auszuschleusen. Die dazu notwendigen Messungen gestalten sich aber entsprechend aufwändig. Um vor der Zerlegung von Anlagenteilen die anzuwendenden Schutzmaßnahmen festlegen zu können, erfolgen im Rahmen der Antragstellung vielfältige Messungen und Beprobungen. Hier lässt sich auch schon absehen, wie die Materialien -die Reststoffe- später verwendet bzw. entsorgt werden können.

#### • Phase I

**Bild 2** zeigt den Zustand des KWW nach Abschluss der Rückbauphase I.

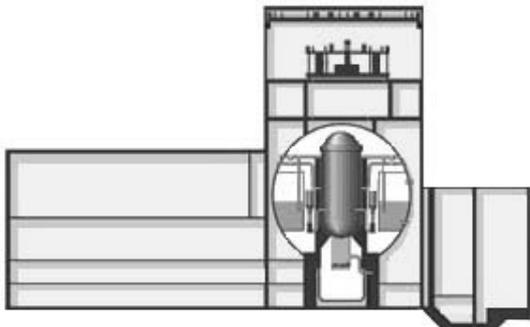
Hier erfolgen die Stilllegung und der Abbau verschiedener Systeme im Maschinenhaus und im Gebäude mit dem Unabhängigen Nachkühlsystem (UNS) und dem Schnellabschaltssystem (SAS).



**Bild 2:** Abschluss der Phase I /1/

- **Phase II**

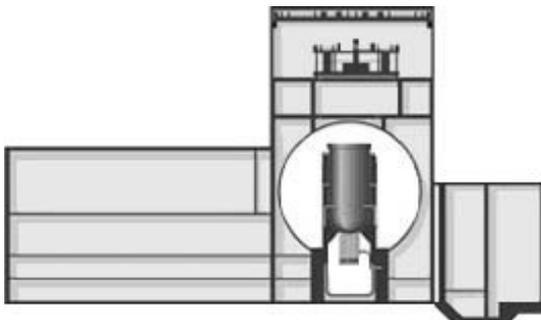
In der Phase II erfolgt der Abbau von kontaminierten Systemen im Reaktorgebäude außerhalb des Sicherheitsbehälters (**Bild 3**).



**Bild 3:** Abschluss der Phase II /1/

- **Phase III**

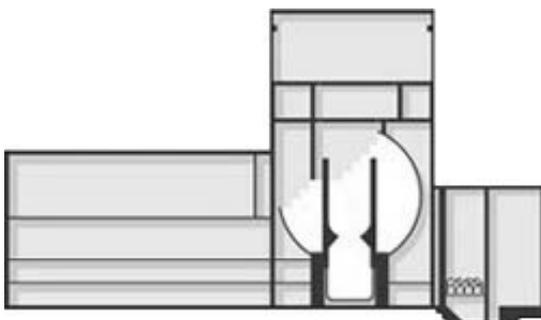
Hier werden neben dem Druckabbausystem (DAS) weitere Komponenten innerhalb des Sicherheitsbehälters abgebaut. Weiterhin erfolgen der Ausbau und das Zerlegen verschiedener Einbauten des Reaktordruckgefäßes (**Bild 4**).



**Bild 4:** Abschluss der Phase III /1/

- **Phase IV**

Nach dem Zerlegen der Reaktordruckgefäßeinbauten erfolgt das Zerlegen des Reaktordruckgefäßes, des biologischen Schildes (Betonabschirmung) und des Sicherheitsbehälters (**Bild 5**).



**Bild 5:** Während der Durchführung der Phase IV /1/

- **Phase V**

In dieser abschließenden Phase unter atomrechtlicher Überwachung erfolgt die Entfernung der Infrastruktur im Kontrollbereich. Nach dem Reinigen und Ausmessen der Gebäude geschieht die Entlassung aus dem Atomrecht. Die während des Rückbaus angefallenen radioaktiven Abfälle werden bis zur Einrichtung eines Endlagers in der Transportbereitstellungshalle und dem umgebauten UNS-Gebäude zwischengelagert (**Bild 6**).



**Bild 6:** Abschluss der Phase V /1/

- **Phase VI**

Es folgen der konventionelle Abbruch der Gebäude und die Rekultivierung des Geländes (**Bild 7**).



**Bild 7:** Das rekultivierte Kraftwerksgelände /1/

#### 4 Entsorgung der Reststoffe

Die beim Rückbau anfallenden Reststoffe unterliegen während des gesamten Prozesses, bis zu ihrer Entsorgung, der atomrechtlichen Überwachung. Somit ist sichergestellt, dass sich jederzeit zurückverfolgen lässt, welchen Weg der Reststoff bisher genommen hat, wie er behandelt wurde und welche radioaktiven Eigenschaften er besitzt.

Zu seiner Entsorgung existieren mehrere Möglichkeiten die durch die Strahlenschutzverordnung /4/ vorgegeben sind. Welche letztendlich gewählt wird, ist in erster Linie von der Art und Höhe der Kontamination bzw. der Aktivität abhängig. Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Möglichkeiten unterscheiden.

#### 4.1 Uneingeschränkte Freigabe

Die uneingeschränkte Freigabe stellt den idealen Weg der Entsorgung dar. Die radioaktiven Eigenschaften der Reststoffe liegen bei einer abschließenden Messung unter den entsprechenden Grenzwerten und die Reststoffe können somit in den Wertstoffkreislauf zurückgegeben werden. Unter Umständen kann hier auch eine Freigabe zur Beseitigung unter der Beachtung einschränkender Nebenbedingungen erteilt werden. In diesem Fall muss verhindert werden, dass die Reststoffe in den Wertstoffkreislauf zurückgelangen. Es erfolgt in der Regel eine Lagerung auf einer Deponie oder das Verbrennen. Mit der Freigabe erfolgt eine Entlassung der Reststoffe aus der atomrechtlichen Überwachung.

#### 4.2 Abgabe an andere Genehmigungsinhaber

Mit der Abgabe geht die atomrechtliche Verantwortung auf einen anderen Genehmigungsinhaber über. Somit können Bauteile beispielsweise in anderen Anlagen weiterverwendet werden. Oftmals wird in diesem Fall aber auch die Abgabe zum Schmelzen angewandt. Hierbei werden die metallischen Reststoffe an einen spezialisierten Betrieb gegeben, der sie dann einschmilzt. Dadurch findet zum einen in gewissen Maßen eine Dekontamination statt, es erfolgt aber auch eine erhebliche Volumenreduzierung. Die eingeschmolzenen Reststoffe können dann in den Besitz des Schmelzanlagenbetreibers übergehen oder werden zurückgenommen. Auf jeden Fall zurückgenommen werden muss die Schlacke, die nun den Großteil der radioaktiven Stoffe enthält.

#### 4.3 Entsorgung als radioaktiver Abfall

Für die Entsorgung als radioaktiven Abfall müssen die Reststoffe in endlagerfähige Behältnisse verpackt (konditioniert) werden. Dabei ist darauf zu achten, dass möglichst eine Volumenreduzierung stattfindet. Da in Deutschland noch kein betriebsbereites Endlager für radioaktive Abfälle existiert, müssen die Behälter vorerst in Zwischenlagern am Standort deponiert werden.

Angesichts der ungeklärten Endlagerfrage und in der Verantwortung, nachfolgenden Generationen möglichst wenig radioaktive Fragmente zu hinterlassen, ist dieser Weg, wenn immer möglich, zu vermeiden.

#### 4.4 Behandlungsmöglichkeiten

Da sämtliche Reststoffe potenziell kontaminiert sind, ist eine direkte Entsorgung in der Regel nicht

möglich. Es existieren unterschiedliche Behandlungsverfahren, die angewandt werden, um das Erreichen der Entsorgungsziele sicherzustellen. Diese Behandlungsverfahren sind an Art und Geometrie der Reststoffe sowie die Art und Höhe der Kontamination angepasst. Sie reichen vom einfachen feuchten Abwischen, über das Hochdruckstrahlen mit Wasser, das Beizen in Säurebädern oder die Reinigung mittels Ultraschall bis hin zum Strahlen mit abrasiven Zusätzen, das einen Materialabtrag erzeugt und somit auch festsetzende Kontamination entfernen kann.

Alle diese Behandlungsmöglichkeiten sind allerdings auch stets unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit zu betrachten. Der Durchlauf der Reststoffe durch den Behandlungsprozess unterliegt also ähnlichen Einflüssen, wie sie auch in herkömmlichen Fertigungsprozessen zu finden sind.

### 5 Zusammenfassung

Die beim Rückbau kerntechnischer Anlagen entstehenden Reststoffe müssen auf bestmögliche Weise behandelt werden, um eine ideale Entsorgung sicherzustellen. Dazu sind die zur Verfügung stehenden Behandlungsverfahren unter den Gesichtspunkten der Umsetzbarkeit aber auch der Wirtschaftlichkeit im Behandlungsprozess, der einem Produktionsprozess gleichzustellen ist, einzusetzen. Das Endprodukt ist Schrott, der, zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Menge und der richtigen Qualität zu liefern ist und somit durchaus einen wertvollen Rohstoff darstellen kann.

### 6 Literatur

- /1/ EON Kernkraft GmbH, KWW: Vom Kernkraftwerk zur grünen Wiese – Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks Würgassen. Karl Küster Druckerei, Hannover, 2003
- /2/ Volkmer, Martin: Radioaktivität und Strahlenschutz. Informationskreis Kernenergie, Bonn, 1994 : ISBN3-925986-06-5
- /3/ Pollmann; Sander; Norpoth; Künzel; Hillberg: Aktivitätsverteilung und Nuklidanteile in den Systemen einer SWR-Anlage ; Erfahrungen aus dem Rückbau des Kernkraftwerkes Würgassen. 5. Int. Symposium Strahlenschutz, München, 2003
- /4/ Verordnung über den Schutz vor ionisierenden Strahlen (Strahlenschutzverordnung-StrSchV). Bundesgesetzblatt 38/2001

# Qualitätsüberwachung bei einem Automobilzulieferer 'Qualitätsregelkarten bei mehrstufiger Prüfung'

Sambale, B.; Schäfer, G.

*Die Fertigungstiefe der Automobilhersteller hat in den zurückliegenden Jahren deutlich abgenommen. Gleichzeitig mit der Reduzierung der Fertigungstiefe wurden vom VDA richtungweisende Standards zur Qualitätssicherung in immer feingliedrigeren Produktionskooperationen geschaffen, die dabei auch eine gesteigerte Produktgesamtqualität ermöglicht. Bausteine davon sind z.B. die vollständige Rückverfolgbarkeit von einzelnen Bauteilen vom Fertigprodukt zurück über die Montage, die einzelnen Herstellungsschritte, die Baumusterfreigabe bis hin zur Konstruktion.*

*Aus diesem Verfahrensablauf ergeben sich für alle Zulieferer klare Regeln zur lückenlosen Bauteildokumentation. Im Rahmen des Projekts sollte für einen Klein- bis mittelständischen Betrieb eine Rechnerunterstützte Bauteil-Qualitätserfassung entwickelt und realisiert werden, die auch weitergehende statistische Auswertungen mit dem Ziel der Prozesssteuerung erlaubt.*

*The vertical range of manufacture in the automotive industrie has been decreased in the last years. Concurrent to this, the VDA produced standards for quality assurance, which allows an increased product quality. Some contained parts are e. g. the complete retraceability of discrete components from finished product back to the assembling, several fabrication steps, prototype technical-release procedure to the point of construction.*

*This process development gives some explicit rules for consistently unit documentation to all subcontractors. In the range of the project a computer-aided part quality acquisition should be developed and realised, which also allows further statistic analyses with regard to process control.*

## 1 Einleitung

Bei den Zulieferteilen handelt es sich um rohrförmige Bauteile, die von einem Vorlieferanten mit Hilfe des IHU (Innenhochdruck-Umformen) bereits eine komplizierte Gestalt erhalten haben und danach beim betrachteten Zulieferer auf 3D-Laserschneidmaschinen notwendige Ausschnitte und Bohrungen erhalten, um anschließend beim Automobilherstel-

ler selber in der Gesamtkarosserie eingeschweißt zu werden.

Für die Fertigungsbegleitende Qualitätsprüfung steht beim Zulieferer ein spezieller Bauteilmessplatz zur Verfügung. Daneben gibt es für generelle Messaufgaben einen 3D-Koordinatenmessarm (Faro) dessen Messprotokolle ebenfalls in der Bauteildokumentation mit aufzunehmen sind.

### 1.1 Fertigungsqualität

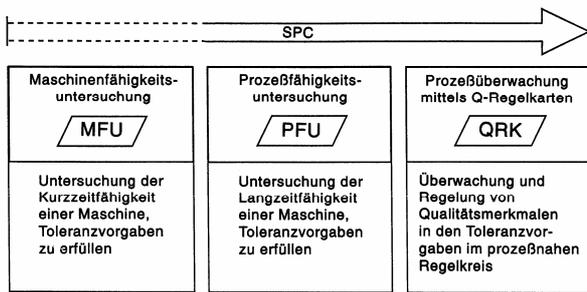
Die Qualitätsphilosophie hat sich in den zurückliegenden Jahren dahingehend gewandelt, Qualität nicht zu erprüfem, sondern von vornherein zu fertigen.

Durch Fähigkeitsuntersuchungen wird im Vorselektionsstadium die Eignung eines Prozesses oder einer Maschine zur Gewährleistung einer stabilen und sicheren Produktion nachgewiesen. Dadurch kann von Anfang an mit einem beherrschten und stabilen Prozess gerechnet werden, dessen Verlauf so geregelt wird, dass alle wesentlichen Produktmerkmale sicher innerhalb der Spezifikationsgrenzen liegen. Für diese Regelung des Prozesses werden Qualitätsregelkarten eingesetzt, die eine geordnete Auswertung der statistisch erhobenen Prozessdaten erlauben und damit die Informationen für die gezielte Prozessregelung bereitstellen. Der gesamte Regelkreis wird als „statistische Prozesskontrolle (SPC)“ bezeichnet.

### 1.2 Statistische Prozesskontrolle (SPC)

Unter der Voraussetzung annähernder Normalverteilung der Messwerte eines Prozesses können durch die SPC systematische Prozesseinflüsse aufgedeckt werden. Hierzu werden einem Prozess regelmäßig Messwerte entnommen und die aktuellen Prozesskennwerte, z.B. Mittelwert und Streuung ermittelt und grafisch dargestellt. Für weitergehende Auswertungen wie z.B. Kennzahlenbildung (Prozessfähigkeit) sind langfristige Datenauswertungen mit umfangreicheren Berechnungsverfahren erforderlich. Der Begriff der statistischen Prozesskontrolle umfasst allgemein mehrere Teilaufgaben

der Qualitätssicherung. Dazu gehören die Maschinenfähigkeitsuntersuchungen, die Prozessfähigkeitsuntersuchungen und die Führung von Qualitätsregelkarten (siehe **Bild 1**).



**Bild 1:** Zusammenhang zwischen SPC, MFU, PFU und QRK

Ziel der MFU und PFU ist es, fähige und beherrschte Fertigungsabläufe sicherzustellen.

## 2 Teilaufgaben des Zulieferers

Im Vordergrund der Beschaffungslogistik großer Automobilhersteller stehen Lieferzeit, Termintreue, Menge und Bevorratung. Der Lieferant soll seine Teile möglichst kurzfristig - in diesem Fall täglich - anliefern. Dies setzt bei allen Lieferanten in der Prozesskette eine hohe Prozesssicherheit und das damit erreichbare Null-Fehler-Niveau voraus. Ein paralleler Schritt zur Vereinfachung des Zulieferhandlings führt zum Verzicht auf Wareneingangsprüfungen bzw. deren Verlagerung zum Lieferanten als Warenausgangsprüfung, so wie es im hier vorliegenden Fall durchgeführt wird.

Um die hohen Ansprüche bei einer solchen Prozesskette sicher erfüllen zu können, haben die Automobilkonzerne mehrere Qualitätsstandards (QS 9000 und VDA-Schriftenreihe „Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie“) entwickelt, die auf der ISO 9001 basieren. Innerhalb dieses Gesamtkonzeptes des Qualitätsmanagements müssen überprüfbare Qualitätsziele und als Maßeinheit dafür entsprechende Qualitätskennzahlen vereinbart und genutzt werden. Zwei wesentliche Ziele sind bereits weiter oben genannt worden, die fehlerfreie Produktion und die dazu notwendigen beherrschten und fähigen Prozesse.

## 3 Prüfverfahren

Die Variablenprüfung (nach DIN ISO 2859) dient zur Prüfung quantitativer Merkmale, d.h. ein Merkmal, wie z.B. ein Bohrungsdurchmesser, wird anhand einer kontinuierlichen Skala (Messwert) gemessen. Bei der Attributprüfung (nach DIN ISO

3951) erfolgt eine gut/schlecht Prüfung des Merkmals. Aufgrund der höheren statistischen Aussagekraft und der geringeren erforderlichen Stichprobenumfänge ist die Variablenprüfung in jedem Fall der Attributprüfung vorzuziehen.

Durch die Verlagerung der Prüfung in die laufende Produktion können Fehlentwicklungen schneller erkannt und behoben werden. Ziel ist die „beherrschte Fertigung“, bei der im Idealfall überhaupt kein Ausschuss mehr auftritt.

## 4 Statistische Verfahren zur Qualitätsoptimierung

Grundlagen für Aussagen über bestimmte Qualitätsmerkmale eines Produktes sind meist Aufzeichnungen aus Messungen oder Versuchen während der laufenden Fertigung oder auch im Feld. Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren kann angenommen werden, dass alle technischen Prozesse stochastisch ablaufen. Die Statistik liefert zur Bearbeitung dieser Problemstellungen das notwendige Handwerkszeug, dessen wesentliche mathematische Grundlagen nachfolgend kurz dargestellt werden.

### 4.1 Statistische Grundlagen

Bei statistischen Verfahren wird davon ausgegangen, dass bei der Herstellung und der Vermessung der Produkte eine Abweichung des betrachteten Merkmals zum geforderten Sollwert feststellbar ist. Diese Abweichung wird als Streuung bezeichnet. Ursachen für das Auftreten von Streuungen können zufällige und systematische Einflüsse sein. Als wichtige Messgrößen dafür dienen die Standardabweichung  $s$ , die Spannweite  $R$ , die Stichprobengröße  $n$  und der Mittelwert  $\bar{x}$  einer Stichprobe. Als Schätzer für den Mittelwert wird häufig auch der Median  $\tilde{x}$  genutzt.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

arithmetischer Mittelwert

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

Spannweite

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Standardabweichung

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Varianz

Die aus der statistischen Grundlage resultierende so genannte natürliche Streuung, die ausschließlich auf zufälligen Einflüssen beruht, führt zu einem kontrollierten und gleichmäßigen Prozessverlauf. Man spricht hier auch von der standardisierten Normalverteilung.

## 5 Prozessfähigkeitsuntersuchung

Die Prozessfähigkeit drückt die Eigenschaft eines Prozesses aus, den geforderten Qualitätsansprüchen an das produzierte Produkt gerecht zu werden. Dazu werden Kennzahlen berechnet, die angeben mit welcher Sicherheit der Prozess Teile produziert, die innerhalb der geforderten Spezifikationen liegen. Erforderlich für die Berechnung der Fähigkeitskennzahlen ist die Prozessbeherrschung, die bei einer Prozessvorlaufuntersuchung anhand einer Stichprobenprüfung (10 Proben à 5 Teile, Untersuchung auf Normalverteilung) festgestellt wird. Ein Prozess wird als beherrscht bezeichnet, wenn er einen rein stochastischen Verlauf besitzt und keine speziellen oder systematischen Einflüsse erkennbar sind. Es ergibt sich folgende Reihenfolge:

- Prozessbeherrschung:
  - Prozess frei von speziellen, systematischen Einflüssen; steuerbar und zentrierbar
- ⇒ Prozessfähigkeit:
  - Prozess produziert Produkte innerhalb geforderter Spezifikation
- ⇒ Prozesssicherheit:
  - Streuungsreduzierung innerhalb der Toleranzgrenzen
- ⇒ Prozessregelung:
  - Regelung des beherrschten, fähigen, sicheren Prozesses mittels Regelkartentechnik

### 5.1 Fähigkeitsuntersuchungen

Bei allen vier Arten der Fähigkeitsuntersuchungen ist die Verfahrensweise und Berechnung im Prinzip gleich. Unterschiede bestehen nur in der Anzahl der untersuchten Teile, dem Untersuchungszeitraum und dem Erfüllungsgrad.

Die Kurzzeit- oder Maschinenfähigkeitsuntersuchung sollte direkt beim Hersteller der Fertigungseinrichtung durchgeführt werden und liefert eine erste Aussage über die Eignung von Fertigungseinrichtungen, genau wie die vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung. Diese dient als Verlaufsuntersuchung zur Festlegung der Prozessbeherrschbarkeit. Auch zur Abschätzung der zu erwartenden

Langzeit-Prozessfähigkeit wird sie nach Beseitigung etwaiger systematischer Einflüsse herangezogen.

Die Langzeit-Prozessfähigkeit erstreckt sich über einen angemessenen längeren Zeitraum, um alle Streuungsfaktoren zu erfassen. Sie dient zur Beurteilung des laufenden Prozesses.

Auskunft über die Eignung von Prüfmitteln für die Überwachung von Prozessen gibt die Prüfmittelfähigkeit. Sie bewertet vor allem die kombinierte Auswirkung von Genauigkeit und Wiederholbarkeit und wird in der Regel beim Lieferanten zur Beurteilung eines neuen Prüfmittels vor dessen endgültiger Auslieferung und Installation durchgeführt.

### 5.2 Ermittlung der Kennwerte

Für die Ermittlung der (Langzeit-) Prozessfähigkeit eines Prozesses mit zufälligen Mittelwertschwankungen werden Mittelwerte und Spannweiten aus genügend vielen Einzelstichproben erfasst und die Prozesskennwerte  $\bar{x}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{s}$  errechnet. Dafür werden häufig Schätzverfahren genutzt.

Der Schätzwert der Streuung der Grundgesamtheit, die Prozessstreuung  $\hat{\sigma}$ , wird anhand der empirischen Standardabweichungen  $s$  der Stichproben ermittelt.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{s^2}$$

Damit lässt sich die (Langzeit-) Prozessfähigkeit  $c_p$  ermitteln

$$c_p = \frac{\text{Toleranzbreite}}{\text{Prozessstreuung}} = \frac{T}{6\hat{\sigma}} = \frac{OGW - UGW}{6\hat{\sigma}}$$

Der (Langzeit-) Prozessfähigkeitskennwert  $c_{pk}$  berücksichtigt die Lage des Mittelwerts aller Einzelstichproben gegenüber den vorgegebenen Toleranzgrenzen.

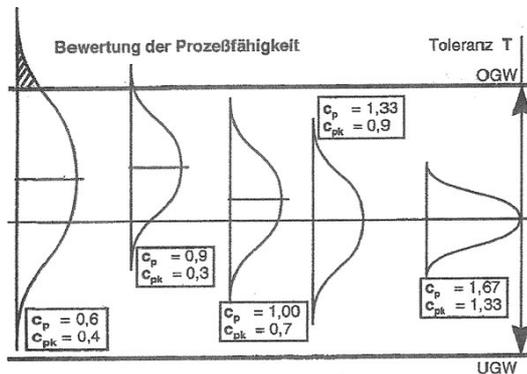
Die allgemeine Formel zur Berechnung des Prozessfähigkeitskennwertes lautet:

$$c_{pk} = \frac{Z_{krit}}{3\hat{\sigma}}$$

mit  $Z_{krit}$  = kleinster Abstand der Toleranzgrenzen zu  $\bar{x}$ .

Die Prozessfähigkeit ist unabhängig von der Prozesslage, wobei i.A. die Prozesslage leichter verändert werden kann als die Prozessstreuung. Die Prozessfähigkeit hat einen höheren Stellenwert und ist in der Regel immer größer als der Prozessfähigkeitskennwert. Im folgenden **Bild 2** sind einige Bei-

spiele für die Prozessfähigkeit und den Prozessfähigkeitskennwert in Abhängigkeit von der Prozesslage und –streuung gegeben.



**Bild 2:** Bewertung der Prozessfähigkeit

Die Formeln für die Maschinenfähigkeit  $c_m$  und den Maschinenfähigkeitskennwert  $c_{mk}$  entsprechen denen der Prozessfähigkeit bzw. des Prozessfähigkeitskennwertes. Dabei werden aber nur wenige Teile ( $n \approx 50$ ) vermessen und versucht aus den resultierenden Messdaten ein Verteilungsmodell zu finden, auf dem basierend die Fähigkeitsindizes berechnet werden. Bei der Maschinenfähigkeit wird soweit möglich versucht, ausschließlich das Verhalten der Maschine zu beurteilen. Die Aussagen, die auf der Maschinenfähigkeit basieren, sind aufgrund des geringen Stichprobenumfangs eher vage.

Während die Kennwerte  $c_p$  und  $c_m$  die grundsätzlichen Fähigkeiten von Prozess und Maschine beschreiben, wird durch die Kennwerte  $c_{pk}$  und  $c_{mk}$  die Beherrschung von Prozess und Maschine bewertet. Sowohl für die Prozess- als auch für die Maschinenfähigkeitskennzahlen gilt, je höher sie sind, desto besser werden die gestellten Anforderungen erfüllt.

### 5.3 Stichprobenumfang und Vertrauensbereich

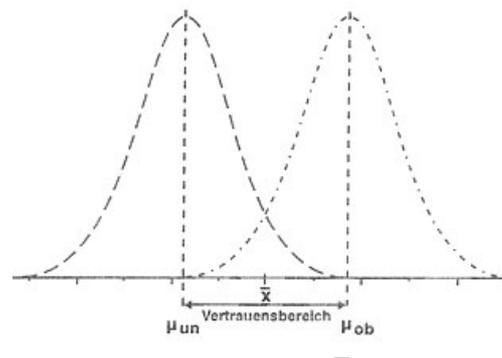
Für eine Kurzzeit- oder Maschinenfähigkeitsuntersuchung werden in der Regel 50 hintereinander gefertigte Teile, in zehn zeitlich geordnete Stichproben aufgeteilt, benötigt.

20 Stichproben zu mindestens drei Teilen, die in zeitlich gleichmäßigen Abständen gezogen wurden, sind zur Durchführung einer vorläufigen Prozessfähigkeitsuntersuchung notwendig.

Eine Langzeit-Prozessfähigkeitsuntersuchung hingegen erstreckt sich über einen Beobachtungszeitraum von mindestens 20 Produktionstagen und umfasst 25 Stichproben zu je fünf Teilen.

Von der Stichprobe wird anhand der Stichprobenkennwerte (wie Mittelwert  $\bar{x}$ , Streuung  $s$ , etc.) auf die zugehörige Grundgesamtheit geschlossen, um eine Aussage über die Parameter der Grundgesamtheit (wie Prozessmittelwert  $\mu$ , Prozessstreuung  $\sigma$ , etc.) zu machen.

Da Mittelwert und Standardabweichung der Prozessstreuung nur Schätzwerte sind, gilt dies auch für die „Prozessfähigkeiten“ ( $c_p$ ,  $p_p$ ,  $c_m$ ) und die „Prozessfähigkeitskennwerte“ ( $c_{pk}$ ,  $p_{pk}$ ,  $c_{mk}$ ). Es muss also eine Aussage über die Unsicherheit der Stichprobenschätzung gemacht werden. Dies geschieht durch Definition des Vertrauensbereichs (Konfidenzintervall), der mit einem bestimmten Vertrauensniveau von  $1 - \alpha$  ( $\alpha$  = Irrtumswahrscheinlichkeit) die wahren Werte der Kenngrößen überdeckt. 95 %, 99 % oder auch 99,9 % sind typische Werte für  $1 - \alpha$ . Die Breite des Vertrauensbereichs hängt vom Stichprobenumfang und dem gewünschten Vertrauensniveau ab.



**Bild 3:** Vertrauensbereich:  $\bar{x}$  Mittelwert einer Stichprobe,  $\mu_{un}$ ,  $\mu_{ob}$  Vertrauensbereich für den Mittelwert der Grundgesamtheit

Je nach Problemstellung kann der Vertrauensbereich ein- oder zweiseitig bestimmt werden. Wird ein hohes Vertrauen (z.B.  $1 - \alpha = 90\%$ ) in die Aussage das sich der Parameter innerhalb des Vertrauensbereichs befindet gewünscht, ist die Breite des Vertrauensbereichs größer als bei einem vergleichsweise niedrigeren Wert (z.B.  $1 - \alpha = 70\%$ ). Häufig ist nur die untere Vertrauensgrenze von Interesse. Damit die Anforderungen durch das Testergebnis auf die Gesamtheit übertragbar sind, muss dabei der Zielwert außerhalb bzw. höchstens an dieser unteren Grenze liegen.

## 6 Qualitätsregelkarten

Mit Hilfe einer Qualitätsregelkarte (QRK) soll sowohl die Prozesslage als auch die Streuung kontinuierlich überwacht werden. Kennwerte (z.B. Anzahl fehlerhafter Einheiten, Mittelwerte, Standard-

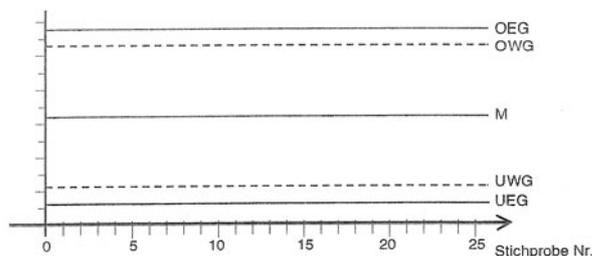
abweichungen, etc.) zur Lage- und Streuungsbeurteilung werden dazu über der Zeit dargestellt und mit Grenzlinien (sog. Eingriffsgrenzen) verglichen. Anhand dieser Vergleiche kann eine Aussage über die Güte (Stabilität) der Prozesse getroffen werden. Beim Überschreiten der Eingriffsgrenzen muss korrigierend in den Prozess eingegriffen werden.

Es sollten nur QRK verwendet werden, deren Warn- und Eingriffsgrenzen basierend auf der Leistung des zu bearbeitenden Prozesses ermittelt wurden. Ausschließlich deren Anwendung lässt eine einfache Beurteilung zu, ob der Prozess „statistisch unter Kontrolle“, also beherrscht ist. Ein beherrschter Prozess ist eine zwingende Voraussetzung zur Bestimmung von Qualitätskennzahlen.

Auf der horizontalen Achse (x-Achse, Abszisse) der QRK wird alternativ die

- Stichprobennummer
- Zeit der Stichprobenentnahme
- Chargennummer, bzw. sonstige Kennzeichnung

aufgetragen. Die vertikale Achse (y-Achse, Ordinate) ist von der Merkmalsprägung abhängig.



**Bild 4:** Schematisierte Qualitätsregelkarte

Grundsätzlich sollten bei der statistischen Prozessregelung alle qualitätsrelevanten Merkmale einer quantitativen (messenden) Prüfung unterzogen werden (kontinuierlich veränderliche Merkmale). Ist dies nicht - mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand - möglich, muss eine Beurteilung anhand qualitativer Beobachtungen erfolgen (diskrete Merkmale).

### 6.1 Regelkarten für kontinuierliche Merkmale

Bei kontinuierlich veränderlichen Merkmalen (Messdaten) werden in der Regel zwei Karten verwendet (zweispurige Regelkarte). Dabei bestimmt der jeweilige Kennwert die Skalierung der Ordinate. Die obere Spur wird skaliert durch :

- Durchschnittswerte  $\bar{x}$ ,
- Zentralwerte  $\tilde{x}$  oder
- Urwerte (bzw. Einzelwerte)  $X$ .

Die untere Spur durch:

- Spannweite  $R$  oder
- Standardabweichung  $s$

und misst somit die Streuung innerhalb der Einzelstichproben.

### 6.2 Berechnung der Grenzen und der Mittellinie

Je nach QRK können die Mittellinie, die Warn- und Eingriffsgrenzen entweder durch Tabellen oder Diagrammen bestimmt oder mittels zugrunde liegenden mathematischen Beziehungen berechnet werden. Zur Berechnung der Eingriffsgrenzen werden stichprobengrößenabhängige Konstanten benötigt. Diese liegen in der einschlägigen Literatur in Tabellen vor.

### 6.3 Stabilitätskriterien

Auf der Grundlage der nun bekannten Eingriffsgrenzen lässt sich beurteilen, ob der Prozess stabil ist.

Treten bei der Beurteilung eines Prozesses mittels QRK eine oder mehrere Stabilitätsverletzungen (Run, Trend, etc.) auf, so unterliegt der Prozess systematischen Einflussgrößen. Wird hingegen die Einhaltung aller Stabilitätsregeln bestätigt, so unterliegt der Prozess nur zufälligen Streuungen und kann als stabil betrachtet werden.

### 6.4 Interpretation einer Qualitätsregelkarte

Der laufenden Fertigung werden regelmäßig in möglichst gleichen Zeitabständen Stichproben des Umfangs  $n$  entnommen, wobei das in der QRK dargestellte Qualitätsmerkmal geprüft wird. Bei kontinuierlichen Merkmalsarten, muss der Stichprobenumfang immer gleich groß sein (in der Regel  $n = 5$ ). Alle Teile der Stichprobe werden auf ein (oder mehrere) messbares Merkmal(e) geprüft. Aus diesen  $n$  Urwerten können statistische Kennwerte wie  $\bar{x}$ ,  $\tilde{x}$ ,  $R$  oder  $s$  errechnet werden und, je nach Qualitätsregelkartentyp, werden diese oder die Urwerte in die Grafik eingetragen. Die Beurteilung einer QRK erfolgt nach folgenden Kriterien:

Möglichkeiten	Folgerungen
Ur- oder Kennwert(e) innerhalb der Warngrenzen	Fertigung läuft wie gehabt weiter
Ur- oder Kennwert(e) außerhalb der Warngrenzen aber innerhalb der Eingriffsgrenzen	Fertigung läuft wie gehabt weiter aber häufiger prüfen; ggf. sofort neue Stichprobe
Ur- oder Kennwert(e) außerhalb der Eingriffsgrenzen	Fertigung neu einstellen; ggf. seit letzter Prüfung gefertigte Teile aussortieren

Tab. 1: QRK-Beurteilungskriterien

## 6.5 Regeln für das Führen einer QRK

- Regelmäßig prüfen
- Stichprobenumfang konstant halten
- Vermerk des Eingriffs in den Fertigungsprozess
- Zeit und Prüfer festhalten

Die Gültigkeit der Warn- und Eingriffsgrenzen der Ur-, Mittel- und Zentralwertkarte setzt eine konstante Streuung voraus, da sie mit Hilfe eines Schätzers für die Streuung der Grundgesamtheit errechnet werden. Ist zu erwarten, dass die Streuung nicht konstant bleibt, ist die Überwachung dieses Parameters notwendig. In den meisten Fällen kann nicht von streuungsabhängiger Prozessregelung gesprochen werden, da eine überzufällige Vergrößerung der Streuung und eine daraus resultierende Überschreitung der Eingriffsgrenzen in der Regel nicht durch einen unmittelbaren Eingriff abgestellt werden kann. Meist kann die Streuung nur durch langfristige Maßnahmen, wie z.B. Überholung der Maschine, sorgfältigere Auswahl der Werkstoffe, etc. verringert werden. Wird jedoch eine überzufällige Verringerung der Streuung festgestellt, so sollte die Ursache gefunden und nach Möglichkeit beibehalten werden.

## 7 Anwendung auf den vorliegenden Prozess

Der vorliegende Prozess wird über eine QRK mit kontinuierlichen Merkmalswerten überwacht, da Koordinatenmesstechnik genutzt wird. Die Laserschneidemaschine muss nach einiger Zeit nachjustiert werden, um gleich bleibende Qualität zu gewährleisten.

Der Automobilhersteller erwartet im vorliegenden Fall, dass die Toleranzbreite  $T = 2,00 \text{ mm}$  nur zu 70 % ausgenutzt wird, d.h. dass die Prozessfähig-

keit  $c_p$  mindestens 1,67 betragen muss. Wir haben also einen zweiseitigen Vertrauensbereich, dessen Anteil zwischen den zweiseitigen symmetrischen Schwellenwerten 70 % beträgt. Zur gültigen Beurteilung des Prozesses werden mindestens 25 Stichproben mit je 5 Messwerten oder aber andere Stichprobengrößen mit mindestens 125 Einzelwerten gefordert.

$$\bar{s} = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n}{n}$$

$s_i$  Standardabweichung der Stichprobe  $i, i=1, \dots, n$

$$c_p = \frac{T}{6 * \bar{s}} \geq 1,67$$

Dies bedeutet für die Maschinenfähigkeit, welche die weiteren Einflussparameter des Prozesses unberücksichtigt lässt, eine, um eine weitere Stufe erhöhte Forderung von mindestens  $c_m = 2,00$  eingesetzt werden muss. Die Kennwerte  $c_{pk} = 1,33$  und  $c_{mk} = 1,67$  kann man niedriger als die entsprechenden  $c_p$ - und  $c_m$ -Werte ansetzen.

## 8 Arbeitsabfolge

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Qualitätssicherungswerkzeug erfasst den gesamten Arbeitsablauf der Firma.

Die Firma erhält umgeformte Teile in Gitterboxen angeliefert. Die noch paarweise verbundenen linken und rechten Teile haben bereits eindeutige Seriennummern, die vollständige Rückverfolgbarkeit für diese Sicherheitsteile ermöglichen. Die Seriennummer besteht aus: Tag, Jahr, Schicht, fortlaufender Nummer und Werkerkürzel. Diese Seriennummern werden in Verbindung mit einer Boxnummer und dem jeweiligen Bearbeiter bei der Firma in der Datenbank abgelegt. Die Boxnummer beschreibt die Gitterbox, in der die fertig bearbeiteten Achsteile zum Weitertransport gesammelt werden und besteht aus dem Zeitstempel der Anfangszeit der Box. Für den Versand wird dieser Boxnummer eine Lieferscheinnummer abschließend zugeordnet. Auch dieser Vorgang wird durch das entwickelte QS-Werkzeug protokolliert und in der Datenbank abgelegt.

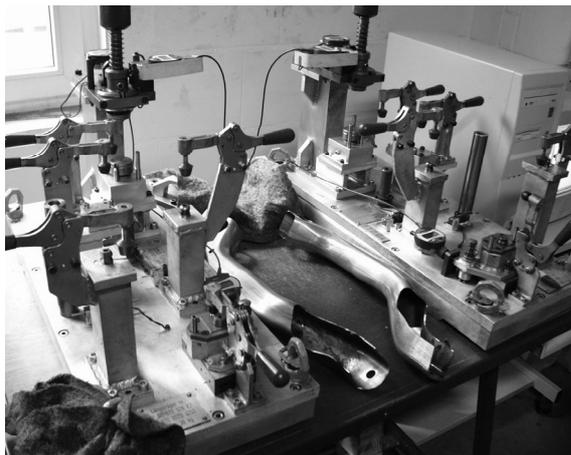
Die eigentliche Wertschöpfung geschieht durch das Auftrennen der beiden Achsteile und die gleichzeitige Einbringung von mehreren Ausschnitten. Dieser trennende Arbeitsvorgang wird auf einer Laserschneidanlage (**Bild 5**) durchgeführt. Die einteiligen Rohrstücke werden in der Schneideanlage mit Hilfe

der Referenzöffnung ausgerichtet und dann der Schneidprozess gestartet.



**Bild 5:** 3D-Laserschneidanlage mit einteiligem Ausgangsprofilrohr im Vordergrund

Zur kontinuierlichen Prozessüberwachung werden durch Werkerselbstprüfung nach dem Laserschneidvorgang die linken und rechten Achsteile in die bereitstehende Vielstellenmesseinrichtung gelegt und die Funktionsmaße durch jeweils drei Messuhren (**Bild 6**) erfasst.



**Bild 6:** Messplatz zur Online-Messung für linkes und rechtes Bauteil

Die Messuhren besitzen digitale Signalausgänge und sind mit einem Messwerterfassungssystem verbunden. Auf diese Weise werden die Bauteilmessdaten gemeinsam mit dem eindeutigen Bauteilschlüssel in einer Datenbank abgelegt, aus der heraus dann die anschließende statistische Auswertung erfolgt.

Nach einem Schicht- oder Bedienerwechsel wird jeweils mit der Prüfschärfe 1 (jedes Teil wird gemessen) gestartet. Nach fünf fehlerfreien Teilen kann auf Prüfschärfe 5 (jedes fünfte Teil wird gemessen) zurückgesetzt werden.

Falls ein Teil in seinen Bohrungen und Ausschnitten über 0,2 mm von den vorgegebenen Werten

abweicht, wird eine Rückwärtsprüfung bis zum letztgeprüften Teil vorgenommen und daraufhin die Laserschneidevorrichtung neu kalibriert. Danach wird wieder mit der Prüfschärfe 1 gestartet. Die Informationen über Prüfschärfe und Nachstellung werden ebenfalls in der Datenbank abgelegt. Als zusätzliches Kontrollinstrument werden in diesem QS-System stichprobenartige Messungen mit dem vorhandenen FARO-Arm durchgeführt. Auch diese Messdateien finden Eingang in die Datenbank.

## 9 Konzept der DV-Unterstützung und statistischen Auswertung

### 9.1.1 Datenbank-Konzept

Aus dem Arbeitsablauf ergeben sich nach der Normalisierung der daraus resultierenden Daten folgende Tabellen:

- bediener

Beinhaltet Name, Vorname und Passwort der Mitarbeiter.

- liefernummer
- box

Nach der Bearbeitung werden die fertigen Bauteile in einer Box gelagert, der eine Boxnummer bestehend aus Datum und Uhrzeit zugeordnet wird. Vor der Versendung wird diese dann mit einer firmeninternen Liefernummer versehen. Beide Nummern werden in die Tabelle „box“ geschrieben.

- bauteildaten

Kalibrierung der Laserschneidemaschine und Prüftiefe (ändert sich nur bei Bedienerwechsel oder Messwertabweichung). Somit existiert eine Gruppe von Bauteilen, die dieselben Bauteildaten besitzt.

- messdaten

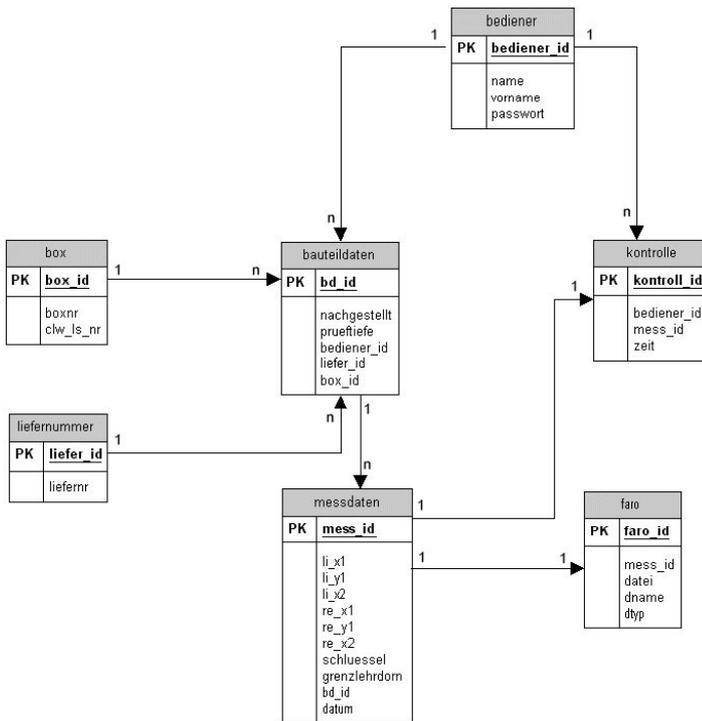
Beinhaltet die Messwerte, den Bauteilschlüssel, eine ggf. vorliegende Grenzlehrdormmessung und die Verbindung zur Bauteildatengruppe.

- kontrolle

Zusätzliche Kontrolldaten von einem anderen Bediener von einigen zufällig ausgewählten Teilen

- faro

Speicherung der vom Faro-Arm erstellten Vermessungsdatei von zufällig ausgewählten schon vermessenen.



**Bild 7:** Datenbankdesign

Die an den Pfeilen in **Bild 7** stehenden Ziffern stehen für die Beziehungen zwischen den Tabellen. Eine 1-n-Beziehung bedeutet, dass jedem Schlüssel der Tabelle auf der 1-Seite mehrere n Datensätze der Tabelle auf der n-Seite zugeordnet werden. Bei einer 1-1-Beziehung ist jeder Datensatz der einen Tabelle eindeutig einem Datensatz der anderen zugeordnet.

## 9.2 Programmierumgebung

### 9.2.1 Komponentenwahl

Für die Programmierumgebung wurde eine Kombination von PHP4, MySQL und Apache-Server genutzt. Diese Software ist frei verfügbar und die damit erstellten Programme sind im Zusammenhang mit einem Browser für jeden Anwender nutzbar. MySQL hat zudem den Vorteil, dass es nach jeder Eingabe eines Datensatzes automatisch abspeichert, so dass auch bei Stromausfall keine Daten verloren gehen können. Die Software zum Auslesen der Messuhren wurde mit Visual Basic realisiert.

### 9.3 Messuhren auslesen (Visual Basic)

Da sechs digitale Messuhren „Millitast 1075“ an RS232-Schnittstellen angeschlossen werden müssen, wurde in den PC noch eine PC-Add-On Card eingebaut, die dieses ermöglicht. Die Messlehren

müssen per Hand arretiert werden, so dass nach Aktivierung des Programms erst ein DELAY einsetzt, um den Bediener die nötige Zeit zu geben wieder an die Lehre zu treten.

Die Messuhr sendet einen Datensatz, der vom Programm eingelesen und sowohl im Terminalprogramm ausgegeben als auch in eine Textdatei geschrieben wird.

## 9.4 Verwaltungsprogramm (Php)

Das Programm ist so aufgebaut, dass über die Linkleiste am linken Rand des Browsers die einzelnen Menüpunkte ausgewählt werden können. Es sind immer nur die Links zu sehen, die zurzeit ausgewählt werden dürfen. Zur einfacheren Handhabung sind die Buttons auch über Tastenkombinationen (Alt + „Taste“) auslösbar.

## 9.5 Auswertungsprogramme

Die Auswertungen wie Maschinen-/Kurzzeitfähigkeit, Prozessfähigkeit und die  $\bar{x} - s$ -Regelkarte wurden in Excel realisiert.

### 9.5.1 Maschinenfähigkeit

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, sind zur Erstellung der Maschinenfähigkeit mindestens 25 Stichprobenwerte notwendig.

Im vorliegenden Programm ist darüber hinaus eine Eingabe von bis zu hundert Werten möglich.

Das vorher vom Verwaltungsprogramm erstellte Text-Dokument, das die Messdaten und anderen Bauteilwerte wie Bauteilschlüssel etc. enthält, wird zum Auslesen geöffnet. Die ersten Zeilen der Textdatei enthalten Informationen über die Lieferscheinnummern, Boxennummern, den Zeitraum, Bediener und der Anzahl vorgenommener Nachstellungen an der Laserschneidemaschine.

Danach beginnt das eigentliche Auslesen der  $x_1, y_1, x_2$ -Messwertetupel der linken bzw. rechten Hälften der ausgewählten Proben.

Für die weitere Betrachtung der so eingelesenen Werte, werden die einzelnen Tabellenspalten getrennt voneinander auf verschiedenen Excelblättern ausgewertet. Es werden drei Auswertungsblätter benötigt, je eins für den  $x_1$ -,  $y_1$ - und den  $x_2$ -Wert.

Die Informationsfelder oben links werden aus dem Messwertblatt übernommen. Toleranz und Nennwert (oben rechts) werden als statische Größen per

Hand eingegeben. Dementsprechend sollte die Klasseneinteilung  $k$  des Histogramms gewählt werden. Falls diese nicht explizit eingegeben wird, wird sie automatisch erstellt. Die Skala beginnt beim unteren Grenzwert (UGW) und erhöht sich immer um den Wert  $k$ , bis sie beim oberen Grenzwert (OGW) endet. Die Werte für die Grundgesamtheit  $n$ , Maschinenfähigkeit und den Fehleranteil werden aus den bekannten Formeln über die jeweilige Tabellenspalte der Messwerttabelle berechnet. Das Histogramm wird automatisch über die berechneten Hilfsvariablen  $k$ ,  $G_x$ ,  $H_j$  und der Stufenhäufigkeit  $n_x$  erstellt.

$n_x =$  Anz. der Werte von  $n$  innerhalb der Stufe  $x$

$$G_x = \sum_{i=1}^n n_{xi}$$

Summenhäufigkeit

$$H_j = \frac{G_x}{n}$$

Prozentuale Summenhäufigkeit

Das Wahrscheinlichkeitspapier mit seiner doppelt logarithmischen Ordinate und logarithmischen Abszisse erlaubt es, die zweiparametrische Weibull-

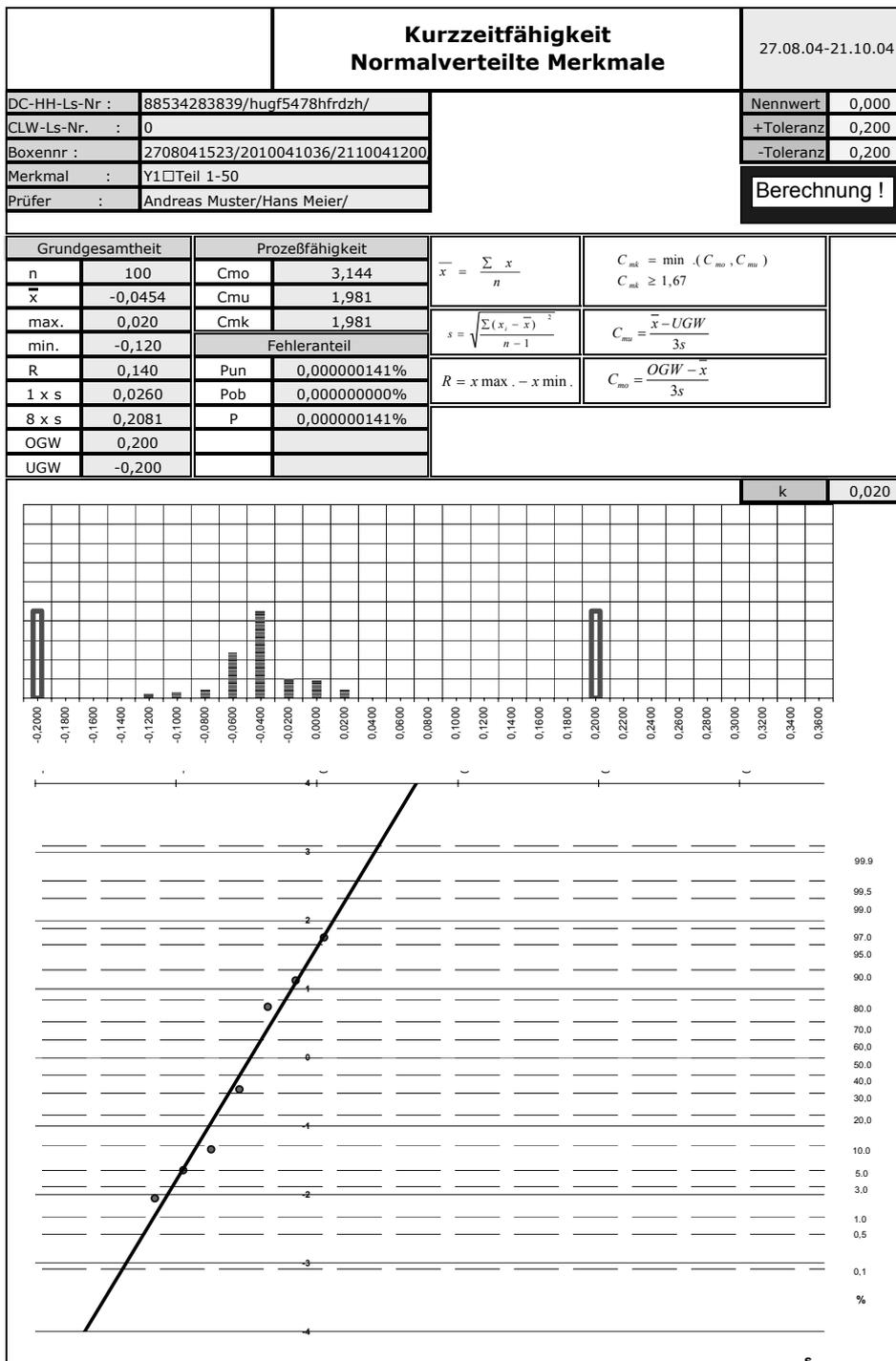


Bild 8: Excelblatt Maschinenfähigkeit



## Thermische Klärschlambeseitigung in Polen – Grundsätzliche Voraussetzungen und Entwicklungsperspektiven

Pająk, T.; Fakultät für Mechanische Verfahrenstechnik und Robotik  
Berg- und Hüttenakademie Kraków, Polen

*Die Klärschlammmenge nimmt in Polen systematisch zu und bildet eine weitere Klasse von Abfällen, die gemäß dem EG-Recht entsprechend beseitigt und bewirtschaftet werden müssen. Es wird erwartet, dass in den nächsten Jahren die Menge weiterhin steigen wird.*

*The sludge quantity increases in Poland systematically and forms a further class of refuse that must be removed and managed in accordance with the EC-right corresponding to. It is expected that in the next years the quantity will climb further.*

### 1 Einleitung

Laut den Prognosen wird sich im Jahre 2015 die Menge von Klärschlamm im Verhältnis zum Jahr 2000 verdoppeln (siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.<sup>1</sup>). Das wird die Folge des bereits begonnenen Einführungsprozesses von mehreren Projekten im Bereich der Abwasser- und Klärschlammwirtschaft sein sowie der dynamisch verlaufenden Modernisierung polnischer Abwasserreinigungsanlagen. Dieser Prozess ist nicht nur mit Modernisierung, Ausbau bzw. Bau von neuen Abwasserreinigungsanlagen verbunden, sondern auch mit der Einführung von immer mehr fortgeschrittener Technologien der Abwasserreinigung und Klärschlammentsorgung. Auf diese Weise soll es möglich sein, die aus der Implementierung der Vorschriften der Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser resultierenden Verpflichtungen zu erfüllen, die im polnischen Gesetz speziell dem Wasserrecht festgelegt sind.

In der Tabelle I wird die Entwicklung der Menge von kommunalem Klärschlamm in den Jahren 2000 – 2003 vorgestellt. Die Tabelle II dagegen stellt die Prognosen der Anstieges der Klärschlammengen für die Jahre 2006 – 2015 dar. Wie schon angedeutet, wird diese Zunahme immer intensiver sein, besonders von 2010 bis 2015. Gerade in dieser Zeit – je nach Größe der Ballungsgebiete – wird Polen die im Beitrittsabkommen angenommenen Verpflichtungen erfüllen müssen. Es geht hier in erster Linie um Erfassung vom Abwasser in Kanalisationssysteme

und um Sauberkeitsgrad vom Abwasser, das ins Oberflächengewässer abgeleitet wird. Die unmittelbare Folge dieser Maßnahmen wird der Anstieg der Klärschlammmenge sein.

Produzierter Klärschlamm Mg TS/a				Klärschlammmasse, deponiert in Abwasser- reinigungsanlagen Mg TS/a			
2000	2001	2002	2003	2000	2001	2002	2003
359	397	435	446	675	728	744	751
819	216	737	500	011	897	977	000

**Tab. 1:** Menge des Klärschlamms, der in polnischen Abwasserreinigungsanlagen in den Jahren 2000 - 2003 produziert und deponiert wurde.

Prognose der Klärschlammmenge für die Jahre 2005-2015 Mg TS/a		
2005	2010	2015
487 000	642 000	720 000

**Tab. 2:** Prognose der Klärschlammmenge für die Jahre 2005 – 2015

Gleichzeitig sind sich die Betreiber der Abwasserreinigungsanlagen und Selbstverwaltungsbehörden der Gemeinden, die für Projekte und Ausbau der Anlagen zuständig sind, im immer größeren Maße dessen bewusst, dass ein moderner Prozess der Abwasserreinigung nicht als beendet betrachtet werden kann, ohne Einführung einer in den gegebenen Umständen optimalen Behandlungsmethode des produzierten Klärschlamms. Daher werden neben den Maßnahmen zur Vereinheitlichung der Abwasserwirtschaft auch solche unternommen, die die Einführung einer für gegebene Anlage optimalen Methode der Klärschlammbehandlung zum Ziel haben.

Diese Beobachtung bestätigen nicht nur mehrere Studien, die über die polnischen Abwasserreini-

gungsanlagen angefertigt wurden, sondern auch die zur Zeit realisierten Investitionen, die vom ISPA-Fonds (Instrument of Structural Policies for PreAccession) oder Kohäsionsfonds (seit dem EU-Beitritt Polens) finanziert werden.

## **2 Grundsätzliche rechtliche Bedingungen – Vorteile der Klärschlammverbrennung**

In der Einleitung wurde auf die Konsequenzen hingewiesen, die sich aus der Implementierung der Vorschriften der Richtlinie 91/271/EWG in das polnische Recht für die Zunahme von Klärschlammsmenge ergeben. Die Übertragung dieser Richtlinie in das polnische Recht bedeutet, dass bis Ende 2010 oder 2015, je nach Stadtgröße, die hauptsächlich mittels des sog. Einwohnerwertes gemessen wird, müssen ca. 37 Tsd. km Sammelkanalisationsnetz gebaut und etwa 1110 Abwasserreinigungsanlagen modernisiert oder gebaut werden. Der gesamte Investitionsaufwand für diese Vorhaben beträgt ca. 42 Mrd. PLN (etwa 10,4 Mrd. Euro). Diese Daten veranschaulichen den Maßstab des Problems, das im Bereich der Abwasserwirtschaft in Polen zu lösen ist und andererseits bestätigen sie wiederholt, dass der prognostizierte so große Anstieg der Klärschlammsmenge völlig berechtigt ist.

Die zurzeit in Polen realisierten Maßnahmen bezüglich der Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung sind Folge der überarbeiteten Landgesetze wie: Gesetz – Wasserrecht, Gesetz – Umweltschutzrecht, Gesetz über die Sammelwasserversorgung und Sammelabwasserableitung oder Abfallgesetz sowie laufende Verordnungen. Es soll auch betont werden, dass das Problem der Behandlung von Klärschlamm in zwei strategisch wichtigen Dokumenten berücksichtigt wird, und zwar in Landesabfallwirtschaftsplan (Krajowy Plan Gospodarki Odpadami) und Landesprogramm der Abwasserreinigung (Krajowy Program Oczyszczenia Ścieków Komunalnych) samt der neuesten Aktualisierung.

Der Umfang der analysierten Methoden der Behandlung von Kommunal-Klärschlamm in Polen ist sehr breit. Unter den in Frage kommenden Lösungen, besonders für Großstädte, überwiegen die Konzeptionen, die auf Trocknung von Klärschlamm und dessen folgender Verbrennung oder Mitverbrennung basieren. Das Landesrecht im Bereich der thermischen Abfallbehandlung bestreitet nicht die Anwendung solcher Möglichkeiten. Die in das

polnische Recht implementierte Richtlinie 2000/76/EG über die Verbrennung von Abfällen bestimmt eindeutig die Bedingungen der Realisierung dieses Prozesses und die Emissionsstandards für unmittelbare Verbrennung oder Mitverbrennung des Klärschlammes.

Für die thermische Klärschlammabeseitigung – insbesondere aus großen Städten – sprechen auch immer strengere Kriterien bezüglich der Verwertung des Klärschlammes in der Landwirtschaft. Diese Kriterien wurden in das polnische Recht übertragen auf Grund der Richtlinie 86/278/EWG über Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft.

Wenn man bedenkt, dass anhand des diskutierten sog. Working Document on Sludge, die in der Richtlinie 86/278/EWG enthaltenen Kriterien noch strenger sein können, dann wird die Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft noch begrenzter sein, und im Fall von Klärschlamm aus Großstädten überhaupt nicht möglich. Die von Working Document on Sludge vorgeschlagenen Änderungen mancher Vorschriften der oben genannten Richtlinie werden hauptsächlich wegen des wachsenden Schadstoffgehaltes angesprochen, vor allem an Schwermetallen und organischer Mikroverunreinigungen im Abwasser. Folglich wird infolge der vorgenommenen Änderungen der genannten Richtlinie das Interesse an Klärschlammverbrennung wachsen. Die Beispiele dafür kann man schon in Polen feststellen, wie in der Konzeption der Klärschlammbehandlung für Łódź, Kraków, Poznań oder Warszawa.

Auch die Vorschriften der Richtlinie 99/31/EC über Abfalldeponien, übertragen in das polnische Recht in Form von Gesetzen und Anordnungen, insbesondere die Anordnung des Ministers für Wirtschaft und Arbeit vom 7. 09. 2005 über Kriterien und Prozeduren der Zulassung der Abfälle der gegebenen Klasse zur Deponierung (Gesetzbuch 2005 Nr. 186, Punkt 1553) werden eindeutig die Anwendung von thermischen Methoden zur Klärschlammabeseitigung vorziehen.

Diese Anordnung beschränkt die Möglichkeit der Klärschlammdeponierung, und gerade diese Methode bildet in Polen die dominierende Entsorgungsweise dieser Abfälle.

Daher kann festgestellt werden, dass die Anforderungen des Landrechtes in dieser Hinsicht als Ar-

gumente für Anwendung der Klärschlammverbrennungsanlagen zu betrachten sind.

### 3 Ausgewählte Projekte der Klärschlamm-beseitigung in polnischen Städten

Projekte hinsichtlich der Klärschlammbehandlung dominieren unter den Projekten aus dem Bereich des Umweltschutzes, die vom ISPA-Fonds oder Kohäsionsfonds finanziert werden. Manche Projekte sind erst in der Phase der Studienanalysen, andere in der Phase der Vorbereitung der Ausschreibungsunterlagen, mehrere befinden sich schon in der Ausschreibungsphase, ein großer Teil wird zur Zeit realisiert.

In der **Tab. 3** sind einige wesentliche Projekte der Klärschlammbehandlung in polnischen Großstädten aufgelistet.

### 4 Zusammenfassung

Polnische Abwasserreinigungsanlagen unternahmen eine Reihe von Projekten und Investitionen im Bereich der Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung, um in dem Termin bis Ende 2015 die Anforderungen des EG-Rechtes zu erfüllen. Die vorherrschende Methode der Klärschlammbehandlung in den großen Anlagen ist die Trocknung und Verbrennung von Klärschlamm, und zwar haupt-

sächlich mittels Wirbelschichtöfen. Die Mitverbrennung des Klärschlammes in mehreren polnischen Kohlekraftwerken befindet sich erst in der Phase der Pilotuntersuchungen. Fast alle Projekte sowie schon laufende Investitionen werden finanziell durch EU-Fonds unterstützt.

### 5 Literatur

- /1/ Pajak, T.: Termiczne przekształcanie jako element systemu zagospodarowania odpadów komunalnych i osadów ściekowych. (Thermische Behandlung als Komponente des Bewirtschaftungssystems von Kommunalabfällen und Klärschlamm). VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KOMeko 2005: „Zarządzanie środowiskiem na terenach uprzemysłowionych – nowoczesne systemy, techniki i technologie”. Zakopane, März 2005, S. 135 – 148.
- /2/ Pajak, T.: Uwarunkowania procesu suszenia i termicznego przekształcania osadów ściekowych. (Voraussetzungen der Trocknung und thermischer Behandlung des Klärschlammes). VII Polski Kongres Oczyszczania Miast, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Szczecin, September 2004, S. 249-258.

Stadt	Klärschlammmenge Mg TR/a	Technologie	Stand
Warszawa	ca. 63 000	Verbrennung in der Wirbelschicht, zwei Linien	In der Vorinvestitionsphase
Łódź	ca. 22 000	Verbrennung in der Wirbelschicht, zwei Linien	In der Phase der Ausschreibung
Kraków	ca. 25 000	Verbrennung in der Wirbelschicht	In der Phase der Ausschreibungsvorbereitung
Gdańsk	ca. 14 000	Trocknung und Mitverbrennung im Heizkraftwerk	Voruntersuchungen, Versuche zur Mitverbrennung im Heizkraftwerk
Szczecin	ca. 9 000	Rostverbrennung, eine Linie	Investition in der Realisierungsphase
Olsztyn	ca. 3 250	Noch nicht bekannt	In der Phase der Ausschreibungsvorbereitung

**Tab. 3:** Beispiele ausgewählter Projekte und Investitionen bezüglich der thermischen Klärschlammbehandlung in Polen

- /3/ Krajowy Plan Gospodarki Odpadami na lata 2002 – 2006. (Landeswirtschaftsabfallplan für die Jahre 2002 – 2006, erarbeitet im Auftrag des Umweltministeriums, angenommen vom Ministerrat am 29. 10. 2002), [www.mos.gov.pl](http://www.mos.gov.pl).
- /4/ Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych. (Landesprogramm der Abwasserreinigung, erarbeitet im Auftrag des Umweltministeriums). Dokument opracowany na zlecenie Ministerstwa Środowiska, Dezieber 2003, [www.mos.gov.pl](http://www.mos.gov.pl).
- /5/ Aktualizacja Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych przyjętego przez Radę Ministrów w dniu 07.08.2005 r. (Aktualisierung des Landesprogramms des Abwasserreinigung, erarbeitet im Auftrag des Umweltministeriums, angenommen vom Ministerrat am 07. 06. 2005). Dokument opracowany na zlecenie Ministerstwa Środowiska, Mai 2005, [www.mos.gov.pl](http://www.mos.gov.pl).

# Müllverbrennungsanlagen in Polen – Grundsätzliche Voraussetzungen und Entwicklungsperspektiven

Pająk, T.; Fakultät für Mechanische Verfahrenstechnik und Robotik  
Berg- und Hüttenakademie Kraków, Polen

*Polen ist seit dem 1. Mai 2004 Mitglied der Europäischen Union. Diese Mitgliedschaft fordert die Einhaltung der im Beitrittsabkommen festgelegten und von Polen angenommenen Verpflichtungen. Darunter befinden sich auch solche, die den Umweltschutz betreffen, und insbesondere eine so wichtige Komponente wie Abfallwirtschaft.*

*Poland has been since the 1 May 2004 member of the European union. This membership demands the compliance of the determined and of Poland supposed obligations. Beside others, these also include the environmental protection and especially an important component like refuse economy.*

## 1 Einleitung

Die neuen EU-Länder können in dieser Hinsicht nicht sehr viele Erfolge nachweisen, es ist eher gerade umgekehrt. Die Wirtschaftssysteme der neuen EU-Länder sind ziemlich veraltet im Vergleich zu den Abfallwirtschaftssystemen der 15 „alten“ EU-Länder. In den neuen Mitgliedstaaten basiert fast die gesamte Abfallwirtschaft auf der primitivsten Entsorgungsmethode, d.h. auf der Deponierung der Abfälle. Ähnlich ist es in Polen, wo mittels dieser Methode ca. 96% der jährlich produzierten Abfallmenge entsorgt wird. Sehr schwach entwickelt ist auch die getrennte Abfallsammlung, mit dieser Methode werden lediglich 2% der jährlich anfallenden Kommunalabfälle erfasst. In Polen, ähnlich wie in anderen neuen Mitgliedstaaten, sind in dem Abfallwirtschaftssystem keine Müllverbrennungsanlagen (MVA) vorhanden – außer vereinzelt Fällen. In Ungarn und der Slowakei gibt es je eine MVA, in Tschechien arbeiten drei, in Polen gibt es nur eine – in Warszawa. In den 15 alten EU-Ländern dagegen sind insgesamt ca. 370 Müllverbrennungsanlagen in Betrieb.

Um die Beitrittsverpflichtungen zu erfüllen muß also Polen eine Reihe von radikalen und dynamisch zu realisierenden Maßnahmen unternehmen, dank deren es möglich sein wird, in verhältnismäßig kurzer Zeit den implementierten EG-Recht-Vorschriften gerecht zu werden und den in der EU im Bereich der Abfallwirtschaft geltenden Standards standzu-

halten. Es wurde schon sehr viel getan, um dieses Ziel zu erreichen. Unter anderem wurden alle Richtlinien des EG-Rechtes implementiert, indem man entsprechende Landgesetze und Verordnungen veröffentlichte. Es wurden Abfallwirtschaftspläne erarbeitet, von der Landesebene bis zur Gemeinde. Auf diese Weise wurden die wichtigsten Aufgaben bestimmt, deren messbarer Richtwert die Notwendigkeit ist, in Polen ca. 170 Abfallverarbeitungsanlagen und mindestens 8 große Müllverbrennungsanlagen zu bauen. Andererseits ist das Tempo der wirklichen Änderungen in der Abfallwirtschaft zu langsam, was der Ende 2004 vorgestellte Bericht über die Realisierung des Landesabfallwirtschaftsplanes verdeutlichte, und die Erfüllung der von Polen angenommenen Beitrittsverpflichtungen könnte gefährdet werden.

Das Ende des Jahres 2010, und dann 2013 setzt deutliche Zäsuren für die Einführung der zwei ersten Etappen, die das Erreichen der geforderten Reduzierungsniveaus von biologisch abbaubaren Abfällen bestimmt. Diese Etappen können, nach der Meinung der Experten, ohne den Bau von Müllverbrennungsanlagen und deren Integrierung in das Abfallwirtschaftssysteme, nicht erreicht werden.

Die weiteren wichtigen Daten bildet das Ende des Jahres 2007 und 2014, denn dann sollen die erforderlichen Niveaus der Rückgewinnung und des Recyclings von Verpackungsabfällen erreicht werden. Das Erreichen der in diesen Bereichen angenommenen Effekte soll auch von Müllverbrennungsanlagen unterstützt werden, die die Energie aus Verpackungsabfällen zurückgewinnen sollen.

Eine weitere Anforderung, die die Notwendigkeit des Baus von neuen MVA in Polen impliziert, folgt aus der Richtlinie 99/31/EC über Abfalldeponieren und der daraus resultierenden Verordnung des Ministers für Wirtschaft und Arbeit vom 7. 09. 2005 über Kriterien und Prozeduren der Zulassung der Abfälle der gegebenen Klasse zur Deponierung (Gesetzbuch 2005 Nr. 186, Punkt 1553). Die Einführung einer inhaltlich ähnlichen Verordnung in Österreich (geltend ab 1. 01. 2004) und in der BRD

(geltend ab 1. 06. 2005) beweist unwiderlegbar, dass es ohne Anwendung von MVA unmöglich sein wird, die in dieser Verordnung vorgeschriebenen Anforderungen bezüglich der Eigenschaften der zu deponierenden Abfälle zu erfüllen.

Die Notwendigkeit des Baus von Müllverbrennungsanlagen in Polen wird auch durch die Tatsache erzwungen, dass die Deponien immer schneller aufgefüllt werden. Hinzu kommt, dass es in den Großstädten praktisch nicht möglich ist, die Lokalisierung für den Bau einer neuen Deponie zu finden.

Es ist ausgeschlossen, von heute auf morgen den oben dargestellten Anforderungen gerecht zu werden und eine bedeutende Verbesserung bezüglich der Abfallwirtschaft zu erreichen. Gleichzeitig soll die bisher sehr ungünstige Methode der Entsorgung von Abfällen – die ausschließlich auf dem Deponieren beruht – radikal geändert werden, was auch seine Zeit braucht. Und gerade an Zeit für die Einführung der erarbeiteten Abfallwirtschaftspläne und den Bau der unentbehrlichen Anlagen mangelt es, um rechtzeitig die angenommenen Verpflichtungen erfüllen zu können.

## 2 Thermische Behandlung der Kommunalabfälle - grundsätzliche Voraussetzungen

Die grundsätzlichen mit dem Bau von MVA in Polen verbundenen Barrieren oder Voraussetzungen können synthetisch in Form von Zusammenstellung der positiven und negativen Seiten dieses Vorhabens dargestellt werden, wie es die **Tab. 1** zeigt.

## 3 Reduzierung der biologisch abbaubaren Abfälle und die Notwendigkeit des Baus von MVA

Der im Jahr 2002 von dem Ministerrat beschlossene Landesabfallwirtschaftsplan (LAWP) für die Jahre 2002-2006 nimmt in seinen hauptsächlichen Grundsätzen die in der EU geltende Priorität der Behandlung von Abfällen an, d.h. Maximierung der Rückgewinnung und Minimierung der zu deponierenden Abfallmenge.

Besonderer Nachdruck wird auf diese Abfallarten gelegt, die die größten negativen Folgen für die Umwelt verursachen, und zwar biologisch abbaubare Abfälle. Wie in der Einleitung angedeutet, wird bisher in Polen 96% der Abfallmenge deponiert, daher ist es selbstverständlich nicht möglich, die angenommenen Effekte in kurzer Zeit zu erreichen. Aus diesem Grund wurde die Reduzierung der biologisch abbaubaren Abfälle auf drei Etappen verteilt und die von Polen ausgehandelten Übergangsperioden akzeptiert. Gemäß diesen Festlegungen soll in der 1. Etappe bis Ende 2010 die Masse der zu deponierenden biologisch abbaubaren Abfälle auf 75% der Menge (im Verhältnis zu der 1995 produzierten Abfallmenge) reduziert werden, in der II. Etappe bis Ende 2013 – auf 50%, und in der III. Etappe bis Ende 2020 – auf 35%. Das wurde ausführlich im Artikel 16a des am 29. 07. 2005 überarbeiteten Abfallgesetzes vorgeschrieben.

Auf Grund des von LAWP prognostizierten gesamten Menge der in Polen produzierten biologisch abbaubaren Abfälle, die sich 2010 auf ca. 6,4 Mio. Mg belaufen wird, könnten in dieser Zeit in Polen nicht mehr als 3,2 Mio. Mg/a deponiert werden, und der Rest, d.h. 2,1 Mio. Mg/a müsste kompostiert und verbrannt werden. Dagegen im Jahre 2013 sollten lediglich 2,2 Mio. Mg/a abgelagert werden, und die übrige Menge – ca. 3,6 Mio. Mg/a – sollte kompostiert oder verbrannt werden. Diese Daten stellt die **Tab. 2** vor. Sie veranschaulicht außerdem, welche Abfallmengen in den einzelnen Perioden in die MVA transportiert werden sollten, damit die Verpflichtungen hinsichtlich der Reduzierung von biologisch abbaubaren Abfälle erfüllt werden könnten.

Lfd. Nr.	Positive Seiten	Negative Seiten
1.	mit dem EG-Recht übereinstimmend bezüglich der Abfallbehandlung, darunter mit der Regel der nachhaltigen Entwicklung. Sehr ausführliche, mit großer Sorge um die Umwelt ausgearbeitete Rechtsakte, die hauptsächlich aus den Vorschriften der Richtlinie 2000/76/EC resultieren,	weiterhin fehlt es an klaren Anordnungen hinsichtlich des Modells von Gebühren für Müllabfuhr und Entsorgung. Die Gemeinde ist verpflichtet, die Abfallwirtschaft zu betreiben. Die Gebühren geraten aber nicht in die Gemeinkassen, sondern unmittelbar zu den Müllabfuhrfirmen, darunter auch zu den Privatunternehmen. Die Gemeinde verfügt also über keine finanziellen Mittel, dadurch ist sie nicht Abfalligentümer und kann keine Entscheidungen über die Art der Abfallbehandlung oder unentbehrliche diesbezügliche Investitionen treffen.
2.	unerlässlich um die Beitrittsverpflichtungen zu erfüllen, die aus der Richtlinie 99/31/EC und der novellierten Richtlinie 94/62/EC resultieren,	es fehlt an genau ausgearbeiteten Konzeptionen, es gibt keine Rechtstakte bezüglich der Reduzierung von biologisch abbaubaren Abfällen, keine Machbarkeitsstudien, Analysen von Finanzierungsquellen und Geschäftsplänen,
3.	notwendig um die einseitige Methode der Abfallwirtschaft umzugestalten, die zu 96% auf Abfalldeponierung beruht, wobei die Deponievolumen der Großstädte in Ausschöpfung begriffen sind,	hohe Investitionskosten sogar bei bedeutendem Anteil der potentiell zugänglichen Mitteln aus dem EU-Kohäsionsfonds; notwendige Beteiligung der Gemeinde, Befürchtung um Überschreitung der Verschuldungsschwelle der Gemeinde
4.	perfekt technologisch ausgearbeitet, übereinstimmend mit der Regel der neuesten verfügbaren Technologien. Es ist möglich, die in Abfällen gehaltene Energie zurück zu gewinnen, die durch das Deponieren unwiederbringlich verschwendet wird,	eingewurzelttes Misstrauen, sogar Hass, die in Stellungnahmen proökologischer Organisationen und teilweise im Verhalten der lokalen Gemeinschaften zum Ausdruck kommt. Bisher nur eine Anlage in Polen, und zwar in Warszawa, mit Kapazität von ca. 45 000 Mg/a,
5.	Finanzierung möglich bei wesentlicher Unterstützung des EU-Kohäsionsfonds.	sehr großer Einfluss der lokalen Politik auf alle Entscheidungen der Gemeinderaten.

**Tab. 1:** Positive und Negative Seiten der Projekte des Baus von MVA in Polen

Art der Abfallbehandlung	Bis 31. 12. 2010	Bis 31. 12. 2013
Zur Deponierung zugelassene Abfälle	3 200 000 Mg/a	2 200 000 Mg/a
Verwertbare Papier und Pappe- Verpackungsabfälle	1 100 000 Mg/a	1 400 000 Mg/a
Verwertbare Bioabfälle	2 100 000 Mg/a	3 600 000 Mg/a
Prognostizierter Abfallmenge zur Verbrennung	1 200 000 Mg/a	2 000 000 Mg/a

**Tab. 2:** Die erforderliche Menge der biologisch abbaubaren Abfälle in den Jahren 2010 und 2013

Wie in **Tab. 2** ersichtlich, soll die gesamte Kapazität der in Polen notwendigen zu bauenden Müllbehandlungsanlagen Ende 2010 ca. 2,1 Mio. Mg/a und Ende 2013 – 3,6 Mio. Mg/a betragen.

Bei der Analyse der in der Tabelle II dargestellten Daten soll die grundsätzliche Frage gestellt werden, und zwar: ist es ausführbar, in Polen im Jahr 2010 nur bei Anwendung der Kompostierungsanlagen 2,1 Mio. Mg/a zu verwerten, und 2013 – 3,6 Mio. Mg/a, um so mehr, dass in Hinsicht auf die schwach entwickelte getrennte Sammlung von Bioabfällen vor allem der Restmüll überwiegen wird. Es entsteht die Frage nach der Qualität des auf diese Weise produzierten Komposts, Möglichkeiten dessen Nutzung und Zweckmäßigkeit des Baus von Kompostierungsanlagen.

Es ist nur eine Schlussfolgerung möglich: in polnischen Großstädten, wo die größten Mengen biologisch abbaubarer Abfälle anfallen, geht der Bau einer Kompostierungsanlage mit Kapazität von 100 oder 200 Tsd. Mg/a am Ziel vorbei. In solchen Fällen liefert nur der Bau einer Müllverbrennungsanlage die Chance einer Lösung des Problems von Reduzierung der zu deponierenden Abfallmenge. Zu den Diskussionen über die Verwertungsmethode von Abfällen, die auf die Deponien nicht abgeführt werden dürfen, soll noch die Frage der Papier und Pappe-Verpackungsabfällen hinzukommen. Für solche Abfallprodukte scheint die Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen die einzige sinnvolle Lösung zu sein.

Fazit - Die Analyse der oben dargestellten Daten und der in Polen vorhandenen Bedingungen in Bezug auf die getrennte Abfallsammlung suggeriert, dass bis Ende 2010 mittels thermischer Behandlung ca. 1,2 Mio. Mg/a Abfälle reduziert werden sollen, und bis Ende 2013 – ca. 2 Mio. Mg/a, was auch die Landesexperten in ihren Publikationen bestätigen. Das bedeutet, dass in polnischen Städten entsprechend 5 (bis 2010) und 10 (bis 2013) große Müllverbrennungsanlagen gebaut werden sollen.

#### **4 Projekte des Baus von Müllverbrennungsanlagen am Beispiel der gewählten Städte Polens**

Die Müllverbrennungsanlagen finden in Polen immer noch keinen angemessenen Platz in Abfallwirtschaftssystemen und stoßen auf mehrere, hauptsächlich soziale und ökonomische, Hindernisse und Barrieren. Wie im vorigen Kapitel nachgewiesen wurde, wird es in Polen nicht möglich sein, ohne

Müllverbrennungsanlagen – insbesondere in Großstädten – die im Beitrittsabkommen festgelegten Ziele bezüglich der Abfallwirtschaft zu realisieren.

Von den polnischen Städten begann man in Kraków am frühesten über den Bau einer großen und modernen Müllverbrennungsanlage zu sprechen, die in das System der komplexen Abfallwirtschaft integriert werden sollte. Gerade in Kraków wurde auf Grund des ausgearbeiteten „Abfallwirtschaftskonzeptes in der Gemeinde Kraków“ und des durch den Stadtrat im Juni 1998 gefassten Beschlusses darauf hingewiesen, dass die MVA eine unerlässliche Komponente der komplexen Lösungen im Bereich der Abfallwirtschaft ist. Den Schlüsselargument für diese Option bildete die Notwendigkeit der bedeutenden Verminderung der Abfalldeponierung und der maximalen Verlängerung des Betriebes der Krakauer Deponie „Barycz“. Es wurde damals angenommen, dass die Müllverbrennungsanlage im Jahr 2005 in Betrieb genommen werden sollte. Aus vielen Gründen, vor allem wegen Proteste der Einwohnern und Mangel an finanziellen Mitteln, ist die MVA nicht gebaut worden.

In dem 2004 erarbeiteten, gesetzmäßig erforderlichen, Abfallwirtschaftsplan für die Stadt Kraków – der mit dem Beschluss des Stadtrates im April 2005 angenommen wurde – verschob man den Bau der MVA in die nächste Einführungsphase dieses Planes, also nach 2007. Wenn man bedenkt, dass die Zeit, die für die Vorbereitung solcher Investition, deren Bau und Inbetriebnahme notwendig ist, mindestens 5 – 6 Jahre beträgt, ist es praktisch nicht möglich, dass in dem zur Zeit in Krakow aufzubauenden System der komplexen Abfallwirtschaft die MVA vor 2010 betrieben werden kann.

Wenn man also das Szenario realisiert, das ausschließlich auf der getrennten Abfallsammlung und dem Recycling der biologisch abbaubaren Abfälle (Kompostierung von ca. 24 Tsd. Mg) basiert, wird es nicht möglich, im Jahre 2010 die Verpflichtung zu erfüllen, die zu deponierenden biologisch abbaubare Abfälle auf das Niveau von 75% der 1995 produzierten Menge zu reduzieren. Dieses Szenario gewährleistet auch nicht die zu erwartende Verlängerung des Betriebes der einzigen Deponie für Krakow Barycz. Es wird geschätzt, dass bei aktuellem Auffüllungstempo der vor kurzem in Betrieb genommenen sog. 3. Ausbau-Phase dieser Deponie, ihre Kapazität lediglich für ca. 11 Jahre reicht. Dagegen eine Müllverbrennungsanlage würde die

Betriebszeit dieser Deponie in noch mindestens 25 Jahren garantieren.

In ähnlicher Situation wie Krakow sind andere Großstädte Polens. Als Beispiel kann Szczecin angeführt werden, wo besonders deutlich die Gefahr auftritt, dass die gesetzmäßigen Anforderungen bezüglich Reduzierung von biologisch abbaubaren Abfällen nicht erfüllt werden können. Szczecin verfügt zur Zeit nicht über eigene Abfalldeponie. In den Nachbargemeinden gibt es keine Anlagen, die im Stande wären, die zu reduzierenden Abfallmengen aufzunehmen, d.h. ca. 35 Tsd. Mg bis 2010 und ca. 60 Tsd. Mg nach 2013. Große Befürchtungen und Zweifel erregt der Projekt, in der Stadt eine Kompostierungsanlage von so großer Kapazität zu bauen und die für die Anlage unentbehrlichen Biomasse-Mengen in getrennter Sammlung aufzubringen, geschweige denn die Möglichkeiten einer sinnvollen Nutzung des produzierten Komposts.

Im Abfallwirtschaftskonzept für die Stadt Szczecin ist ein Szenario (leider auch eine Zukunftslösung, weit über das Jahr 2013 voraus) vorgesehen, in dem die Abfallverbrennung angewendet wird und das die Abfalldeponierung auf 14% der produzierten Abfälle beschränkt. Das ist in den gegebenen Umständen zweifellos eine richtige und begründete Lösung, jedoch entscheidend zu weit zeitlich entfernt, als das den Realien und Terminen der Beitrittsverpflichtungen entsprechen sollte.

Auch im Abfallwirtschaftskonzept für die Schlesische Woiwodschaft wird eine Müllverbrennungsanlage berücksichtigt. Die Gesamtmenge der zur Zeit in dieser Woiwodschaft produzierten Kommunalabfälle beträgt ca. 1,7 Mio. Mg/a. Im Jahr 2015 werden es ca. 2,0 Mio. Mg/a sein, davon müßten 500 Tsd. Mg/a biologisch abbaubare Abfälle ausgeschieden werden.

Die Strategie der Abfallbewirtschaftung, die in der Schlesischen Woiwodschaft zur Realisierung vorgesehen ist, basiert auf regionalen Lösungen. Es wurde der Bau von acht komplexer Abfallbehandlungsanlagen angenommen, die 60% der Gesamtabfallmenge aus der ganzen Region aufnehmen würden. In Rahmen dieser komplexen Anlagen wird geplant, bis 2015 zwei Müllverbrennungsanlagen zu bauen, die mindestens 20% Abfallmenge der Schlesischen Woiwodschaft behandeln würden. Die

übrigen Abfälle würden durch lokale Systeme entsorgt werden.

Im Abfallwirtschaftskonzept dieser Woiwodschaft wurde gleichzeitig auf die Zweckmäßigkeit der Verbindung der Abfallwirtschaft mit der Berufenergiewirtschaft hingewiesen. Diese Idee schwebt den gegenwärtigen Initiativen vor, die vorhaben, bei einem der schlesischen Kraftwerke eine MVA zu errichten.

Laut den Prognosen für das Jahr 2010 würde die Gesamtmenge der im Zentralteil der Woiwodschaft produzierten Abfälle ca. 480 Tsd. Mg/a betragen; davon würden in die geplante MVA ca. 250 Tsd. Mg/a abgeführt werden. Auf Grund der in Katowice durchgeführten Untersuchungen der Kommunalabfälle wurde der Heizwert dieser Abfälle auf 8 MJ/kg geschätzt.

Man könnte ähnliche Erwägungen, die aus den Abfallwirtschaftskonzepten der Woiwodschaften oder Gemeinden resultieren, auch für andere große polnische Städte anführen, wie z.B. für Łódź, Poznań oder Warszawa.

Eine Zusammenfassung der Perspektiven für den Bau von MVA in Großstädten stellt die **Tab. 3** vor, in der einzelne Städte aufgelistet sind, Annäherungskapazitäten der projektierten Anlagen angegeben und der vorgesehene Termin der Inbetriebnahme (der jedoch immer wieder verschoben wird) genannt werden.

Aus den Daten der Tabelle geht hervor, dass es keine Chance gibt, bis Ende 2010 in Polen eine MVA zu bauen, die die im Kapitel 3 vorgestellte Anforderung bezüglich Reduzierung von biologisch abbaubaren Abfällen unterstützen könnte. Das Jahr 2010 ist ausdrücklich als erste gesetzmäßig vorgeschriebene Etappe für Reduzierung solcher Abfälle festgelegt. Es ist jedoch möglich, dass bis zur nächsten Etappe der Reduzierung dieser Abfälle, d.h. bis Ende 2013, in Polen mindestens einige Müllverbrennungsanlagen entstehen werden. Dazu ist aber erforderlich, schon heute eine Reihe von Maßnahmen zu unternehmen, vor allem ausführlicher Erarbeitung und schneller Einführung der Landesstrategie für Bau von solchen Anlagen.

## 5 Zusammenfassung

Die Müllverbrennungsanlagen nehmen einen unanfechtbaren Platz in Systemen der komplexen Abfallwirtschaft ein. Die Städte der 15 EU-Länder und etwa 370 dort betriebene MVA bestätigen diese These ausdrücklich. Die Notwendigkeit der Anwendung von Müllverbrennungsanlagen folgt aus dem EG-Recht, das in die polnischen Rechtsvorschriften implementiert wurde. Die zur Zeit in den EU-Ländern betriebene, zu bauende und geplante Müllverbrennungsanlagen sind moderne, völlig umweltfreundliche Objekte, die sehr strenge Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffemission erfüllen müssen.

lysiert werden: gesellschaftliche Akzeptanz, das geltende Gebührensystem für Abfallentsorgung, finanzielle Möglichkeiten der Gemeinden und Ausichten auf finanzielle Unterstützung aus dem Kohäsionsfonds. Es sollte auch die Rolle der auf dem kürzlich verabschiedeten Gesetz basierenden öffentlich-privaten Partnerschaften in der Aufstellung des Haushaltes für die oben genannten Investitionen erwogen werden. Klar und ausdrücklich sollen auch die technischen Standards der geplanten Müllverbrennungsanlagen bestimmt werden, damit sie einerseits völlig dem besten verfügbaren technischen Stand entsprechen und andererseits auf technisch bestens entwickelten Lösungen mit genügender Zahl von Referenzen der EU-Länder basieren.

Stadt	Technische Grunddaten der Anlage	Die geplante Inbetriebnahme
Kraków	2 x 115 Tsd. Mg/a, vorgesehen auch für die Verwertung der Abfälle aus den Nachbargemeinden und eventuell der Klärschlämme	nach 2012
Łódź	200 Tsd. Mg/a, auch für Nachbargemeinden Pabianice, Zgierz, Ozorków, Aleksandrów, Łask, Konstantynów; insgesamt für etwa 1 Million Einwohner	nach 2010
Łódź	drei kleine Anlagen je 30 Tsd. Mg/a in der Łódź-Woiwodschaft	nach 2010
Katowice	min. 250 Tsd. Mg/a, regional begrenzte Anlage	2010 – 2015
Katowice	ca. 150 Tsd. Mg/a, regional begrenzte Anlage	2010 – 2015
Warszawa	min. 100 Tsd. Mg/a als zusätzliche Linie für vorhandene Anlage sowie separate Anlage mit über 200 Tsd. Mg/a Kapazität	nach 2010
Poznań	ca. 140 Tsd. Mg/a in Form von Brennstoff aus Müll	nach 2010
Szczecin	ca. 120 Tsd. Mg/a	nach 2010
Wrocław	ca. 100 Tsd. Mg/a – Herstellung von Ersatzbrennstoff als Folge der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung	nach 2010
Gdansk	ca. 100 Tsd. Mg/a – lokale Initiativen von Tczew, Kolbudy, Łężyce	nach 2010

Tab. 3: Perspektiven des Baus von Müllverbrennungsanlagen in Polen

Man soll möglichst schnell damit beginnen, die Anlagen dieser Art in erster Linie in polnischen Großstädten einzuführen, um wenigstens die Anforderungen erfüllen zu können, die für die 2. Etappe der Reduzierung von biologisch abbaubaren Abfällen vorgeschrieben worden sind, d.h. bis Ende 2013.

Es ist notwendig, so schnell wie möglich genaue Analysen von Bedingungen auszuarbeiten, die das bisherige Tempo von Änderungen in der Struktur der polnischen Abfallbehandlungsanlagen beeinflussten, und insbesondere der Müllverbrennungsanlagen. Vor allem sollten folgende Probleme ana-

## 6 Literatur

- /1/ Draft Reference Document in Best Available Techniques for Waste Incineration. Final Draft May 2005, European Commission, European IPPC Bureau, Seville 2005.
- /2/ Sieja L., Pająk T.: Termiczne przekształcanie odpadów dla dużych aglomeracji miejskich (Thermische Abfallbehandlung für Ballungsgebiete). II Międzynarodowa konferencja

- „Termiczne przekształcanie odpadów – za i przeciw”. Materiały konferencyjne, ABRYŚ, Kraków, Oktober 2005, S. 15-27.
- /3/ Sieja L., Pająk T.: Metody termiczne w systemach gospodarki odpadami (Thermische Methoden in Abfallwirtschaftssystemen). VII Polski Kongres Oczyszczania Miast, Materiały konferencyjne. PZliTS Szczecin, September 2004, S. 181 – 189.
- /4/ Pająk T.: Termiczne przekształcanie i współspalanie odpadów komunalnych i osadów ściekowych (Thermische Behandlung und Mitverbrennung von Kommunalabfällen und Klärschlamm). III Międzynarodowa Konferencja: "Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych", CONBIOT 2005, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze. Wisła, Juni 2005.
- /5/ Pająk T.: Termiczne przekształcanie jako element systemu zagospodarowania odpadów komunalnych i osadów ściekowych (Thermische Behandlung als Komponente des Bewirtschaftungssystems von Kommunalabfällen und Klärschlamm). VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KOMKO 2005 „Zarządzanie środowiskiem na terenach uprzemysłowionych – nowoczesne systemy, techniki i technologie”. Zakopane, März 2005, S.135-148.

## **Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes**

### **Institut**

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen und Maschinenteilen
- Konstruktionssystematik
- Rechnereinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus ca. 15 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Technomathematik und Geophysik. Weitere 11 Mitarbeiter/-innen und 7 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

### **Technische Ausrüstung**

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore (Spannungsoptik, Akustik, CIM), verschiedene maschinentechnische Prüfstände und die notwendige Rechnerausstattung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf zwei hydraulischen Verspannprüfständen, einem Torsions-Schwingprüfstand, einem Umlaufbiege- und Torsionsprüfstand, einer statischen Verspanneinrichtung sowie einer separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung durchgeführt werden. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Messwerten werden mit einer 64 Kanal Telemetrie-einrichtung bewältigt. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter), ein Prüfstand für Feinprallmühlen und eine Reaktionsschwingmühle ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Das Labor für statische Spannungsoptik verfügt über Einrichtungen und Werkstattinfrastruktur für spannungsoptische Untersuchungen an Bauteilmodellen von mikroskopischer Größe bis zu einer Größe von ca. 1 m. Die hierzu zum Teil notwendige eigenspannungsarme Bearbeitung von Modellmaterialien werden von der Institutswerkstatt ebenso sachkundig ausgeführt wie die aufgabenspezifische Anfertigung von Belastungseinrichtungen. Die technische Ausstattung des Labors für dynamische Spannungsoptik ermöglicht Messungen an hochfrequent belasteten Bauteilen. Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers können Bauteile gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 5 kHz unterworfen werden. Der Einsatz optischer Ganzfeldmessverfahren ermöglicht darüber hinaus auch die Visualisierung sich einstellender Beanspruchungszustände, wie sie bei Stoßanregungen auftreten.

Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Messequipment auf dem neuesten Stand der Technik ausgestattet worden:

- Oros Signalanalysatoren mit 4 und 32 Kanälen mit einer Bandbreite von bis zu 102kHz pro Kanal zur Echtzeitverarbeitung
- 3 Modalshaker (1kN, 200N, 10N)
- Rotations-Laservibrometer
- Intensitätsmesssonde
- Diverse akustische Sensoren
- Oros Signalanalyse Software
- Vibrant Me´Scope Modalanalyse Software
- Matlab als Software für Sonderfunktionen

Darüber hinaus verfügt das IMW über einen schallarmen Messraum. Zur maschinenakustischen Beurteilung von Maschinenstrukturen stehen alle gängigen Analyseverfahren wie beispielsweise:

- FFT
- Oktav-Analyse
- Synchrones Order Tracking
- Constant Band Tracking
- Farbwasserfall- und Farbspektrogrammdarstellungen

zur Verfügung. Darüber hinaus kann der Analysator als Standalone-Recorder für Mobile Anwendungen eingesetzt werden.

Das CIM-Labor besteht aus zwei 4-Achsen-Fräsmaschinen (MAHO MH700S/MH600), einer Drehmaschine (Monforts MNC 5), einer Senkerodiermaschine (CHARMILLER ROBOFORM 505) mit 3D-Bahnsteuerung, und einer ZEISS Koordinatenmessmaschine mit NC-Rundtisch. Zur CAM-Lösung der Firma DLoG gehören ein werkstattorientiertes NC-Programmiersystem, Einrichtungen zur Direktübertragung von NC-Programmen an die Maschinensteuerungen und Anwendungen zur Maschinen-/Betriebsdatenerfassung sowie zur Maschinenzustandsanzeige. Als CAD/CAM-System wird CATIA V5 und Pro/Engineer mit Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. Als PDM-System kommt axalant™ von EIGNER auf einer ORACLE8i-Datenbank zum Einsatz.

Die Recherausstattung umfasst mehrere Server, welche die insgesamt ca. 130 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. verschiedene Internetserver (WWW/FTP), einen Windows Domänencontroller, einen Server für Datenbankdienste und einen Abteilungsserver SUN Enterprise 450 zum Betrieb der 60 SUN Workstations. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung, u. a. die CAD-Pakete ProEngineer Wildfire 2.0 und CATIA V5 sowie die FEM-Programme MARC/MSC.PATRAN, ANSYS 8.1 und ProMechanica.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette zum Lasersintern von metallischen Bauteilen. Hierzu gehören im Einzelnen eine Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 der Firma EOS, zum Generieren von Prototypen, Funktionsteilen und Werkzeugen (Formen und Elektroden), verschiedene Konstruktionsarbeitsplätze (ProE, CATIA V5), Software zur Rapid Tooling gerechten Aufbereiten der CAD-Daten (Magics RP), Apparaturen und Geräte zum Infiltrieren und Beschichten der Sinterbauteile mit Harzen und niedrig schmelzenden Metallen, eine Sandstrahlkabine für verschiedene Strahlmedien (Stahlkugeln, Keramikpulver, Nussgranulat usw.) sowie Arbeitsplätze zur manuellen Nachbearbeitung der Rapid Tooling Erzeugnisse.

Im Bereich der multimedialen Lehre verfügt das IMW über mehrere Kamerasysteme zur Aufnahme

und Übertragung von Lehrveranstaltungen und praktischen Experimenten. In einem eigens errichteten Multimediaraum können Multimediale Lehrveranstaltungen mit unter anderem einer 100“ Rückprojektionswand durchgeführt werden.

### **Kooperationsangebote**

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

#### *Entwicklung, Konstruktion und Fertigung*

- Entwicklung neuer Konstruktionen (z.B. Prüfstände und Mühlen),
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen,
- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien,
- Softwareentwicklung zur Simulation und Optimierung von Fertigungsverfahren und zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses.
- Konstruktion und Herstellung von metallischen Formen, Funktionsteilen und Prototypen durch direktes Lasersintern (Rapid Tooling).
- Spritzgießen kleinerer Kunststoffteile (PE, PP) in geringen Stückzahlen mit Hilfe einer Spritzgusspistole.

#### *Versuche, Messungen und Berechnungen*

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D),
- Erarbeitung von Berechnungsansätzen für Maschinenelemente
- Schadensfallanalysen
- Vermessung und Qualitätskontrolle auf der Koordinatenmessmaschine,
- DMS-Messungen unter Betriebsbedingungen an Maschinenteilen,
- Durchführung von maschinenakustischen Untersuchungen und Optimierungen,
- Durchführung von Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen auf den Prüfständen.

#### *Beratung und Gutachten*

- Beratung, Untersuchung und Erstellung von Gutachten zur Bauteilfestigkeit,
- Beratung, Untersuchung und Gutachten zur Konstruktion lärmarmen Maschinen,

- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen,
- Beratung und Hilfestellung bei der Beantragung und Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung werden im Institut auch Entwicklungsprojekte für komplette Maschinen und Steuerungen durchgeführt. Die Zusammenarbeit kann auch über Praktika, Studien- und Diplomarbeiten erfolgen.

Neben den oben aufgeführten Angeboten bietet das Institut für Maschinenwesen interessierten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen, Beratungen zu den europäischen Förderungsmaßnahmen an. Dies beinhaltet neben der Beratung zur Einwerbung von Fördermitteln auch Hilfestellung bei der Vorbereitung, der Durchführung und der Partnersuche bei europäischen Forschungsprojekten.

### **Forschungsschwerpunkte**

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

#### *Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen*

Neben allgemeinen Fragen der Grundlagen des Maschinenwesens wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente besonders im Vordergrund:

- Zahn- und Keilwellen-Verbindungen,
- Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen,
- Innenhochdruckgefügte und konventionelle Preßverbindungen mit geometrischen Schwächungen (z.B. Axial- oder Radialbohrungen in Welle und/oder Nabe),
- Torsionssteife Doppelmembrankupplungen mit Ausgleichsfunktion in radialer und axialer Richtung,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Stahldrahtseile,
- Bolzen-Lasche Verbindungen,
- Verbindungstechnik Metall-Keramik bei hohen Temperaturen,
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen.

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile, mit der elastoplastischen Beanspruchung von Maschinenelementen und der Entwicklung von Berechnungssoftware für Maschinenelemente.

#### *Konstruktionssystematik und Rechnereinsatz im Maschinenbau*

Die Entwicklung von Konstruktionsinformationssystemen zur Unterstützung des Produktentwicklers unter Einbeziehung aller Produktlebensphasen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Als Grundlage für ein phasenübergreifendes Arbeiten stehen insbesondere die Entwicklung von Schnittstellen und der Produktdatenaustausch (STEP ISO 10303/ISO 13584) im Vordergrund. Weitere Projekte beschäftigen sich mit:

- dem Management kooperativer Produktentwicklungsprozesse,
- dem Qualitätsmanagement in der Konstruktion,
- der Werkstoffauswahl in der Konstruktion,
- der Simulation, Berechnung und Optimierung von kinematisch komplexen Fertigungsverfahren (Zahnkantenabdachungen, Wirbelfräsen),
- Fehlermöglichkeitseinfluss- und Störfallanalysen,
- dem fertigungsgerechten Konstruieren insbesondere an Bauteilen aus Feinblech.

#### *Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen*

Schwerpunkt der Untersuchungen und Entwicklungen von verfahrenstechnischen Maschinen unter besonderen mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen sind:

- Entwicklung von Reaktionsmühlen,
- Untersuchung der Zusammenhänge beim Prallmahlen,
- Gestaltung schnell laufender Rotoren (Windsichter/Prallmühlen),
- chemisches Recycling von Kunststoffen,
- Niedertemperaturrauchgasentschwefelung,
- Entwicklung lärmarmen, schnell laufender Mühlen.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit KI-Systemen und der Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik und der Baureihenentwicklung.

### *Maschinenakustik*

Im Rahmen der Maschinenakustik werden Forschungsarbeiten zur Lärminderung von Bauteilen und Maschinensystemen durchgeführt. Für experimentelle Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanz- und Dämpfungselementen steht entsprechende Messwerterfassungs- und Verarbeitungshard- und -software zur Verfügung. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Konstruktionssystematiken und von Beratungssystemen zur Konstruktion lärmarmen Maschinen.

### *Rapid Prototyping / Rapid Tooling*

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet Rapid Prototyping / Rapid Tooling umfassen die gesamte Rapid Tooling Verfahrenskette.

Hierzu zählt im einzelnen:

- die Rapid Tooling gerechte CAD-Konstruktion,
- die Datenaufbereitung für den Sinterprozess,
- der Rapid Tooling Bauprozess einschließlich der Untersuchung von neuen Sinterparametern und Sinterwerkstoffen und
- die Nachbearbeitung bzw. das Finishen der Sinterbauteile durch Beschichten und Infiltrieren.

Weiterhin werden die Anwendungsgebiete der Rapid Tooling Technologie betrachtet wie z. B. die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen und das Sintern von Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss oder Faserverbundkonstruktionen sowie das Generieren von Funktions- und Einsatzteilen mittels neu entwickelter Sinterwerkstoffe und Sinterstrategien.

## Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.2001

### Veröffentlichungen 2001

Düsing, C.: The emerging ISO Standard STEP AP-233 - A key enabler for systems engineering across different domains. International Symposium on Systems Integration; Baden Baden; 2001

Düsing, C.: Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung mit STEP - AP-233 3. Workshop Konstruktionstechnik; Rostock; 2001

Müller, N.; Trenke, D.: Rapid Prototyping und Rapid Tooling am Institut für Maschinenwesen, Begleitband zur Informationsveranstaltung, IMW, 02.02.2001, Clausthal-Zellerfeld

Trenke, D.: Die Rapid Tooling Verfahrenskette, Vortrag, 8. Fachausschuss der Deutschen Keramischen Gesellschaft, CUTEC, 10. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld

Trenke, D.: Anwendung von Rapid Prototyping und Rapid Tooling in der Produktentwicklung, Informationstechnologie - Grundlagen und Anwendungen, Tag der Forschung 2001, TU Clausthal, 25. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld

Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, Cuvillier Verlag Göttingen, 2001

Dietz, P.; Mupende, I.; Otto, S.: Der Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung Zeitschrift Fördern und Heben März 2001

Otto, S.: Bauelement zur Bewegungsumwandlung in Verbrennungsmotoren Kurbelschleife TU Contact Juni 2001

Wächter, M.: BLK-Projekt: Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlussbericht AP4 Internationalisierung, 2001

Dietz, P.; Tawil, M.: 3D-Produktmodellierung in der Entwicklungskette - Aufwand und Nutzen. VDI-Tagung "Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung 2001 - Effiziente 3D-Produktmodellierung - Fortschritte und Fallstricke", 19.-20. Juni 2001, Stuttgart - anlässlich CAT Engineering 2001

Heider, G.: Konstruktive Gestaltung von Steuerungen für Hochleistungskolbendampfmaschinen. Dissertation TU Clausthal 2001

Große, A.: Interdisziplinäre Werkstoffauswahl durch Aufbau eines Material Data Mart. Dissertation TU Clausthal 2001

Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal, VDI Verlag 2001

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen. Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Schäfer, G.: Berichte aus der Praxis zur Fertigung von Zahnwellenverbindungen. Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Birkholz, H.: Die Auswahl der geeigneten Welle-Nabe-Verbindung - Längsstift-Verbindungen als Alternative? Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Dietz, P.; Garzke, M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefügten Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Schäfer, G.: Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Düsing, C.: Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung mit STEP - AP-233, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen - Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Preßverbindungen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 23./24.10.2001, Chemnitz

Schäfer, G.; Grünendick, T.: Preßverbindungen durch Innenhochdruckfügen, Seminar „Preßverbindungen“

dungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 23./24.10.2001, Chemnitz

Gummersbach, F.: Lärmarm konstruieren XIX. Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten, Dissertation, TU Clausthal, Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven, 2001

Beisheim, N.: Entwicklung eines wissensbasierten Informationssystems zur Durchführung präventiver Sicherheitsanalysen am Beispiel der Konstruktion verfahrenstechnischer Anlagen und Maschinen, Dissertation, TU Clausthal, VDI Verlag 2001

Heimannsfeld, K.: Modellbasierte Anforderungen in der Produkt- und Systementwicklung, Dissertation, TU Clausthal, Shaker Verlag Aachen 2001

Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen - Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen. Konferenz-Einzelbericht, Tagung, Würzburg, 18.-19. Okt. 2001, VDI-Berichte, Band 1595 (2001) Seite 121-148 (28 Seiten, 21 Bilder, 15 Quellen), VDI-Verlag, Düsseldorf

Dietz, P.; Wächter, M.: BLK-Projekt - Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlußbericht AP4 Internationalisierung, 2001

Dietz, P.; Gummersbach, F.: Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele. Bremerhaven : Wirtschaftsverl. NW, Verl. f. Neue Wiss., 2001

### Veröffentlichungen 2002

Grünendick, T.: Fester Presssitz durch "hydraulisches Aufweiten". TU Contact, Nr. 11/6, Oktober 2002

Klemp, E.: Unterstützung des Konstrukteurs bei der Gestaltung von Spritzgussbauteilen hergestellt im Rapid Prototyping und Rapid Tooling Verfahren, Dissertation, TU Clausthal, Mai 2002.

Wächter, M.; Hennecke, P.: Leistungspunktsystem für Ingenieure; Workshop Leistungspunktsystem, 2. Juli 2002, Aachen

Otto, St.; Mupende, I.; Dietz, P.: Influence of Hoisting Drum Winding System on the End Plate Loads, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Düsing, C.: Potentialities of Application of the Emerging Systems Engineering Standard AP233,

7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Birkholz, H.: Design of Axial Pin Connections for Torque Transmission, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Schäfer, G.; Garzke, M.: INCREASING LOAD CAPACITY OF SPLINES DUE TO DESIGN, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Otto, St.; Mupende I.; Dietz, P.: Influence of the hoisting drum winding system on the end plate loads, 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002

Birkholz, H.: Längsstift-Verbindungen als Alternative zur Passfeder? Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2002, Chemnitz

Schäfer, G.: Schadenskunde von Zahnwellenverbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2002, Chemnitz

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2002, Chemnitz

Schäfer, G.; Grünendick, T.: Preßverbindungen durch Innenhochdruckfügen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.09.2002, Chemnitz

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Preßverbindungen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.09.2002, Chemnitz

Schäfer, G.; Böhm, E.: Methoden zur Innovationsfindung - Wie findet man neue Ideen? Veranstaltungsreihe Innovationstraining für kleinere und mittlere Unternehmen, 7.11.2002, Hildesheim

### Veröffentlichungen 2003

Dietz, P.: Dimensioning and design of shaft to collar connections. 8<sup>th</sup> Cairo University Conference on Mechanical Design and Production Engineering, 4 – 6. January 2003

Dietz, P.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau 28.-19. Jan. 2003, Clausthal

Dietz, P.; Grünendick, T.: Interdisziplinäre Lösungsfindung am Beispiel der Welle-Faserverbund-Nabe-

- Verbindung. 9. Nationale Symposium der Sampe, 19./20.02.2003, Clausthal
- Schäfer, G.: Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen. Seminar „Pressverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 25./26.03.2003, Chemnitz
- Birkholz, H.; Grünendick, T.: Die Auswahl der geeigneten Welle-Nabe-Verbindung – Längsstift-Verbindungen als Alternative. Seminar „Pressverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 25./26.03.2003, Chemnitz
- Goltz, M.; Müller D.; Müller N.: PDM/PLM - Verwaltung von Produktdaten. ITZ Berichte, Band 1, Heft 4, April 2003, Clausthal
- Trenke, D.: Die Rapid Tooling-Verfahrenskette, TU Contact Nr. 12, 7. Jahrgang, TU Clausthal, Mai 2003
- Wächter, M.: Kompetenzen eines Maschinenbau-Ingenieurs. Workshop "Die Berufsqualifikation und die Arbeitsbelastung der Studierenden - die qualitativen und quantitativen Gestaltungsgrundlagen für Leistungspunktesysteme in der Hochschulbildung", 21.-22.05.03 Weimar
- Düsing, C.; Kamel, N.; Müller D.: Product Knowledge Management for the Extended Enterprise. Proceedings ICE 2003, 9<sup>th</sup> International Conference on Concurrent Engineering, Espoo, Finland, 16-18 June 2003
- Trenke, D.; Müller, N.: Rapid Prototyping und Rapid Tooling am Institut für Maschinenwesen, Begleitband zur Informationsveranstaltung, IMW, 22.07.03
- Dietz, P.; Mupende, I.: Druckkämme unter instationärer Axialkraftbelastung; Abschlußbericht zum DFG-Forschungsprojekt, Di 289 / 24-1; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Juli 2003
- Backhaus, S.: Maschinenakustik am Institut für Maschinenwesen. WGMK-Jahrestagung 2003, Clausthal-Zellerfeld, Sept. 2003
- Schäfer, G.: Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen. Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, 23./24. Sept. 2003, Dresden, ISBN 3-86130-201-2
- Dietz, P.: Metodología del Diseno. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) 10. Sept. 2003
- Dietz, P.: Modelos de estudio innovativos para la formación del ingeniero. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) Sept. 2003
- Dietz, P.: Oportunidades y Problemas de un Sistema de Acreditación de dos Niveles: La Experiencia de Alemania. Taller de Inducción a los Miembros Designados del Consejo Centroamericano de Acreditación de la Educación Superior CCA. Guatemala 9.-13. Sept. 2003
- Mupende, I.; Otto, St.: Dimensionierung und Gestaltung von Leichtbauseiltrommeln. WGMK-Jahrestagung 2003, Clausthal-Zellerfeld, Sept. 2003
- Otto, St.: Das Beanspruchungsverhalten mehrlagig bewickelter Seiltrommeln unter nicht-rotationssymmetrischer Belastung. Dresdener Maschinenelemente Kolloquium 2003, Dresden, Sept. 2003
- Otto, St.: Das Beanspruchungsverhalten mehrlagig bewickelter Seiltrommeln unter nicht-rotationssymmetrischer Belastung. Kolloquium Konstruktionstechnik 2003, Rostock, Okt. 2003
- Dietz, P.; Mupende, I.; Otto, S.: Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung einer Seiltrommel. TU Contact, Nr. 13/7, Oktober 2003
- Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen – Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen. Veröffentlicht in:
- 14. Symposium der DGM Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 2.-4.07.2003, Wien
  - Konstruktion 55 (2003), Heft 9, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
  - TU Contact, Nr. 13/7, Oktober 2003
- Schäfer, G.: Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen. VDI-Berichte 1790, VDI Tagung Wiesloch Sept. 2003, ISBN 3-18-091790-3
- Dietz, P.; Grünendick, T.: Leistungsfähige Welle-Nabe-Verbindungen durch Innenhochdruckfügen. VDI-Tagung „Welle-Nabe-Verbindungen“, Heidelberg, 19./20.11.2003
- Dietz, P.: Welle-Nabe-Verbindungen – nichts Neues zu erforschen? Wolfgang Beitz Gedenkkolloquium 21.11.2003 Berlin
- Dietz, P.: Por que Crear un Sistema de Acreditación en Educación Superior y como Asegurar su Credibilidad Nacional e Internacional. Perspectiva del Consejo de Acreditación de Alemania (AKKREDITIERUNGSRAT). IV Foro Centroamericano por la Acreditación de la Educación Superior. Nov. 2003. Panama
- Trenke, D; Estrin, J.: Selbsttragende Strukturen als neues Designprinzip, Neue Materialien und Verfahren, Technologieinformationen niedersächsischer Hochschulen, Dezember 2003

### Veröffentlichungen 2004

Dietz, P.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelte Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau, 28./29. Januar 2004, Clausthal

Dietz, P.; Grünendick, T.: Welle-Nabe-Verbindungen – nichts mehr zu entwickeln? Innenhochdruck-Fügeverfahren für Welle-nabe-Verbindungen. Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung, Nr. 1/2-2004

Dietz, P.; Wächter, M.: BLK-Projekt: Entwicklung und Erprobung eines integrierten Leistungspunktesystems in der Weiterentwicklung modularisierter Studienangebote am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlussbericht AP4 - Internationalisierung, 2004

Wächter, M. und Mitautoren: Das Berufsbild des Ingenieurs - Mindestanforderungen an die allgemeinen und Fachkompetenzen, Workshop "Modul- und Leistungspunktemanagement 2004: Konzepte und Erfahrungen bei Bewertung, Anerkennung und Austausch von Modulen", Workshop in Leipzig, 2004

Trenke, D.; Estrin, J.: Selbsttragende Strukturen aus selbstverzahnten Bausteinen und deren Herstellung durch Rapid Tooling, Exponatbeschreibung Hannover Messe 2004, TU Clausthal, April 2004

Dietz, P.; Mupende, I.; Otto, S.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelbare Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. 12. Internationale Kranfachtagung 30.4.2004, Bochum

Müller, D.; Goltz, M.; Müller, N.: PLM – Management of product data without limits !?, Mai 2004

Dietz, P.: Design criteria for multilayer wound winch drums following lightweight design principles. 8<sup>th</sup> International Design Conference, 17-20. Mai 2004, Dubrovnik, Kroatien

Dietz, P.: Development of low noise products using sound flow analysis. Noise Control'04 06.-09. Juni 2004, Gdynia, Polen

Dietz, P.: Auslegungskriterien für mehrlagig bewickelbare Seiltrommeln nach dem Prinzip des Leichtbaus. Glückauf Forschungshefte, Nr. 2, Juli 2004

Schäfer, G.; Garzke, M.; Grünendick, T.: Innenhochdruckfügen von Welle-Nabe-Verbindungen. PNEU-HIDRO 2004, 21.-23.09.2004, Miskolc-Eger, Ungarn

Schäfer, G.: Einsatz hochgenauer Schraubwerkzeuge. PNEU-HIDRO 2004, 21.-23.09.2004, Miskolc-Eger, Ungarn

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen, Seminar „Pressverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 18./19.11.2004, Chemnitz

### Veröffentlichungen 2005

Rolshofen, W.; Dietz, P.; Schäfer, G.: TAI-CHI-Tangible Acoustic Interfaces for Computer-Human Interaction, 31. Jahrestagung für Akustik „DAGA'05“, Deutsche Gesellschaft für Akustik, 14.-17.03.2005, München

Schäfer, G.: Schadenskunde von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 15./16.03.2005, Chemnitz

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen, Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 15./16.03.2005, Chemnitz

Düsing C., Müller D., Schäfer G.: Konstruktionsmethodik als Exportschlager – Kontinuierliche Kooperation mit Südostasien, TU Contact, Nr. 16, 10. Jahrgang, Clausthal-Zellerfeld, Mai 2005

Grünendick T., Müller D., Rolshofen W.: Die Fabrik der Zukunft - ein europäisches Netzwerk, TU Contact, Nr. 16, 10. Jahrgang, Clausthal-Zellerfeld, Mai 2005

Schäfer, G.: Mechanik, Schäden an Großmaschinen, Tagung „Schadensfalluntersuchung“, Haus der Technik, 7./8.06.2005, Essen

Dietz, P.; Grünendick, T.; Guthmann, A.; Korte, T.: Construction using combined materials – possibilities and limits, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Goltz, M.; Müller, D.; Schmitt, R.; van den Bosche, M.: Overcoming the challenges of product development and engineering changes in a distributed engineering environment, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Müller, D.: Knowledge-based and requirements-driven product development, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Trenke, D.; Rolshofen, W.: Rapid Tooling Process Chain, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Rolshofen, W.; Ming, Y.; Wang, Z.: Acoustic Holography in-Solids for Computer-Human Interaction, Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems, 04.-15.07.2005, Cardiff, GB

Schäfer, G.; Wächter, M.: ECTS – Modularisation - Workload, ICEE 2005 International Conference on Engineering Education, 25.-29.07.2005, Gliwice, Poland, ISSN 1562-3580

Schäfer, G.: eLearning Academic Network, ICEE 2005 International Conference on Engineering Education, 25.-29.07.2005, Gliwice, Poland, ISSN 1562-3580

Schäfer, G.: Joint Degrees in Binational Studies, ICEE 2005 International Conference on Engineering Education, 25.-29.07.2005, Gliwice, Poland, ISSN 1562-3580

Ratchev, S.; Pawar, K. S.; Urwin, E.; Müller, D.: Knowledge-enriched requirement specification for one-of-a-kind complex systems, Concurrent Engineering - Research and Application Journal, Vol. 13, No.3, pp. 171-184, September 2005

Müller, D.: Improvement of engineering design processes, Workshop on Statistics in Innovation and the Design Process, ENBIS conference, 14. September 2005, Newcastle upon Tyne, Großbritannien

Schäfer, G.; Wächter, M.: Forming of shaft-hub connections with circular toothed splines, MSD-IE conference, 22.-23. September 2005, Wroclaw, Poland

Rolshofen, W.; Soroka, A.; Eldukhri, E.; Müller, D.: I\*PROMS - Innovative Production Machines and Systems, MSD-IE conference, 22.-23. September 2005, Wroclaw, Poland

Dietz, P.; Grünendick, T.; Guthmann, A.; Schäfer, G.: Internal high pressure assembled press fit shaft-hub connections, MSD-IE conference, 22.-23. September 2005, Wroclaw, Poland

## Studien- und Diplomarbeiten am IMW im Jahr 2005

Fischer, Oliver: Simulation zur Herstellung von Zahnwellen mit einem Novikov-Profil. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Schmidt, Marion: FE-Berechnungen zur Optimierung des Novikov-Zahnprofils bei Welle-Nabe-Verbindungen. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Cordes, Malte: FE-Berechnungen zur Optimierung des Novikov-Zahnprofils bei Welle-Nabe-Verbindungen. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Labaste Ponce, César Antonio: FE - Simulation zur Herstellung von Zahnnaben mit dem Novikov-Profil. Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Freiberger, Falk: Das Beanspruchungsverhalten einer nicht rotationssymmetrisch belasteten Kreiszyllinderschale. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Kramer, Wiebke: Simulation von Tiefziehprozessen mit der Finiten Elemente Methode. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Mosah, Teneng: Determination of the load acting on the drum a multilayers winch winded with a synthetic fiber rope by taking into account the drum deflection. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Zech, Kristin: Entwicklung eines Ersatzmodells für das Seilpaket bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit einem Kunststoffseil. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Schwarzer, Tim: Entwicklung eines Baureihensystems für eine Welle-Nabe-Verbindung mit Sonderverzahnung für den Nabenaußendurchmesser von  $D_a$  18,45 mm bis 139,3 mm und den Wellendurchmesser von 8,28 mm bis 62,35 mm. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Schwarzer, Tim: Bemessung der Beanspruchungen im Mantel der Seiltrommel D480 mit fünf Lagen und einem Seildurchmesser  $d_s = 23$  mm unter einer Seilzugkraft  $F_s = 50$  kN. Studienarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Schwarzer, Tim: Beanspruchungsanalyse einer mehrlagig bewickelten Trommel mit einem Kunst-

stoffseil anhand der Finite Elemente Methode und Optimierungsvorschläge ihrer Gestaltung. Diplomarbeit, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2005

Nicht berücksichtigt sind Studien- und Diplomarbeiten, für die ein Sperrvermerk existiert.

## Autoren

*Backhaus, Stefan:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.6.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. backhaus@imw.tu-clausthal.de

*Dietz, Peter:* Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln, seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 1.10.1980 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW. dietz@imw.tu-clausthal.de

*Guthmann, Anke:* Jahrgang 1976, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. guthmann@imw.tu-clausthal.de

*Korte, Thomas:* Jahrgang 1972, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. korte@imw.tu-clausthal.de

*Müller, Dirk:* Jahrgang 1969, studierte Technomathematik an der TU Clausthal, seit 1.1.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. dmueller@imw.tu-clausthal.de

*Mupende, Yvon Ilaka:* Jahrgang 1964, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität von Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, Gastwissenschaftler am IMW von Oktober 1996 bis Oktober 2000, seit November 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion im Januar 2001 über das Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Seiltrommel unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. mupende@imw.tu-clausthal.de

*Nsenga Biansompa, Elie:* Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität von Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, seit 1.4.2001 Gastwissenschaftler am IMW. nsenga@imw.tu-clausthal.de

*Qingsong, Hua:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Liaoning, VR China, seit 1.4.01 Gastwissenschaftler am IMW. mwqh@imw.tu-clausthal.de

*Pajak, Tadeusz:* Jahrgang 1950, studierte allgemeinen Maschinenbau und Energiewirtschaft an

der Berg- und Hüttenakademie Kraków, Polen, seit 1.10.76 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Mechanische Verfahrenstechnik und Robotik, Promotion 1981 über die Strömungsverhältnisse an Radialventilatoren, Gutachter des Umweltministeriums, Berater polnischer Kommunen in Entscheidungsfragen.

pajak@imir.agh.edu.pl

*Ring, Christopher:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. ring@imw.tu-clausthal.de

*Rolshofen, Wolfgang:* Jahrgang 1975, studierte Geophysik an der TU Clausthal, seit 1.5.2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. rolshofen@imw.tu-clausthal.de

*Schäfer, Günter:* Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.89 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, seit 2002 akademischer Oberrat, Promotion im November 1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen.

schaefer@imw.tu-clausthal.de

*Sambale, Bianca:* Jahrgang 1973, studierte Technomathematik an der TU Clausthal, seit 1.2.2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. sambale@imw.tu-clausthal.de

*Seitz, Tobias:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. seitz@imw.tu-clausthal.de

*Soroka, Anthony:* Jahrgang 1974, studierte Elektrotechnik an dem Manufacturing Engineering Centre Cardiff (MEC)/Wales, seit 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am MEC.

sorokaaj@Cardiff.ac.uk

*Sover, Alexandru:* Jahrgang 1975, studierte Maschinenbau an der Nord-Universität Baia Mare/Rumänien, seit 18.8.2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

sover@imw.tu-clausthal.de

*Wächter, Martina:* Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW. waechter@imw.tu-clausthal.de