

# FORSCHUNGSBERICHT 08



Siemens Healthcare ist weltweit einer der größten Anbieter im Gesundheitswesen und steht für innovative Produkte und Komplettlösungen sowie für ein umfangreiches Angebot von Dienst- und Beratungsleistungen. Siemens Healthcare beschäftigt weltweit mehr als 48.000 Mitarbeiter und ist in über 130 Ländern präsent. Für unseren Standort **Kemnath** suchen wir für die Division Imaging & IT regelmäßig engagierte

## Maschinenbauer, Mechatroniker, Elektroingenieure und Softwareingenieure (m/w)

Die Division Imaging & IT befasst sich mit bildgebenden Systemen für eine frühzeitige Diagnose und Intervention sowie eine effektivere Prävention. Zum Spektrum unseres Geschäftsgebietes Components gehören Geräte und Anlagen der Röntgen- und Aufnahmetechnik, der Urologie sowie Komponenten für die Angiographie, die Computertomographie, die Magnetresonanztomographie, die molekulare Bildgebung und Systeme der Strahlentherapie.

### Ihre Aufgaben

In der Entwicklung konzipieren und testen Sie medizinische Systeme und sorgen insbesondere für die Sicherstellung höchster Qualität und die Erzielung der besten Kostenposition. Um aus den Kundenanforderungen verkaufsfähige Produkte zu entwickeln, ist eine enge Abstimmung mit unseren nationalen wie internationalen Kunden sowie mit Einkauf und Fertigung nötig. Schwerpunkte sind Mechatronik und Software.

In der Produktion sind Sie für die Einführung, Betreuung und Optimierung von Technologie-, Fertigungs- und Prüfprozessen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit, Qualität und Zielkosten unserer Produkte verantwortlich. Dabei ist besonders die Absprache mit der Entwicklung – etwa im Rahmen einer produktionsgerechten Produktgestaltung – von Bedeutung. Unsere internationale Aufstellung erfordert zudem eine enge Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Kulturkreisen, die Fähigkeit zur Beurteilung und Qualifizierung von Lieferanten im In- und Ausland sowie die Planung und Durchführung von internationalen Transfers, Technologiesupports und Produktanläufen.

### Ihr Profil

Sie haben Ihr Studium der Ingenieurwissenschaften erfolgreich abgeschlossen und sind ein analytisch denkender Teamplayer mit hoher Einsatzbereitschaft. Sie verfügen über sehr gute Englischkenntnisse und freuen sich auf den Einstieg in ein Unternehmen mit vielfältigen Weiterentwicklungsmöglichkeiten und ausgeprägter Internationalität.

### Interessiert?

Informationen zu den Stellen finden Sie unter [www.siemens.de/career/jobboerse](http://www.siemens.de/career/jobboerse) (Arbeitsgebiet: Medical). Dort können Sie sich auch direkt online bewerben.

Falls Sie Fragen haben, wenden Sie sich bitte an unser Recruiting-Team, Tel. 09131/84-8448.

Siemens AG – Healthcare Sector

## Healthcare Sector

[www.siemens.de/healthcare](http://www.siemens.de/healthcare)

**SIEMENS**

FORSCHUNGSBERICHT  
DER HOCHSCHULE  
FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN –  
FACHHOCHSCHULE REGENSBURG  
2008

**IMPRESSUM**

- Herausgeber:** Der Präsident  
der Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften – Fachhochschule  
Regensburg  
Prof. Dr. Josef Eckstein
- Redaktion:** Elke Steinberger, Dipl.-Sozialpäd. (FH),  
Referentin für Technologietransfer  
IAFW, Hochschule Regensburg
- Titelgestaltung:** Prof. Pavel Zverina,  
Manuela Apfelbeck,  
Hochschule Regensburg
- Bildmaterial:** Autoren der Fachbeiträge
- Gesamtherstellung:** WEKA info verlag gmbh  
86415 Mering  
www.weka-info.de
- Auflage:** 1200
- Erscheinungstermin:** September 2008

Für die einzelnen Projektberichte liegt die inhaltliche Verantwortung bei den jeweiligen Projektleitern.

**Kontaktadresse:**

Hochschule Regensburg  
Institut für Angewandte Forschung  
und Wirtschaftskooperationen (IAFW)  
Prüfeninger Straße 58  
D-93049 Regensburg  
Telefon: ++49 (09 41) 9 43 13 78  
Telefax: ++49 (09 41) 9 43 14 19  
E-Mail: [iafw@fh-regensburg.de](mailto:iafw@fh-regensburg.de)  
Internet: [www.fh-regensburg.de](http://www.fh-regensburg.de)

Wir danken allen Autoren für die Unterstützung.

ISSN 1860-8655

## HOCHSCHULEN IM WANDEL

Die Hochschullandschaft in Bayern befindet sich derzeit in einer Umbruchphase mit bisher kaum bekannter Dynamik. Dies hat auch Auswirkungen auf die Strukturen und Prozesse an der Hochschule Regensburg (HS.R) – der ehemaligen Fachhochschule. Die neue Bezeichnung macht die Änderungen deutlich, die sich in den letzten Jahren in der Lehre, in der angewandten Forschung und in der wissenschaftlichen Weiterbildung vollzogen haben.

## NEUE STRUKTUREN AN DER HOCHSCHULE REGENSBURG

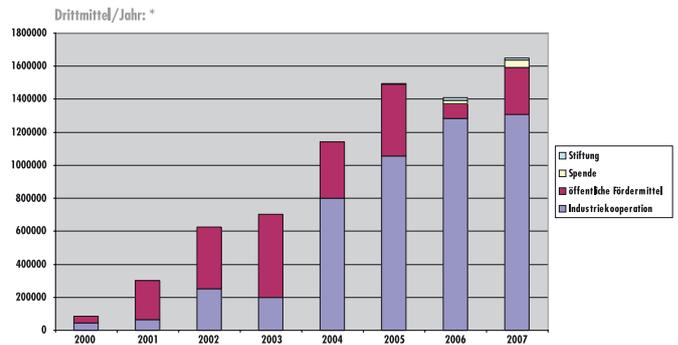
Seit WS 2007/08 sind fast alle Studiengänge auf Bachelor- und Masterabschlüsse umgestellt. Dieser Prozess war verbunden mit einer grundlegenden Restrukturierung einzelner Studiengänge, verbunden mit einer intensiveren Zusammenarbeit über die traditionellen Fakultätsgrenzen hinweg. Zusammen mit dem Entstehen von Querschnittstechnologien, wie z. B. dem Bio-Engineering bildeten sich aus dieser Zusammenarbeit eine Reihe von Kompetenzzentren, die i. d. R. auf die regionale Wirtschaftsstruktur abgestimmt und Bestandteil diverser Netzwerke sind. Durch mehr Verbundprojekte konnten in der Folge auch mehr Drittmittel ein geworben werden.

## 10 JAHRE ANGEWANDTE FORSCHUNG

Forschung und wissenschaftliche Weiterbildung sind kein Selbstzweck, sondern sind eng mit der Kernaufgabe unserer Hochschule, der Lehre verknüpft. Ohne angewandte Forschung und Weiterbildung ist die Aktualität der Lehre gefährdet. Eingeworbene Drittmittel sind nötig um die Labore best möglichst ausstatten zu können. Dies alles ist heute in unserer Hochschule selbstverständliches Gedankengut. Allerdings musste vor 10 Jahren – auch wegen der gesetzlichen Rahmenbedingungen – in diesem Gebiet auf einem sehr bescheidenen Niveau begonnen werden.

## ZAHLEN, DATEN, FAKTEN

Die Entwicklung der Drittmiteleinahmen seit 2000 ist in u. a. Abb. dargestellt, von 30.000 Euro zu Beginn stiegen die Einnahmen auf über 1,4 Mio Euro in 2007. Der Rückgang der Mittelzuflüsse im Rahmen öffentlich geförderter Programme in 2006 wurde kompensiert durch inzwischen sehr rege Industriekooperationen – nicht zuletzt auch befördert durch viele neue Professorinnen und Professoren, die die aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen aktiv nut-

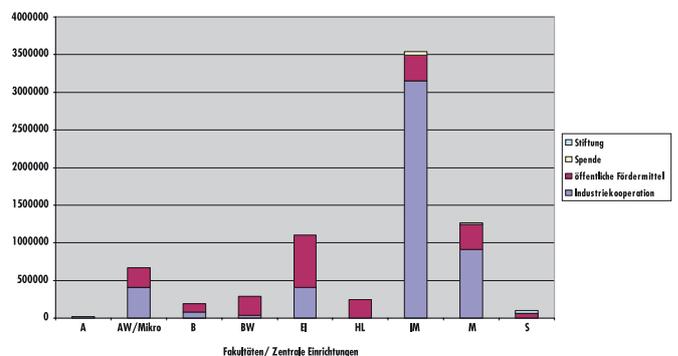


Einnahmen pro Jahr von 2000 bis 2007

zen. Intensivere Förderberatung und –recherche des IAFW schlugen sich in 2007 auch wieder in einer Zunahme der Einnahmen aus öffentlichen Fördermitteln nieder.

## FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN IN ALLEN FAKULTÄTEN

Alle Fakultäten waren bisher an den DM-Einwerbungen beteiligt, allerdings mit unterschiedlichem Gewicht. Die größten Einnahmen erzielte die Fakultät Informatik/Mathematik. Das Competence Center Software-Engineering (CC-SE) warb dabei den Großteil der Gelder ein: seit der Gründung 2004 waren es insgesamt ca. 1,2 Mio Euro. Das CC-SE arbeitet mit seinen Kooperationspartnern Infineon Technologies, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Micron Electronic Devices AG, Continental und dem Landesamt für Finanzen sehr erfolgreich zusammen und beschäftigt heute 15 Mitarbeiter.



Umsatz/Fakultäten/Art der Mittel von 2000 bis 2007

## AUSBLICK

Die in den letzten zwei Jahren begonnene Gründung von Kompetenzzentren hat sich bewährt und wird daher von der Hochschulleitung weiter verfolgt und unterstützt werden.

Bisher haben sich folgende Zentren gegründet:

- Kompetenzzentrum Nano-Analytik und Halbleiterchemie
- Business Simulation Center – BSC
- BISP Regensburg – Biometrics and Sensor Technology Research Center
- Mechatronics Research Unit (MRU)
- Kompetenzzentrum Sensorik
- Competence Center Software-Engineering – CC-SE
- IT-Security Anwenderzentrum
- Zentrum für Bio-Engineering
- IPF – Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung
- Kompetenzzentrum Historische Bauforschung
- Kompetenzzentrum „ForBAU – Virtuelle Baustelle“

Zukünftig sollen insbesondere neue Professorinnen und Professoren im Rahmen der Möglichkeiten bereits sehr früh verstärkt Forschungsaktivitäten entwickeln können. In diesen Überlegungen spielt auch die aktive Einbindung in regionale Netzwerke eine große Rolle. Hervorzuheben ist dabei die Kooperation mit der Universität Regensburg und dem Klinikum. Die Entwicklung gemeinsamer Lehrangebote ist in vielen Fällen begleitet von sehr fruchtbaren kooperativen Forschungsaktivitäten, wie z. B. im Bereich Bio-Engineering. Auch sind kooperative Promotionen für unsere besten Absolventen nur über aktive Forschung möglich. Denkbar sind für die Zukunft auch gemeinsame Graduiertenkollegs. Derzeit wird zusammen mit der Universität Regensburg und anderen ostbayerischen Hochschulen ein solches geplant.

#### **FORSCHUNGSFÖRDERPROGRAMM DES BAYERISCHEN WISSENSCHAFTSMINISTERIUMS FÜR HOCHSCHULEN FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN**

Im April 2008 hatte das Bayerische Wissenschaftsministerium erstmalig ein Forschungsförderprogramm für die Hochschulen für angewandte Wissenschaften ausgeschrieben. Die Hochschule Regensburg war mit ihren Anträgen in beiden Programmsäulen erfolgreich:

Die Programmsäule Forschungsschwerpunkte soll gezielt die anwendungsbezogenen Forschungsbereiche, die bereits über ausgewiesene Forschungscompetenz und -reputation verfügen, stärken. Bei der Auswahl war die ausreichende fachliche Breite und Vernetzung des Forschungsschwerpunktes innerhalb der Hochschule sowie dessen zukunftsfähige Ausrichtung von besonderer Bedeutung.

Mit dem Projektantrag „Miniaturisierte Sensorik als System mit den Anwendungsschwerpunkten Medizintechnik, Biotechno-

logie, Automotive und Automatisierungstechnik“ wurden diese Kriterien erfüllt. Bis zum Jahr 2011 stehen für dieses Forschungsthema insgesamt 600.000 Euro zur Verfügung.

Mit der zweiten Säule sollen anwendungsbezogene Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die gemeinsam mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft durchgeführt werden, unterstützt werden.

Hier überzeugte der Antrag „Vitas3 – Virtuelle und Automatisierte Integration von Softwarefunktionen in verteilten eingebetteten Automobilsystemen unter Berücksichtigung der Anforderungen an die funktionale Sicherheit“. Bis 2011 steht für dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhaben eine Gesamtfördersumme von 260.000 Euro zur Verfügung.

#### **AUSBAU**

Forschungsaktivitäten kommen immer der Lehre zu Gute. Das Ausbauprogramm der Hochschule Regensburg umfasst nicht nur die Schaffung von 592 zusätzlichen Studienanfängerplätzen bzw. im Endausbau von ca. 1.800 zusätzlichen Studienplätzen; es beinhaltet auch die Einführung innovativer neuer Studiengänge, bei denen Synergien aus der fakultätsübergreifenden Zusammenarbeit in Forschung und Lehre genutzt werden sollen.

Dieser Ausbau von Studienplätzen lässt sich nicht ohne zusätzliche räumliche Kapazitäten realisieren. Der Neubau eines Hörsaal- und Seminarraum-Gebäudes ist bereits genehmigt. Der gesamte Raumbedarf für das Ausbauprogramm ist damit allerdings bei weitem noch nicht gedeckt. Dies gilt insbesondere für die fehlenden Laborflächen. Die Hochschule Regensburg hat hierzu für den Doppelhaushalt 2009/10 dringenden Bedarf angemeldet. Ein neues Technik- und Laborgebäude würde nicht nur die derzeitige Aufgliederung auf 3 Standorte beheben, sondern zudem die Forschungskooperation zwischen den Fakultäten immens fördern. Unser Ziel ist daher ein gemeinsamer Wissenschaftscampus, der diese internen Kooperationen ebenso fördert wie die Kooperationen mit unseren Nachbarhochschulen, vor allem der Universität Regensburg.



Prof. Dr. Josef Eckstein  
Präsident der  
Hochschule Regensburg



Prof. Dr. Wolfgang Baier  
Vizepräsident der  
Hochschule Regensburg  
und Leiter des IAFW

**ALLGEMEINWISSENSCHAFTEN/MIKROSYSTEMTECHNIK**

Measurement of the Stability and Investigation of the Rupture Behavior  
of Semiconductor Line Nanostructures by AFM ..... 8  
*Dipl.-Ing. (FH) Daniel Peter, Dr. Michal Dalmer, Dipl.-Ing. Hans Kruwinus, Prof. Dr. Alfred Lechner,  
Leo Archer, Dipl.-Ing. Ernst Gaulhofer, Prof. Dr. Wolfgang Bensch*

The Active Role of Etch Products in Particle Removal by SC-1 Solutions ..... 14  
*Alexander Pfeuffer, Wolfgang Bensch, Prof. Dr. Alfred Lechner, Harald Okorn-Schmidt*

Electrophoretic Studies on Silicon Nitride:  
How Traces of Silicates in UPW Shift Zeta Potential Similar to SC-1 ..... 17  
*Alexander Pfeuffer, Prof. Dr. Alfred Lechner*

**BAUINGENIEURWESEN**

Criteria for Robustness of Structures ..... 20  
*Prof. Dr.-Ing. Dimitris Diamantidis*

Forschungsverbund Virtuelle Baustelle (ForBAU) ..... 26  
*Prof. Dr.-Ing. Thomas Euringer, Dipl.-Ing. (FH) Mathias Obergrießner M.Eng., Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Stockbauer,  
Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Inf. (FH) Claus Plank*

**BETRIEBSWIRTSCHAFT**

Schnellnachweis von Methicillin-resistentem Staphylococcus aureus –  
Ökonomische Aspekte von Screening bei Aufnahme des Patienten  
Berührungslose schlupffreie Wegmessung ohne globale Sensoren ..... 34  
*H. Linde, G. Mißlbeck, H. Wolf, N. Lehn*

**ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK**

Die Via-Array-Testchip-Serie: Status und Perspektiven ..... 42  
*Prof. Dipl.-Ing. Dieter Kohlert*

Konzipierung und Entwicklung eines mobilen Roboters ..... 48  
*R. Steiner, Prof. Dr. Gareth Monkman*

Architekturbeschreibungssprache (ADL) für software-intensive Automotive Systeme ..... 52  
*Matin Hobelsberger, Prof. Dr. Jürgen Mottok, Stefan Kuntz*

Fahreradaptives ACC – Adaption von ACC-Warnungen an die Fahreraufmerksamkeit ..... 56  
*Rainer Schichtl, Prof. Dr. Jürgen Mottok, Benjamin Trefflich*

## INFORMATIK/MATHEMATIK

Smart Shelf . . . . .	60
<i>Georg Völkl, Prof. Dr. Rudolf Hackenberg</i>	
An Integrated Decision Model For Efficient Requirement Traceability In SPICE Compliant Development . . . . .	62
<i>Dipl.-Ing. (FH) Bernhard Turban, Prof. Dr. Markus Kucera, Prof. Dr.-Ing. Athanassios Tsakpinis, Prof. Dr. Christian Wolff</i>	

## MASCHINENBAU

Torque cycle fatigue of wire ropes . . . . .	72
<i>Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem</i>	
Projekt WindMAN . . . . .	76
<i>Prof. Dr.-Ing. Stephan Lämmlein</i>	
Thermodynamische Auslegung der 2-stufigen Abgasturboaufladung für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung für Benzin und Ethanol-E85-Betrieb im Rahmen eines Down-sizing-Konzeptes . . . . .	80
<i>Dipl.-Ing. (FH) Christina Artmann, Dipl.-Ing. (FH) Martin Bock, Dipl.-Ing. (FH) Tobias Braun, Dipl.-Ing. (FH) Markus Heldmann, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Hofherr, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl</i>	
Vergleich von Integrationsverfahren an einem Beispiel aus der Fahrzeugdynamik . . . . .	94
<i>Prof. Dr.-Ing. Georg Rill</i>	
Spray Test Bench	
Kalte Bombe . . . . .	101
<i>Christian Wehle, Markus Preuß, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer</i>	
Parametrische Chassisentwicklung für die Formula Student unter Verwendung der Finiten Elemente Methode . . . . .	107
<i> cand. Ing Ferdinand Solfrank, cand. Ing. Stefan Weigl, Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	
Untersuchungen an Papierhülsen und Spannkonen in der Wellpappenindustrie – Einsparmöglichkeiten durch optimierte Produktionsanlagen . . . . .	111
<i>Dipl.-Ing. (FH) Thomas Schneider, Alfons Gnan, Leiter der Entwicklung, BHS Corrugated GmbH, Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	
Betriebsfestigkeitsanalyse von Schweißnähten mit Hilfe der Finite Elemente Methode . . . . .	120
<i>Dipl.-Ing. (FH) S. Rapp, Dipl.-Ing. (FH) Dr. Friers, D., Dipl.-Ing. (FH) H. Wels, Krones AG, Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	
Bestimmung der Eigenfrequenzen und Eigenformen von Rennskiern mit Hilfe der experimentellen Modalanalyse . . . . .	126
<i>Dipl.-Ing. (FH) Franz Schneider, Dipl.-Ing. Siegfried Schrammel, M.Eng., Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	



## NEUE TECHNOLOGIEN

### *Intralogistische Komplettlösungen*

Kernkompetenz Software für automatisierte Läger:

- **Lagerverwaltung** (Hard- und Software)
- **Kommissionierung** bedeutet Systeme zur Zusammenstellung von Waren für Aufträge
- **Versandssysteme** zur Ermittlung von Versandgewichten, frachtführerspezifischer Etikettendruck für z. B. UPS, TNT ...
- **Staplerleitsysteme** - u. a. Navigationssystem zur Optimierung von Staplerwegen
- **Visualisierung** von Anlagenzuständen sowie Auswertungen und Statistiken

### *Ihr Nutzen als Studierende/r*

- Direkter Kontakt zu **namhaften Kunden** wie Sony, Swarovski, Knauf, Still...
- Einsatz **neuester Technologien**
- Entwicklung und Fehlerdiagnose über Netzwerk direkt beim Kunden
- Entwicklung **intelligenter Steuerungssysteme** für Regalbediengeräte, Materialflussanlagen, etc.
- Effizienter Einsatz von **JAVA und C++** im Zusammenspiel mit **Web-Technologien**

## INNOVATIV

### *Informieren Sie sich bei uns*

Wir bieten:

- **Praktika** in den Bereichen Elektrotechnik und Informatik sowohl im ersten als auch im zweiten Praxissemester
- **Diplomarbeiten** aus den Fachbereichen Informatik und Elektrotechnik

Es wurden bereits zahlreiche erfolgreiche Diplomarbeiten bei uns absolviert.  
Wir freuen uns auf Ihre Bewerbungen!

## EINSETZEN

Klug GmbH integrierte Systeme - Lindenweg 13 - 92552 Teunz  
Tel.: 09671 9216-0 - Fax: 09671 9216-12  
**Kontakt: Angela Klotz, [bewerbung@klug-is.de](mailto:bewerbung@klug-is.de)**

DANIEL PETER<sup>a</sup>, MICHAL DALMER<sup>a</sup>, HANS KRUIWINUS<sup>a</sup>, ALFRED LECHNER<sup>b</sup>, LEO ARCHER<sup>a</sup>,  
ERNST GAULHOFER<sup>a</sup> AND WOLFGANG BENSCH<sup>c</sup>

## MEASUREMENT OF THE STABILITY AND INVESTIGATION OF THE RUPTURE BEHAVIOR OF SEMICONDUCTOR LINE NANOSTRUCTURES BY AFM

The stability of Polysilicon line structures on a Silicon Oxide Nitride layer is presented. This has been measured by Lateral Force microscopy in order to understand how much force can be applied to the structure during a wet cleaning process with subsequent drying. The measured values in the lateral dimension are between 2 and 5  $\mu\text{N}$  which is in the same range as expected by mechanical calculations. SEM review of the damage sites confirmed a round breaking shape. The length of the broken line is around 0.5 to 1  $\mu\text{m}$  with a lower limit of 0.5  $\mu\text{m}$  which is similar to previously reported results on real damage produced by cleaning processes supported with Megasonic energy. The rupture in these experiments occurs clearly in the Polysilicon and not at the interfaces of the structure.

### INTRODUCTION & BACKGROUND

The semiconductor industry is pursuing ever smaller technology nodes at the rate set by "Moore's Law". The drive to smaller structures has been accompanied by rising aspect ratios of several layers including stacked capacitors in DRAMs (AR=20:1 (1)), shallow trench insulator (STI) structures and gate structures. Furthermore, possible post CMOS gate structures like FinFET are also high aspect ratio structures. The high aspect ratio makes these structures increasingly vulnerable to lateral forces which are for example generated in wet cleaning processes supported by Megasonic or spray jet systems. Additionally, a phenomenon called "pattern collapse" previously only seen in photoresist structures is becoming an issue in Polysilicon structures as well. Pattern collapse in photoresist structures is attributed to surface tension effects in the drying step after the wet cleaning (2, 3). Cao's model (3) assumes an unbalanced lateral force on a single structure due to either different spacing between the structures or different fill heights of the fluid inside the structures. Originally, the pattern collapse was attributed to a lack of adhesion of the photoresist on the layer beneath. This resulted in the improvement of the adhesion for example by micro roughening (4). Photoresist structures smaller than 0.2  $\mu\text{m}$  in width have been also reported to break inside the

structure itself (5), thus not experiencing a lack of adhesion. Thus, this paper takes also a look at where the Polysilicon structure breaks in order to identify the weakest spot in the stack. Polysilicon has a higher Young's Modulus which makes Polysilicon structures more stable. Thus it explains that this phenomenon was first seen in photoresist structures and is now becoming an issue in the more delicate Polysilicon structures of today. However, the surface tension effect (capillary force) is just one explanation for the damage seen on the Polysilicon structures. Other effects for example are the spin speed (i.e. centrifugal force) or the drag force of the fluid flowing around the structures. To evaluate their influence on this effect it is necessary to compare the resulting force of these effects to the actual stability of the structure itself. We are measuring the lateral stability of Polysilicon line structures by a LFM technique and compare it to mechanical theory in the subsequent paper.

### MATERIALS AND METHODS

Atomic force and lateral force microscopy (AFM/LFM) (left side of figure 1) can be used to measure the (lateral) stability of nanostructures (6, 7). The main idea is to apply a lateral force with the cantilever tip into the structure. This force has to be sufficient to collapse the structure. The procedure to collapse the pattern will be described in following paragraph.

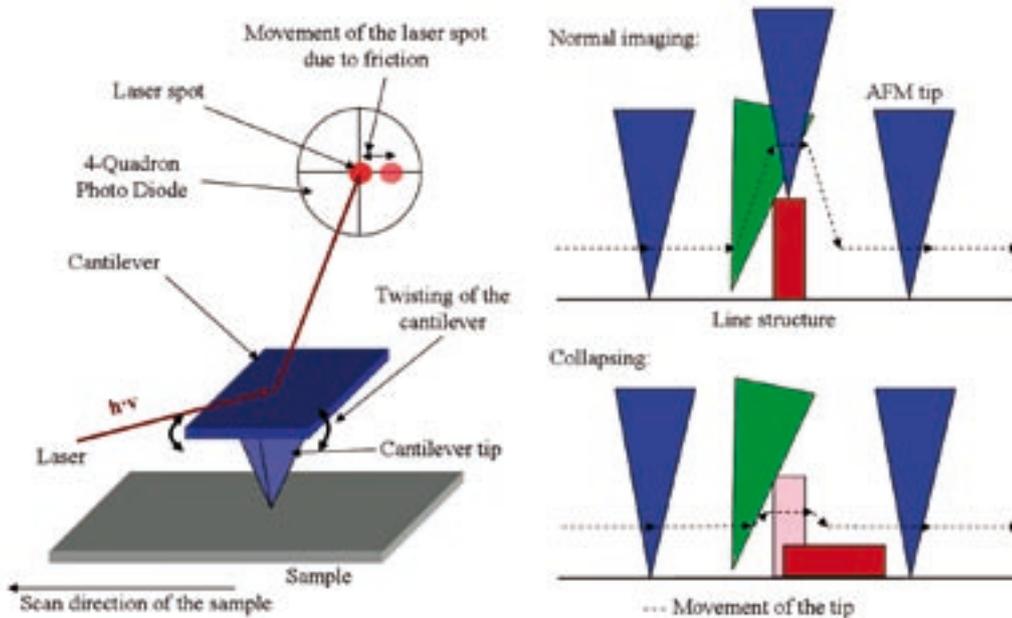
In normal AFM imaging, the tip traces the surface when the height of the sample changes. Therefore, the z-Piezo voltage is adjusted so that the normal deflection of the cantilever stays constant (figure 1 right side). So, when the AFM tip is scanning over a patterned sample at one point the AFM tip makes contact with a structure. The point of first contact is at top part of the structure because the aspect ratio of the pattern is higher than the aspect ratio of the AFM tip. Hence, at this point the AFM tip is deflected because the cantilever keeps moving. This deflection causes the cantilever to twist like a torsional spring which can be measured by the lateral signal (left side – right side) of the 4 segment photo diode detector in the AFM. The z-piezo would now be adjusted in normal imaging so that the tip moves over the structure. Instead the z-piezo is only minimal adjusted for the collapsing procedure. Thus, the tip is deflected up to the point where the lateral force is larger than the stability of the line (figure 1 & 2).

The structure collapses at this point and the tip deflection goes back to the friction values on the silicon surface. Thus, the maximum deflection voltage ( $U_{\text{Peak}}$ ) is a measure of the stability of the structure (figure 2). However, this voltage

<sup>a</sup> SEZ AG, Villach, Carinthia 9500, Austria

<sup>b</sup> Department of Microsystems Engineering, University of Applied Sciences Regensburg, Regensburg, Bavaria 93049, Germany

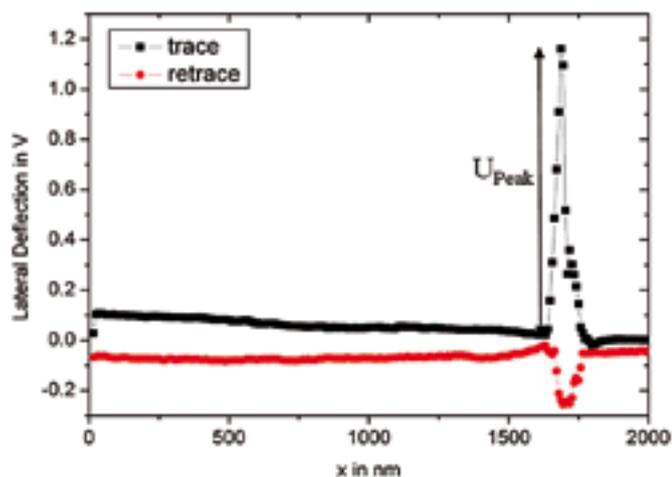
<sup>c</sup> Department of Chemistry, Christian Albrechts Universität zu Kiel, Kiel, S-H 24098, Germany



**Figure 1:** Principle of LFM (left side) & Proposed method of collapsing (right side)

has to be converted into a force value through a calibration of the AFM. This is necessary for each single cantilever because the alignment of the laser beam on the cantilever changes after each tip replacement. Additionally, there are significant manufacturing tolerances for the cantilever. After the calibration the voltage can be easily converted into the applied force ( $F$ ) by multiplying the maximum lateral voltage with the lateral calibration factor ( $S_l$ ) as seen in formula [1].

$$F = S_l * U_{Peak} \quad [1]$$



**Figure 2:** Lateral Deflection Signal of the AFM during the single line collapsing procedure

The literature agrees on the calibration of the AFM in the normal direction but unfortunately not in the lateral dimension. The difficulty is that the lateral calibration constant consists of two parts: the lateral spring constant and the constant of the optical system. There are a lot of different suggestions in the literature for the lateral calibration which can be distinguished in three different approaches. On the one hand experimental by using a reference spring or by obtaining a defined mixture of normal and lateral signals. On the other hand theoretical by calculating the spring constant and the constant for the optical system separately. The different models are briefly described in the following paragraph to explain the choice of the calibration method for presented experiments.

The theoretical calculation of the spring constant is based on either the geometry and the material constant (8) or the thermal noise (9). However, these calculations require some critical measurements of the geometry e.g. the height of the AFM tip. Furthermore, the calibration of the optical constant (10) is not straight forward because it requires data from the manufacturer about the optical setup of the AFM head. The reference springs introduced in the literature (11, 12) share the common disadvantage of a very extensive experimental setup either by producing and/or operating the reference spring. Therefore, we concentrated on the wedge methods (13, 14). These rely on a fixed mixture of normal forces and lateral forces on sloped surfaces. The original method is based on scanning over different crystal surfaces which



**Figure 3:** SEM picture of the type of AFM tip used for the collapsing experiments (left side) & “ASAP Line” structures under investigation as SEM picture and the principle design of the patterns on the right side

require in the final analysis the correct estimation of the friction coefficient  $\mu$ . A variation of the wedge method is the direct force balance (15) which is based on force-distance curves on three different surfaces with a known angle to each other. This eliminates the need to calculate the friction coefficient because there is no scanning.

The structures under investigation are the so called “damage lines” of the “ASAP300” wafers obtained from IMEC. The patterns are very long Polysilicon lines ( $9500\mu\text{m}$ ) consisting of a stack of 100nm Polysilicon on top of a thin silicon oxynitride (2.4nm) layer with a  $\text{SiO}_2$  cap of 50nm. The line width is around 40nm for the investigated structures. 10 lines are grouped together with variable spacing (in our case  $1\mu\text{m}$ ) as can be seen in figure 3. The experiments were performed on a DI Dimension 5000 using cantilevers with a lateral spring constant of approximately  $k_l = 1000 \text{ N/m}$  (figure 3).

The general experimental setup after the calibration consists of a pre-tapping mode scan, followed by the collapsing of the structure and the post analysis. The setup is explained in more detail in the following paragraphs.

It is necessary to perform one pre-tapping mode scan over the area of interest for the positioning of the AFM tip. Additionally, the shape of the lines gives an indication of the size and therefore the wear of the AFM tip because an AFM image is always a convolution of the shape of the tip and the sample. In our case the convolution is dominated by the size of the AFM tip because the aspect ratio of the structure is higher than the aspect ratio of the AFM tip. However, this just checks the size of the AFM tip perpendicular to the line and not along the line which is an important parameter because it can influence the length of the broken line. For the case of symmetric wear this is not significant but it is for asymmetric wear. Therefore, SEM post analysis of the AFM

tips is performed to measure the exact size of the AFM tip. Two different methods to collapse a pattern have been employed: The first one consists of scanning in contact force mode over a set of 10 lines with increasing normal force at the same spot similar to the method of Kawai et al (6). The lateral force increases linear with the normal force and thus allows a good controlling of the lateral force which is applied into the structure. This has the advantage of an easy comparison of the stability of the 10 lines (at one site) but the multiple scans over the lines could pre-damage the lines and therefore lower the final force necessary to collapse the pattern. Also the tip wear is significant with this approach because of the relative high normal force. The second method consists of a single constant force mode scan through the pattern and back (Software requirement). The advantage of this approach is the limited number of scans in combination with a minimum normal force which limits the tip wear to a minimum. Also there can be no pre-damage from previous contact mode scans over the lines with the AFM tip.

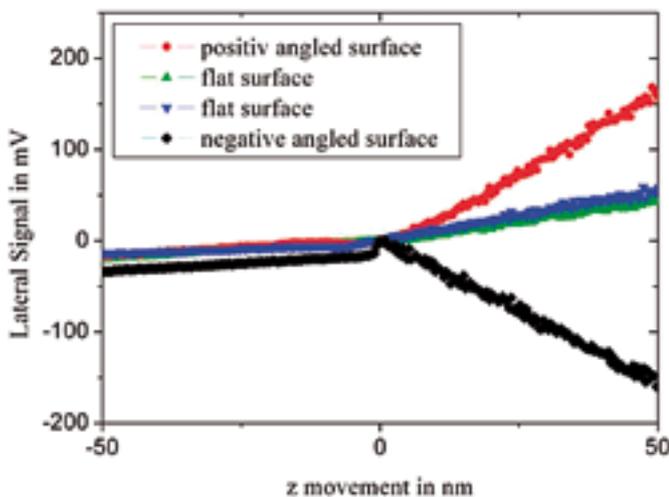
Finally a post tapping mode scan is performed on the collapsed line(s) which gives first indications of the breaking shape. More detailed analysis was done using SEM analysis on several tools (Hitachi S5200, S4800 and FEI 1265).

All experiments were conducted in a class 100 clean room with 50 % rel. humidity.

## RESULTS & DISCUSSION

The direct force balance calibration method requires force-distance curves on three different surfaces with a known angle to each other (figure 4). These surfaces were provided by a custom calibration grid obtained from the University of Applied Sciences Regensburg. The calibration grid is based on a (100) silicon wafer with etch pits formed by (111) surfaces. On each surface five force distance curves were

recorded and an average was taken from their slopes which resulted in overall calibration factors between  $S_f=2.8$  and  $4.4\mu\text{N/V}$  for the used cantilevers with a max. deviation of 6% at  $1\sigma$  for each calibration.



**Figure 4:** Experimental Data used for calibration based on the Direct Force Balance Method

Combining the calibration with the collapsing procedures described before gives collapsing forces between  $2\text{-}5\mu\text{N}$ . This value is lower than the previously reported values of around  $23\mu\text{N}$  (16) and have also a larger spread. A deviation of a factor of two between the weakest and strongest line can be easily found when using the first method to collapse the ten lines with increasing normal and lateral forces. The advantage of this approach is that the experimental conditions are almost the same for all the 10 lines, thus allowing a comparison with same experimental condition.

The quantification difference to the previously reported results is attributed to the different calibration and measurement procedure. Taking one measurement and evaluating the raw data with both procedures gives around  $4\mu\text{N}$  for the direct force balance and around  $60\mu\text{N}\pm 50\%$  (length  $128\mu\text{m}\pm 20\%$ ) for the method used by Kim et al (16). The main experimental difference is the scan speed where we use a speed of  $2\mu\text{m/s}$  compared to the previously reported speed of  $0.1\mu\text{m/s}$ . However, our data does not indicate an influence of the collapsing speed (in the range between  $0.4$  and  $10\mu\text{m/s}$ ) onto the quantification results.

A comparison of the experimentally obtained collapse values with theoretically calculated values can be done using fracture mechanics. As Polysilicon is a brittle material

it shows fracture at a certain level of stress. The maximum stress at the bottom of a line is calculated using the following formula with the assumption of a constant force along the length of the line (17)

$$\frac{F}{L} = \frac{\sigma_f}{6} \cdot \frac{w^2}{h} \quad [2]$$

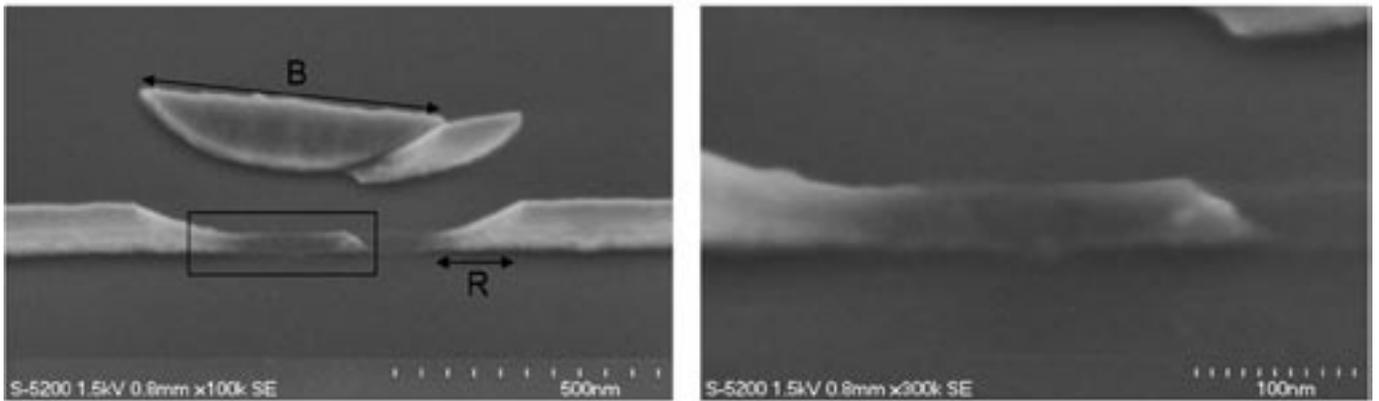
with  $\sigma_f$  as the fracture stress,  $w$  as the width and  $h$  as the height of the line. The fracture stress for Polysilicon lines is given in the literature as  $1\text{ GPa}$  (18) and  $4.48\text{ GPa}$  (19). Using a mean value of  $2.7\text{ GPa}$  for the fracture stress leads to collapse forces per length between  $4.0$  and  $7.6\text{ N/m}$  using the measured line widths between  $36$  and  $50\text{ nm}$ . Taking the usual length of the broken line (around  $600\text{nm}$ ) into account gives a collapse force between  $2.4$  and  $4.6\mu\text{N}$  which fits to the measured values between  $2$  and  $5\mu\text{N}$ . However, the theoretical model which has been used is a very simple one but it gives an indication of the magnitude of the real collapse force.

The damage is very similar on all sites (please see figure 5 for one example). The breaking shape of the line is exclusively round and narrowing at the bottom.

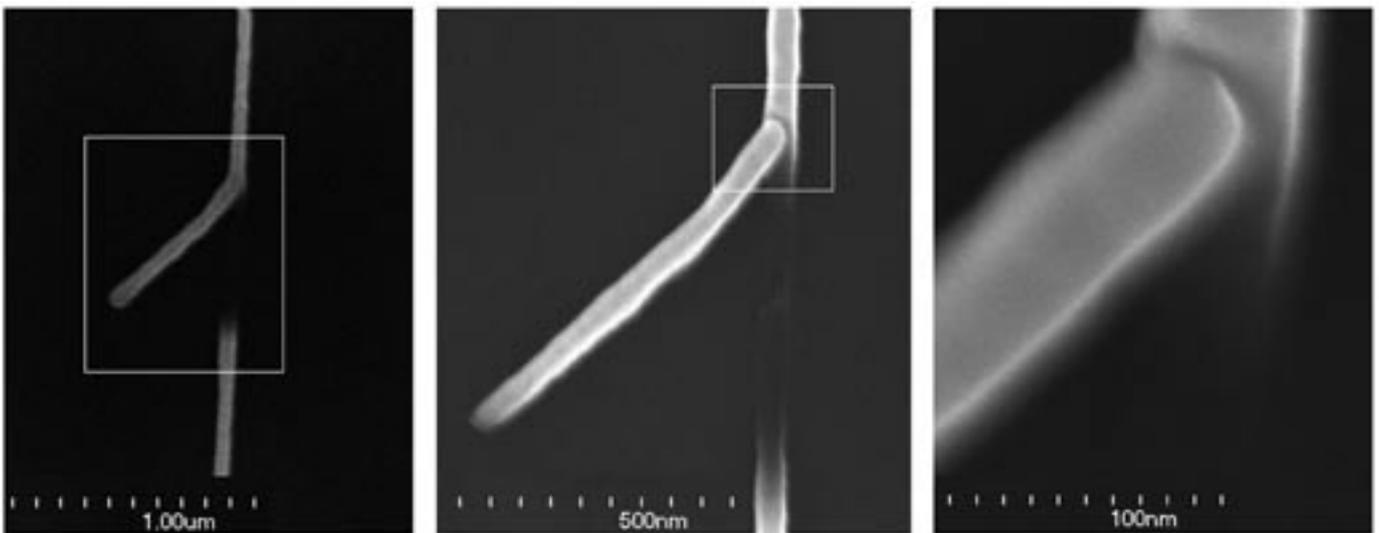
The horizontal difference of the top to the bottom of one side of the rupture site (marked R in figure 5) is around  $190\text{nm}$  with a standard deviation of  $17\text{nm}$  (at one sigma) which is less than the measurement uncertainty of approximately  $20\text{nm}$ .

Another difference to the previously reported results is that in our samples the structure breaks in the Polysilicon layer. Thus there remains a small bump instead of the previously reported trench on these structures (16). This result is backed up by TEM/EELS analysis. The EELS data shows that the rupture did not occur at an interface of the stack but inside the Polysilicon itself. Also, there were no bended lines observed. However, there are some rupture sites looking similar to bended lines especially at lower collapse speeds ( $< 1\mu\text{m/s}$ ) but more detailed SEM analysis reveals that the structure was clearly broken away (figure. 6).

The length of the overall broken line is varying but generally increasing with usage of the AFM tip. Thus, the AFM tip has an influence on the length of the broken line. This makes a replacement of the AFM tip necessary as soon as significant



**Figure 5:** SEM pictures of a collapsed line structure by AFM with a close up picture of the area marked by black box on the right side showing the remaining bump of the line on the surface of the substrate



**Figure 6:** A quasi bended line measured by SEM with increasing magnification from left to right with the area of interest marked by a white box on the picture to the left

wear occurs. At the top of the rupture site the length is between 0.5  $\mu\text{m}$  and 1  $\mu\text{m}$ . The lower limit of 0.5  $\mu\text{m}$  fits very well to the minimum length of damage published from Megasonic research on the same structures of 0.5  $\mu\text{m}$  (20). However, the length of the round broken piece (marked B in figure 5) stays almost constant (xxx number) only the number of pieces is increasing. At the place where the pieces are separated on the line there is always a little hump as seen in

figure 5 which is another indicator that the Polysilicon is the weakest layer in this stack in terms of the lateral stability. Also the influence of the grain boundaries is seen as minor on the stability of the line because of the almost constant length of the long pieces. Additionally, the round breaking shape which is indicating a conchoidal fracture denies this an influence. Thus, the applied stress defines the breaking shape and not the defects in the Polysilicon.

**Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Chem. Alfred Lechner**

Tel.: 0941 943-1271

Fax: 0941 943-1252

alfred.lechner@mikro.fh-regensburg.de

**CONCLUSION**

From an extensive set of AFM measurements a lateral stability between 2 and 5  $\mu\text{N}$  could be established for Polysilicon line structures with a width of nominal 40nm and a height of 150nm using the direct force balance method for calibration. This broad range in the collapsing value is mainly attributed to variances in the production process leading to line width variations between 36 and 50nm based on mechanical calculations.

SEM post analysis revealed a round breaking shape for all collapsed sites which indicates a conchoidal fracture and thus denies the influence of grain boundaries on the lateral stability. It showed also that the line structure breaks always in the Polysilicon itself close to the interface but not at the interface. Also, the structure is clearly broken in our experiments and not bended as reported previously. The length of the broken line is around 1  $\mu\text{m}$  with a lower limit of 0.5  $\mu\text{m}$  which is similar to the smallest damage reported by Megasonic processes.

**REFERENCES**

1. Y. Park et al, J. Kor. Phys, 44(1), 112 (2004)
2. T. Tanaka et al, J. Electrochem. Soc. 140 (7), 115 (1993)
3. H. Cao et al, J. Vac. Sci. Technol. B, 18 (6), 3303 (2000)
4. C. Brodsky et al, U.S: patent, 7229936 (2004)
5. J. Kitano et al, Microlithography World, (2004)
6. A. Kawai et al, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 1426 (2000)
7. T. Kim et al, Nanotechnology 16, 2227 (2005)
8. C. T. Gibson, G. S. Watson and S. Myhra, Scanning, 19, 564 (1997)
9. C. Green et al, Rev. Sci. Instrum., 75 (6), 1988 (2004)
10. E. Liu, B. Blanpain, and J. P. Celis, Wear 192, 141 (1996)
11. P. Cumpson, J. Hedley and C. Clifford, Vac. Sci. Technol. B 23 (5), 1992 (2005)
12. R. Cannara, M. Eglin and M. Carpick, Rev. Sci. Instrum. 77, 053701 (2006)
13. D. Ogletree, R. Carpick and M. Salmeron, Rev. Sci. Instrum. 67(9), 3298 (1996)
14. M. Varenberg, I. Etsion, and G. Halperin, Rev. Sci. Instrum 74(7), 3362 (2003)
15. D. Asay and S. Kim, Rev. Sci. Instrum. 77, 043903 (2006)
16. T. Kim et al, ECS Transactions, 11 (2) 123 (2007)
17. J. Gere and S. Timoshenko, Mechanics of Materials PWS Publishing Company, 314 (1997)
18. F. Tardif and O. Raccurt et al, ECS Proceedings 26, 153 (2003)
19. Christenson 2005 (xxx to be completed)
20. C. De Marco et al, ECS Transactions 11 (2) 87 (2007)

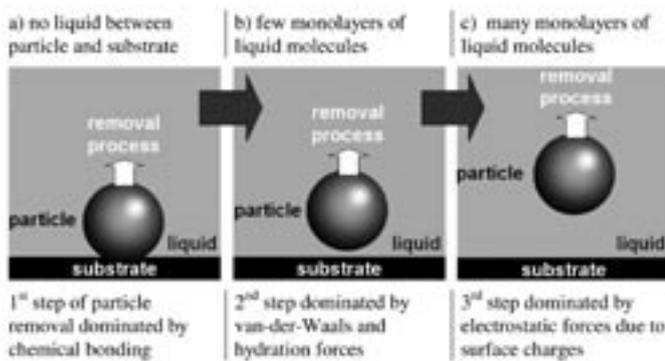
## THE ACTIVE ROLE OF ETCH PRODUCTS IN PARTICLE REMOVAL BY SC-1 SOLUTIONS

**Keywords:** Silicon nitride, silica, SC-1, etch products, van-der-Waals forces

### INTRODUCTION

In the semiconductor industry diluted mixtures of ammonia and hydrogen peroxide (SC-1) are widely used for particle removal. The conventional model for removing particles in alkaline solutions from a wafer substrate consists of two mechanisms [1]:

- Slow etching of the silica layer at elevated pH-values, which results in particle undercutting (see 1st step, Fig. 1-a).
- Electrostatic repulsion between substrate and particle due to negative surface charge at high pH



**Figure 1:** Forces during particle removal according to the distance between particle and substrate.

Previously in the semiconductor industry, particle-substrate behavior studies have focused on

complete removal processes (i.e. 1<sup>st</sup> → 3<sup>rd</sup> step) or particle deposition on a wafer (i.e. 3<sup>rd</sup> → 1<sup>st</sup> step). In this paper an experimental procedure is introduced that allows a detailed study of particles during the 2<sup>nd</sup> step of the removal process (see Fig. 1-b), which are strongly bonded to the substrate by van-der-Waals forces.

### EXPERIMENTAL PROCEDURE

The following experiments were carried out with silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) particles (high-purity product SN-E10, donated by UBE) on silicon wafers with native oxide. The Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder was dispersed in ultra pure water and used as a parent solution. Silicon nitride particles were chosen, because they are widely used for cleaning efficiency tests in the semiconductor industry.

For wafer contamination with particles at the 2<sup>nd</sup> stage of the removal process two approaches can be used:

- Undercutting of dried monitor particles by slight chemical etching (1<sup>st</sup> → 2<sup>nd</sup> step, see Fig. 1).
- Deposition of monitor particles by sedimentation or attractive electrostatic force on substrate (3<sup>rd</sup> → 2<sup>nd</sup> step, see again Fig. 1); this is the situation before the drying step.

Because silicon nitride particles are positively charged at neutral pH-values [2], strong attractive electrostatic forces act between the monitor particles and the negatively charged "native oxide" on top of the silicon wafer. Therefore the second approach of wafer preconditioning is very practicable. To add silicon nitride particles to the silicon wafer the following procedure was applied:

- The parent Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dispersion was diluted with ultra pure water.
- The wafer was placed on a single-wafer spin coater.
- The wafer was covered with a layer of diluted Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dispersion (kept on the wafer for several minutes by surface tension).
- The wafer was spun at 1,500 rpm until a coloured interference pattern was observed.

Wafers prepared this way were the basis for experiments with locally applied mechanical forces or fluids:

- 1) Writing "S E Z" on a wafer with a focused stream of water out of a bottle (compare with Fig. 2)
- 2) Droplets of a dilute solution of commercially-available polysilicates (see Fig. 3)
- 3) Droplets of a commercially-available colloidal silica Ludox TMA (compare with Fig. 4)
- 4) Droplets of a fresh, unused SC-1 mixture and an SC-1 solution containing wafer etch products on the same wafer (see Fig. 5)

The processed wafer was spin-dried after a "soft" rinsing step with ultra pure water and the particles are mapped with KLA-Tencor equipment (Surfscan® 7200 and 6220 down to 400 nm particle size).

<sup>1</sup> SEZ AG, Research Center, Draubodenweg 29, 9500 Villach, Austria

<sup>2</sup> Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstr. 40, 24098 Kiel, Germany

<sup>3</sup> Fachhochschule Regensburg, Mikrosystemtechnik, Seybothstr. 2, 93053 Regensburg, Germany

<sup>a</sup> alexander@pfeuffer.net, a.pfeuffer@at.sez.com

**EXPERIMENTAL RESULTS**

1) The "SEZ" writing was clearly observed on a wafer with a very homogenous particle distribution in Fig. 2 (next page). The monitor particles are strongly bonded because high-speed spinning during the drying step did not result in fewer particles at the wafer edge. Additionally, the fine lines of the writing are an additional indicator for attractive interaction between particles and substrate. Further particle deposition was dramatically reduced in the thin water layer after the first spinning step; otherwise the letters would be blurred by newly deposited particles.

2) Droplets of water-soluble polysilicates on a preconditioned wafer, prepared according to the experimental procedure described, cause local removal of the monitor particles (see Fig. 3, next page). The wafer was inclined during the "soft" rinse step with ultra pure water. This result fits to the observation that the electrophoretic properties of dispersed  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -particles can be dramatically changed by traces of silicates [2].

3) To be able to separate the influence of silicate and high pH on particle removal undiluted, colloidal silica Ludox TMA® (donated by Grace) was added to the prepared monitor wafers. This product has a neutral pH-value and an

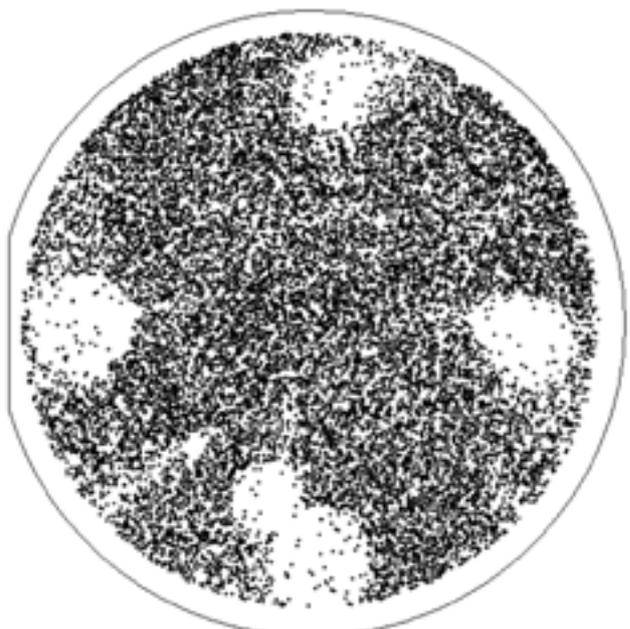


**Figure 3:** Removal of van-der-Waals bonded  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particles by polysilicates (> 400 nm, Surfscan 6220).

average particle diameter of 22 nm. Good particle removal was visible in the areas where the droplets were placed on the wafer surface (compare with Fig. 4).



**Figure 2:** Removal of van-der-Waals bonded  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particles by a focused water stream (> 400 nm, Surfscan 7200).



**Figure 4:** Removal of van-der-Waals bonded  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particles by colloidal silica Ludox TMA (> 400 nm, Surfscan 7200).

**Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Chem. Alfred Lechner**

Tel.: 0941 943-1271

Fax: 0941 943-1252

alfred.lechner@mikro.fh-regensburg.de

a) No removal of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  monitor particles with a conventional SC-1 mixture added in proximity to the flat

b) Removal of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particles with an SC-1 containing wafer-etch products added opposite to the flat



**Figure 5:** Result of the reaction of van-der-Waals bonded  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particles with freshly prepared SC-1 (a) and SC-1 with wafer-etch products (b) ( $> 400$  nm, Surfscan 6220).

4) The most interesting experiment was the comparison of a fresh, unused SC-1 mixture ( $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:13$ ) with an SC-1 mixture (1:1:13) containing wafer-etch products (compare with Fig. 5) with respect to their cleaning efficiencies. The etch products were generated by storing wafer fragments in aqueous ammonia (28%). While the unused SC-1 was not able to remove particles (see Fig. 5-a), the particle pattern could be influenced by the presence of silica-etch products (see Fig. 5-b).

## SUMMARY

According to the conventional model for particle removal van-der-Waals bonded  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particles should be easily removed by conventional SC-1. With a thin water layer between particles and substrate they are already perfectly undercut and electrostatic repulsion should lead to particle removal. However, this forecast is in strong contrast to the

experimental results presented here. Only in the presence of silica etch products in the SC-1 mixture can these particles be detached.

To cause this effect the van-der-Waals force between  $\text{Si}_3\text{N}_4$  particle and the silica surface has to be lowered by some kind of adaptation layer. That the wafer etch products could act in this way is consistent with very low van-der-Waals interactions of silica in water [3].

Therefore the particle removal model in alkaline solutions has to be extended by the active role of the wafer-etch products for lowering van-der-Waals forces.

## REFERENCES

- [1] M. Itano, F. W. Kern, Jr., M. Miyashita, and T. Ohmi: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 6 (1993), pp. 258-267.
- [2] A. Pfeuffer, W. Bensch, A. Lechner, and H. F. Okorn-Schmidt: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces (2004), pp. 163-166.
- [3] R. K. Iler: The Chemistry of Silica (John Wiley & Sons, Inc., New York, USA 1979), p. 374.

## ELECTROPHORETIC STUDIES ON SILICON NITRIDE: HOW TRACES OF SILICATES IN UPW SHIFT ZETA POTENTIAL SIMILAR TO SC-1

**Keywords:** Silicon Nitride, Silicate, Zeta Potential, UPW, SC-1

### ABSTRACT

Addition of traces of silicate to neutral UP-water can replace alkaline pH (e.g. ammonia) for controlling the zeta potential at silicon nitride.

### INTRODUCTION

Literature data for the iso-electric point of silicon nitride range between pH=3 and pH=9, which have been basically explained by different manufacturing processes.

Electrophoretic experiments with two kinds of water (different levels of impurity) could reproduce similar extreme values of IEP.

Further studies showed that silicates are responsible for the shift in IEP.

### EXPERIMENTAL DETAILS

#### (1) Materials and Equipment

- High-purity silicon nitride SNE10 was donated by UBE Industries.
- The DI-water (1M $\Omega$ m) was supplied by a water treatment facility from Eurowater/Seradest with ion exchanger and reverse osmosis.

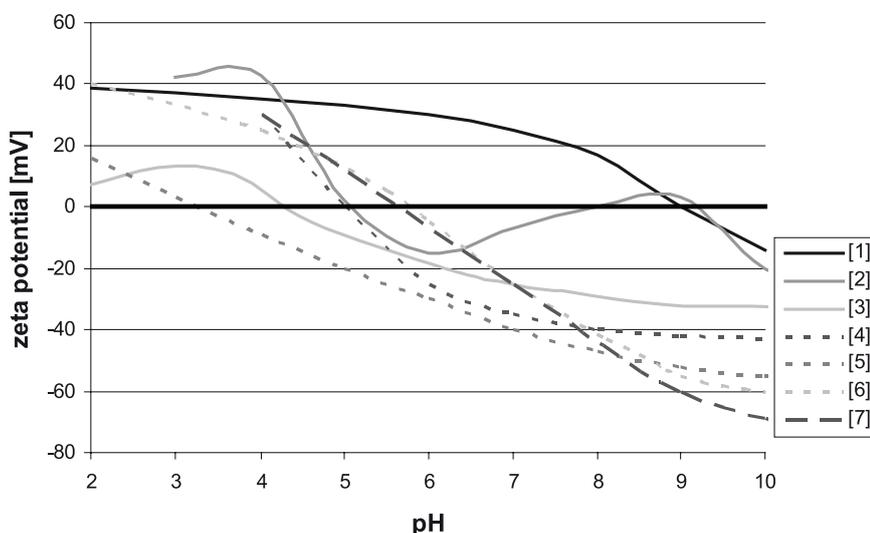
- The equipment for UP-water (18M $\Omega$ m) was provided by WAT Membratrec with ion exchanger and reverse osmosis.
- Zeta potential measurements were performed with a BIC ZETAPLUS®. This system uses electrophoretic light scattering and the laser doppler velocimetry to determine particle velocity and, from this, the  $\zeta$ -potential.
- Hanna Instruments HI-98150 was used for determining the pH.

#### (2) Suspension Preparation

UBE SNE10 powder was pre-treated by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HF. After several dilutions and short term sedimentation steps in UPW, a long term sedimentation step was applied to obtain small particles quantities (storage was done in PE-bottles)

#### (3) Test Procedures

- Nine 50ml-samples of UP-water with pH ranging from 2 to 10 (adjusted by HCl resp. ammonia) were added with a certain amount of particle suspension (0.2ml, out of UBE SNE10). After particle size and  $\zeta$ -potential measurement concentrated DI-water (50ml reduced to 0.2ml) was added to each sample. Measurements were repeated.
- High amount of particle suspension was added to DI-Water followed by  $\zeta$ -potential measurements; thereafter half of the diluted suspension was decanted, refilled with new DI-Water and the  $\zeta$ -potential was measured again. This procedure was repeated several times.



**Figure 1:** Literature data for  $\zeta$ -potential of silicon nitride vs. pH-value.

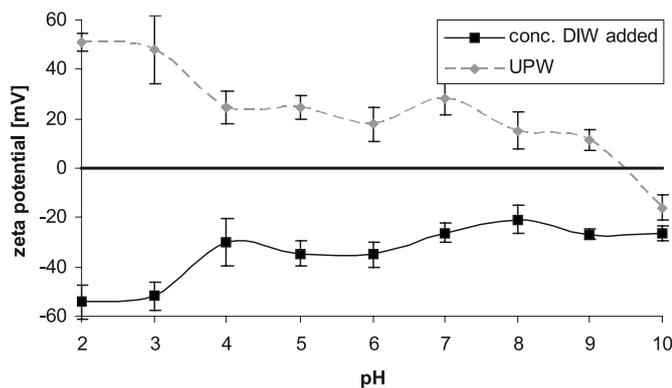
\* SEZ AG, Research Center, Draubodenweg 29, 9500 Villach, Austria; a.pfeuffer@at.sez.com

\*\* Department of Microsystems Engineering, University of Applied Sciences Regensburg, Regensburg Bavaria 93049 Germany

c) 20 litre of DI-water were gradually evaporated in a stainless steel container. Identification of the residues was done by EDX. Crystalline compounds were analyzed by powder diffraction. Additionally CHNS-analysis was performed.

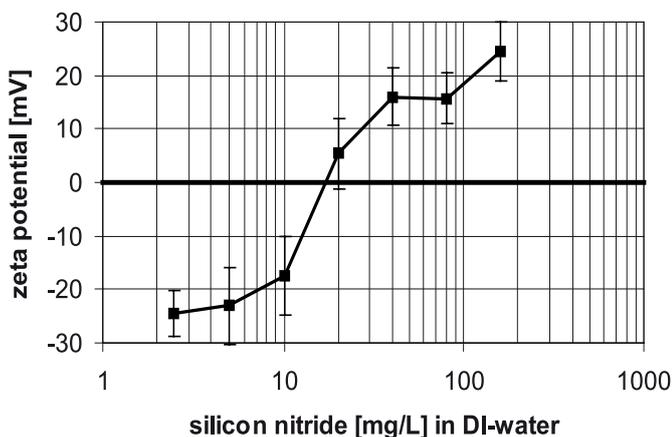
**RESULTS**

a) The influence of the water purity level on  $\zeta$ -potential is expressed by a shift to negative values when comparing UP-water with DI-water.



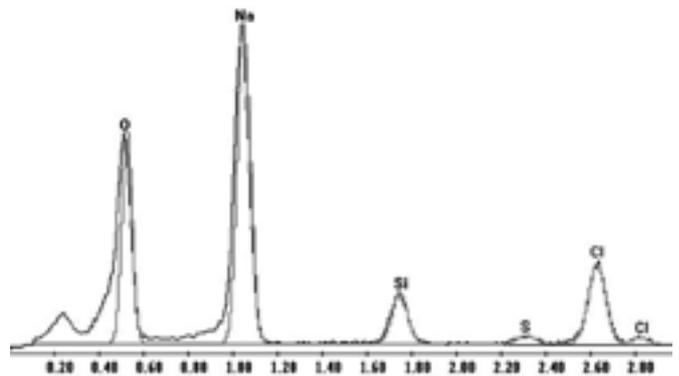
**Figure 2:** influence of water on  $\zeta$ -potential of  $Si_3N_4$ ; no addition of ions except  $NH_4^+$  and  $Cl$

b) At high solid concentrations positive  $\zeta$ -potentials could be measured in DI-water. Reducing solid portion leads to charge reversal. The  $\zeta$ -potential in UP-water is stable down to much lower particle concentrations.



**Figure 3:** influence of particle concentration on  $\zeta$ -potential (UBE SN-E10, no addition of electrolytes, pH approx. 6 for  $CO_2$ -influence)

c) After evaporation of 20 litre DI-water, 8 mg of solid residues remained EDX-analysis indicated presence of sodium, chlorine, oxygen, silicon and sulfur (fig.4).



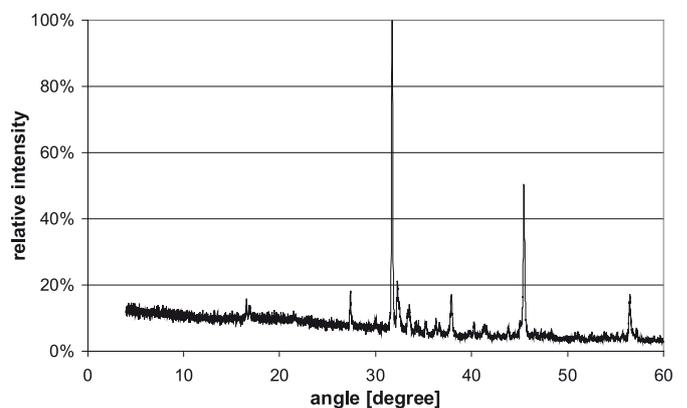
**Figure 4:** EDX-spectra of DI-water remain

A small portion of the sample was measured by CHNS analysis, which revealed no evidence of sulfur.

sample	N <sub>2</sub> [%]	C [%]	H <sub>2</sub> [%]	weight [mg]
#1	0,051	4,43	1,121	2,369
#2	0,083	4,294	1,664	2,685

**Table 1:** CHNS elemental analysis of DI-water remain

Crystalline compounds (salts) of the DI-water residues were analyzed by powder diffraction (fig. 5). Peaks in measured spectra can be assigned to NaCl and  $Na_2CO_3$  (carbon content can be assigned to  $Na_2CO_3$ ).



**Figure 5:** Powder diffraction of DI-water residues

Addition of these salts to UP-water in quantities to achieve conductivity similar to DI-water, did not change the  $\zeta$ -potential of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  to negative values in the neutral pH-range.

## DISCUSSION AND CONCLUSION

Traces of silicates in DI-water are responsible for the change of the  $\zeta$ -potential of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  from positive to negative values in neutral pH.

A mass ratio of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ : $\text{SiO}_2$  of 100: 1 is sufficient to cause this effect. Additions of silicates (DuPont Ludox®) to dispersions of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in UP-water lead to negative  $\zeta$ -potentials (neutral pH).

The variations of the  $\zeta$ -potential of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in the literature can probably be explained by the variable presence of silicates.

Negative  $\zeta$ -potentials could be measured at neutral pH for alumina (IEP=9) and magnesia (IEP=12) by adding silicates.

## REFERENCES

- [1] T. Kujime, J. Nashijama, S. Okano and T. Ohmi: UCPSS 1996, p. 236
- [2] F. Tardif, P. Patrino, T. Lardin, A.S. Royet, O. Demoliens, J. Palleau and J. Torres: UCPSS 1996, p. 336
- [3] L. Wang, W. Sigmund and F. Aldinger: Journal of the Material Research Society, Vol. 17, No.4, pp. 691-696, 2000
- [4] A. Philipossian and M. Hananzono: <http://www.innovative-panarization.com/Presentations/doy.pdf>
- [5] UBE Silicon Nitride E-10/Technical Information: <http://www.ube.com/item.php3?country=US&id408>
- [6] <http://www.tetralux.com/characterization.htm>
- [7] R. Ramachandra Rao and T.S. Kannan: Journal of the Material Research Society, Vol. 17, No. 2, 2002

## CRITERIA FOR ROBUSTNESS OF STRUCTURES

### 1 INTRODUCTION

Structural engineers have become concerned with the phenomenon of progressive collapse since the collapse of the Roman Point apartment building in the UK in 1968. The trigger was a gas explosion in a corner flat that precipitated a collapse of a major portion of the building. Several accidents followed since then including:

- the collapse of the Beirut Embassy in 1973 caused by a bomb blast
- the World Trade Center progressive damage due to a bomb in 1993
- the bombing of the Murrah Federal Building in Oklahoma City in 1995 (Fig. 1)
- the bombing of the US Embassies in Nairobi and Dar Es Salaam in 1998
- the collapse of the World Trade Center towers in New York in 2001 (see Figure 2)

Also other structures such as bridges have collapsed due to accidental loads, for example due to ship impact. Some major cases are:

- General Rafael Urdaneto road bridge in Venezuela, 1964
- Granville railway bridge in Australia, 1975
- Eschede railway bridge in Eschede Germany, 1998
- Jiujiang road bridge in China, 2007 (see Figure 1)

In other industrial sectors such as the offshore industry and the nuclear industry the consideration of accidental loads and related structural resistance has been taken into account since the early seventies. Following the aforementioned accidents the issue of robustness as a property of structural systems has been recognised as an important topic. A variety of research efforts has been performed in the past and methods for assessing robustness have been proposed.

National and international codes have developed guidelines to consider progressive collapse. However further developments are necessary to deal with robustness and progressive collapse especially in view of modern safety acceptance criteria. Practical experience and ideas of the author related to these aspects are reflected in this contribution.

In the first part of this contribution robustness of a structure is defined and currently used parameters to describe robustness are reviewed, i.e.:

- Deterministic index of robustness
- Reliability based index of robustness
- Risk based index of robustness

Structural properties influencing robustness are thereby identified and discussed based on design experience. In the second part of the contribution the progressive collapse limit state requirements in codes and standards are analysed, such as,

- relevant accidental loads for design
- reliability for progressive collapse limit state
- requirements for design of the structure in a damaged state on the basis of practical cases dealing with tunnels, pipelines and offshore structures.

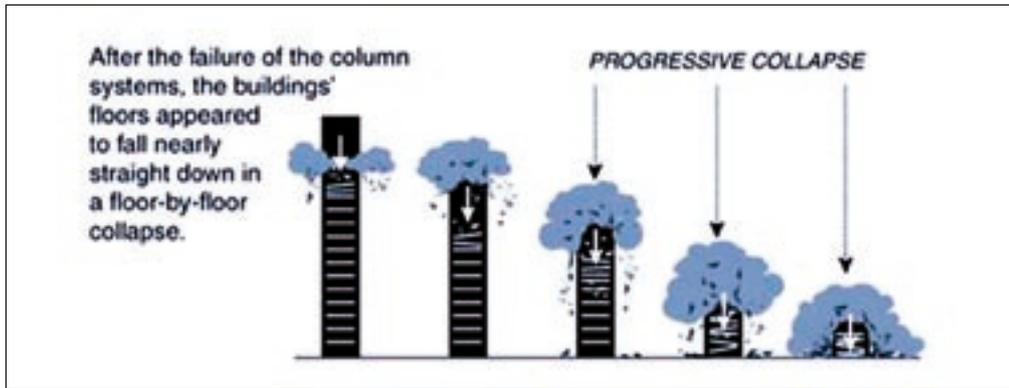


**Figure 1:** Collapse of the Jiujiang bridge after ship impact (2007 in China) and of the Murrah Federal Building in Oklahoma City (1995 in the USA)



### 2 DEFINITION AND QUANTIFICATION OF ROBUSTNESS

Robustness can be defined as a performance characteristic of a structure reflecting its insensitivity to local failure. Progressive collapse can be defined as collapse of the structure precipitated by failure or damage of a relative small



**Figure 2:** Collapse of the World Trade Center towers (Sept. 11, 2001)

part of it i.e. local damage. The degree of progressivity in a collapse can be thereby defined as the ratio of total collapsed area to the area damaged directly by the triggering event (Shankar Nair, 2004).

Robustness can be quantified by an associated index. If the index is 1.0 the structure is fully robust, i.e. the local damage does not affect the global behavior, if it is 0 the structure has no reserve capacity and local damage leads to global failure of the structure. In a deterministic approach an index of robustness  $I_R$  can be defined based on the load deformation curve of the structure.

$$I_R = \frac{Q_{ud}}{Q_u} \quad (2.1)$$

- $Q_u$ : load leading to global failure of the structure before local damage has occurred
- $Q_{ud}$ : load leading to global failure given that local failure (damage) has occurred

In a reliability based context (Lind, 1995) the index of robustness  $I_R$  can be defined based on the reliability index of the structure here defined as a system:

$$I_R = \frac{\beta_{ud}}{\beta_u} \quad (2.2)$$

- $\beta_u$ : reliability index of the structural system before local failure (damage)
- $\beta_{ud}$ : reliability index of the structural system given local failure (damage)

It is noticed here that for practical purposes the computation of a global reliability index for the structure is not always

a feasible task since a system definition of its components and associated failure modes is necessary. Finally in a risk based context (Maes et. al., 2006) the index of robustness  $I_R$  is defined as proposed by Baker et. al. (2007):

$$I_R = \frac{R_{Dir}}{R_{Dir} + R_{Ind}} \quad (2.3)$$

- where
- $R_{Dir}$ : direct risks associated to local damage (confined risks)
- $R_{Ind}$ : indirect risks (escalating risks)

In the last approach risks are depending also on non structural properties such as preventing and mitigation safety systems (fire alarms, rescue teams etc) and therefore robustness is not directly related to structural performance. The robustness of a structure depends mainly on parameters such as static system, ductility, fire resistance etc.

### 3 PROBABILISTIC FORMULATION

The problem of global failure can be formulated in a probabilistic way by expressing the probability,  $P(C)$ , of a progressive collapse,  $C$ , due to an event,  $E$  (see for example Ellingwood and Dusenberry, 2005) as follows:

$$P(C) = P(C|LE)P(L|E)P(E) < P_A \quad (3.1)$$

- where
- $P(E)$ : probability of occurrence of  $E$ ,
- $P(L|E)$ : probability of local failure,  $L$ , given the occurrence of  $E$ ,
- $P(C|LE)$ : probability of collapse given the occurrence of  $L$  due to  $E$ .
- $P_A$ : acceptable probability of global failure

The breakdown of the collapse probability is instructive to focus attention on strategies to prevent global failure of the structure. The probability of occurrence of the accidental event is basically independent of design strategy, it can be controlled by the siting of the building, by the implementation of protection measures, etc. In many cases site specific studies are performed to analyze the factor  $P(E)$  and if it results for an event  $E$  smaller than the acceptable failure probability  $P_A$ , then the event is not further considered. It is noted here that in many cases the supporting statistical data, derived from experience and observation, are rare. Preferably Bayesian statistical models should be used for the computation of  $P(E)$ . It is further observed that the aforementioned neglect of very rare events  $E$  is performed independently of the degree of robustness of the structure and would lead to inhomogeneous designs. Finally models for accidental loads can be found in the probabilistic model code presented by the JCSS (2007).

The probability of local damage  $P(L|E)$  can be considered in two different ways. In many cases local damage is accepted and consequently  $P(L|E)$  is equal to 1.0. In other cases local strengthening is preferred in order to reduce the probability of local damage can be reduced. It is noted here that local damage needs specific definition in each case (also for the computation of the conditional probability  $P(C|LE)$ ) and is mainly related to failure of specific components of the structural system.

Finally a main problem in the formulation of Eq. (3.1) is that the underlying probabilistic concept requires specification of an admissible probability of global failure  $P_A$ . The target failure probabilities of probabilistic design codes are usually derived for single failure modes from calibration with previous deterministic design codes and on the basis of cost-benefit considerations. Human safety and societal risk criteria are important when global failure acceptability criteria are established.

The use of the probabilistic formulation for the treatment of accidental loads has been critically discussed in the work by Starossek (2006), where design strategies against progressive collapse have been discussed. However it is stated here that if the parameters critically reviewed above, i.e.:

- statistical and physical uncertainties
- system behavior of the structure
- acceptability criteria for the global performance and failure of the structure

are properly taken into account, then the probabilistic formulation is a basic tool for the analysis of accidental loads and for the evaluation of design strategies and safety systems.

## 4 CURRENT STANDARDS AND SAFETY ACCEPTANCE

### 4.1 Limit State Design

Current standards are based on classical limit state design methods and/or performance based design. A limit state design aims to assure that the constructed facility will have sufficient strength and ductility capacity to satisfy the demands associated with each limit-event with an acceptable failure probability, or equivalently, the associated reliability index,  $\beta$ . The limit state approach is related to structural components rather than the entire structure, which is instead the direct focus of the performance based approach. Safety targets are related to economical criteria represented by (see for example JCSS, 2000; NKB, 1976):

- Marginal cost of reliability (relative cost to increase reliability or to decrease risk  $\Delta\text{Cost}/\Delta\text{Risk}$ )
- Consequences of failure

The consequences of failure may include direct financial losses due to damage and due to demolition and reconstruction, injuries and loss of human lives but also so-called intangibles like loss of future opportunities (for example, loss of public welfare, professional reputation, and the like, Rackwitz, 2002). Targets may be different depending on which stakeholder behalf (for example, user, builder and public) sets the priorities. Usually three consequence classes are classified (JCSS, 2000).

The JCSS (2000, 2007) has proposed target reliability values for new structures related to one year reference period and to ultimate limit states and as a function of consequence classes and relative cost of investments into safety. The values represent also the background for the Eurocodes and are shown in Table 1. The relative cost of safety measures represents also the fact that structures subjected to extreme loads with high variability will be designed for a lower safety level (for example against earthquake or wind) since the relative costs to achieve a higher reliability are considerable. Accidental loads are also associated to high variability and with that respect should be treated similar to earthquake loads.

Relative Cost of Safety Measure	Minor consequences	Moderate consequences	Large consequences
Large	$\beta=3.1(p_f \approx 10^{-3})$	$\beta=3.3(p_f \approx 5 \times 10^{-4})$	$\beta=3.7(p_f \approx 10^{-4})$
Normal	$\beta=3.7(p_f \approx 10^{-4})$	$\beta=4.2(p_f \approx 10^{-5})$	$\beta=4.4(p_f \approx 5 \times 10^{-6})$
Small	$\beta=4.2(p_f \approx 10^{-5})$	$\beta=4.4(p_f \approx 5 \times 10^{-6})$	$\beta=4.7(p_f \approx 10^{-6})$

**Table 1:** Target reliability index and associated probability of failure for 1-year reference period (JCSS, 2000)

The classification in Table 1 for both the relative effort to achieve reliability and the expected failure consequences agrees well with calculations provided in various studies (JCSS, 2000). Similar approaches to target values can be found in other recommendations such as NKB (1976). NKB introduced thereby also the type of failure (brittle or ductile) as a parameter for the choice of the target reliability index. Also the extra carrying capacity is considered in the specification of the target values which reflects the possibility of load redistribution. However the target values are valid for components and consequently for individual local failure modes and do not represent global failure conditions. For existing structures these values are lower since the cost of achieving a higher reliability level are usually higher compared to structures under design.

#### 4.2 Performance Based Design

Performance-based design is a relatively recent framework that articulates the performance intent and the design standards through performance objectives that couple the desired performance level to be achieved for a given level of hazard. The Structural Engineers Association of California SEAOC's Vision 2000 (SEAOC, 1999) has attempted to provide more quantitative definitions of building hazard

and performance levels for earthquake resistant design as shown in Table 2. The SEAOC defines four seismic hazard levels and four performance levels. The combination of the seismic hazard level associated to the mean return period of the ground motion level at the structure's site and of the performance level represents a specific design performance objective. It is noted that the cases k and p are the most commonly selected performance objective of the performance matrix given in Table 2. The approach has similarities to a risk matrix approach, in which also hazard and consequence (instead of performance) levels are used.

With respect to the collapse performance criterion a confidence of 90% was required (see, for example Hamburger et al., 2003), that is 90% confidence that a structure will remain stable in earthquake ground motions having a mean probability of exceedance of 2% in 50 years. Explicit recognition and consideration of randomness is implemented in the confidence level that the performance objective can be met (Hamburger et al., 2003). Based on the proposed approach the inherent probability of collapse (performance objective p) for the whole structure results as approximately  $4 \times 10^{-5}$  per year and represents the acceptable safety level inherent in the performance based requirement. For existing structures a lower level of safety

Hazard Level for EQ	Performance Levels			
	Operational	Occupiable, Damaged	Life Safe, Major Damage	Near Collapse
Frequent (50%/50yrs)	a	b	c	d
Occasional (20%/50yrs)	e	f	g	h
Rare (10%/50yrs)	i	j	k	l
Max considered (2%/50yrs)	m	n	o	p

**Table 2:** Performance objectives: hazard and performance levels (SEAOC, 1999)

is proposed. Failure probability of an existing structure compared to a new one becomes 2 to 10 times higher, depending upon the requirement relaxation, which has to be specified (Diimantidis and Bazzurro, 2007).

The performance based design is being developed also for accidental loads such as fire, blast and wind. In general it can be concluded that in a performance based design one does not limit the consideration to the probability of failure but considers the risk of failure that would explicitly incorporate the return period of the loading or hazards that prevail at a site and the consequences of failure in addition to the probability of failure. Therefore the performance based design

- allows for more freedom in design
- is more suitable for consideration of global failure

**4.3 Design against Accidental Loads**

The consideration of accidental loads in design is considered in various codes (for example NORSOK, 2004 for offshore structures). Thereby the defined Accidental Damage Limit States (ALS) ensure that the accidental action does not lead to complete loss of integrity or performance of the structure and is performed in two steps:

1. resistance against accidental actions; the structure should be checked to maintain the prescribed load carrying function for the defined accidental loads.
2. resistance in damaged condition: following local damage the structure shall continue to resist defined (reduced) load conditions for a specified time period

For buildings two design approaches are considered (see for example, UFC, 2003):

*a) Direct design approach*

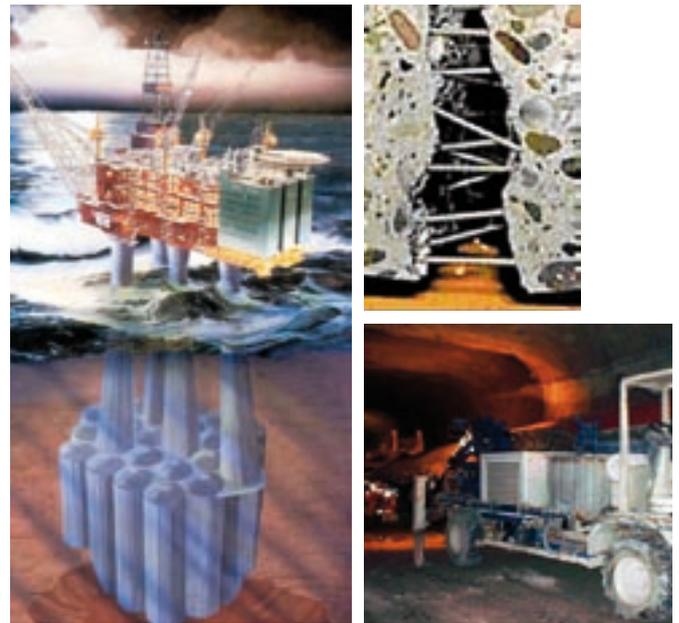
Two methods are possible in this approach:

1. SLR Specific Load Resistance method, which requires that the relevant parts of the building provide sufficient strength against accidental load
2. AP Alternative Path method, which requires that the structure is capable of redistributing forces after local damage

*b) Indirect design approach*

Practical measures are implemented in this approach such as:

- Good plan layout
- Returns on walls
- Integrated system of ties
- Changing span directions of floor slabs



**Fig. 3:** Tunnels with fibers and Offshore structures subject to robustness

- Catenary action of the floor slab
- Ductile detailing
- Compartmentalized construction

**5 REFLECTIONS FROM PROJECT EXPERIENCE**

**5.1 General Aspects**

In the last 20 years the author was involved in various design cases of various types of structures against accidental loads including:

- design of offshore structures against impact loads (s. Fig. 3)
- design of tunnels against fire/explosion (s. Fig. 3)
- design of important buildings against explosion loads
- design of nuclear plants against aircraft impact
- design of submerged tunnels against impact of sunken ships
- design of pipelines for accidental actions
- design of LNG tanks for accidental actions

The following conclusions can be drawn from the aforementioned case studies:

- a) National codes imply different design loads for the same accidental loads. For example nuclear power plants in France have been designed for lower aircraft impact loads compared to Italian ones, or offshore structures in the British sector of the North Sea have been calculated

**Prof. Dr.-Ing. Dimitris Diamantidis**

Tel.: 0941 943-1203

Fax: 0941 943-1429

dimitris.diamantidis@bau.fh-regensburg.de

for lower impact energy from colliding ships compared to platforms located in the Norwegian sector.

- b) Site specific risk studies are performed to compute probabilities of accidental loads and associated consequences; uncertainties in the data analysis and in the implemented models are seldom considered.
- c) Cost considerations play an important role in the selection of design against progressive collapse. For an important public building for example it was determined, that the risk of progressive collapse could be mitigated by sufficiently hardening the garage levels to withstand the design threat as an alternative to designing for the instantaneous removal of columns. The columns were designed to be jacket with steel plates and the slabs were designed to resist uplift blast pressures.
- d) Safety checking of the structure in the damaged state is an important design criterion and it requires similar treatment sophistication as the design in a normal condition. Performance objectives (survival time period, integrity, etc) must be thereby defined and must result in an overall calibrated design.
- e) Finally the choice of the static system, of the materials and of the safety systems influence significantly the structural response to accidental load and need special attention.

## 6 CONCLUSIONS

Robustness and progressive collapse criteria have been reviewed in this contribution as well as current standards in view of safety acceptance. From the presented discussion and results the following conclusions can be drawn:

- Robustness is a property of the structure and must be quantified in such a way, that it can be verified in practical design situations.
- A probabilistic formulation of global failure in case of accidental loads can be used as a decision tool regarding design strategies.
- Performance based design is adequate for extreme events such as accidental loads and for considerations regarding global performance of the structure.
- Performance objectives in damaged condition must be specified in terms of a) degree of local damage and b) survival time and associated actions in damaged condition of the global structure.
- Acceptability criteria for robustness can be defined based on risk acceptance criteria for global failure and under consideration of a safety class differentiation.

## REFERENCES

- Baker, J.W., M. Schubert and M. Faber (2007) On the Assessment of Robustness, Structural Safety.
- Diamantidis, D., and P. Bazzurro (2007) Target Safety Criteria for Existing Structures, Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, Stanford University, CA, USA, March 2007.
- Ellingwood, B.R., and D.O. Dusenberry (2005) Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 20, No. 3.
- Hamburger R.O., Douglas, A.F. and C.A. Cornell (2003) Translating Research to Practice: FEMA/SAC Performance-Based Design Procedures, Earthquake Spectra, Vol. 19, No. 2.
- Joint Committee on Structural Safety (JCSS) (2000) Assessment of Existing Structures, RILEM Publications S.A.R.L., edited by D. Diamantidis.
- Joint Committee on Structural Safety (JCSS), Probabilistic Model Code, www.jcss.ethz.ch
- Lind, N. (1995) A measure of vulnerability and damage tolerance, Reliability Engineering and System Safety 48 Nr. 1.
- Maes, M., K. Fritzsons and S. Glowienka, (2006) Structural robustness in the light of risk and consequence analysis, Structural Engineering International 16, Nr. 2.
- NKB The Nordic Committee on Building Regulations (1984), Recommendations for Loading and Safety Regulations for Structural Design, NKB-Report No. 36, Copenhagen, Denmark.
- NORSOK Standard N-001, Lysaker, Norway, 2004
- Rackwitz R. (2002) Optimization and Risk Acceptability based on the Life Quality Index, Structural Safety, 24, 297-331.
- Shankar Nair, R. (2004) Progressive Collapse Basics, Modern Steel Construction.
- Starossek, U. (2006) Progressive Collapse of Structures: Nomenclature and Procedure", Structural Engineering International Vol. 2.
- Structural Engineers Association of California (SEAOC) (1999) Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Seventh Edition, Seismology Committee, Sacramento, CA, USA.
- Unified Facilities Criteria (UFC) (2003), UFC 4-023-03, Department of Defense, USA, 2003.

## FORSCHUNGSVERBUND VIRTUELLE BAUSTELLE (ForBAU)

### 1. DER FOSCHUNGSVERBUND

Am 01.01.2008 nahm der Forschungsverbund Virtuelle Baustelle – Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung ForBAU seine Arbeit auf. In diesem interdisziplinären Forschungsprojekt ist als einzige bayerische Fachhochschule die Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen vertreten.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Euringer und Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Stockbauer sind in mehreren Teilprojekten mit den Arbeitsgebieten Bauinformatik und Ingenieurvermessung an diesem über 3 Jahre laufenden Projekt beteiligt. Unterstützt werden sie von den für dieses Projekt von der Forschungsstiftung finanzierten wissenschaftlichen Mitarbeitern Dipl.-Ing.(FH), Dipl.-Inf.(FH) Claus Plank und M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Mathias Obergrießner, beides Absolventen der Fakultät Bauingenieurwesen der Hochschule Regensburg.

### 2. AUSGANGSSITUATION

Die bayerische Bauwirtschaft steht gegenwärtig vor der Aufgabe, ihre Kostennachteile gegenüber EU-Konkurrenten mit deutlich niedrigerem Lohnniveau als im Vergleich zu Deutschland wettzumachen. Da die Unternehmen jedoch nur bedingt Einfluss auf die Personalkosten nehmen können, muss der Weg zum kostengünstigen Bauen über effiziente Prozessstrukturen und technisch organisatorische Innovationen sowohl in den Bauprozessen als auch in der gesamten Bauabwicklung führen.

Baufirmen beschäftigen sich klassischerweise überwiegend mit Innovationen in ihren Kernkompetenzen. Sie beginnen erst seit einigen Jahren die enormen Potenziale zu erkennen, die in der Verbesserung der Prozessabläufe und der Optimierung der Zusammenarbeit zwischen Planern, Konstruk-

teuren und Dienstleistern auf der Baustelle verborgen liegen, indem Bauprozesse ganzheitlich betrachtet und abgebildet werden.

### 3. ZIELSETZUNG DES VORHABENS

Für die ganzheitliche Abbildung eines komplexen Bauvorhabens ist die Integration der Daten aus den verschiedenen Bereichen wie der Planung, Vermessung, Arbeitsvorbereitung, Buchhaltung und der Baustelle selbst durch eine zentrale Datenplattform mit standardisierten Schnittstellen notwendig. Durch eine Kopplung von PDM-System (Produktdatenmanagement-System), Bauwerks- und Simulationsmodell in einem Bauwerksinformationsmodell mit den zeitlich-räumlichen Abhängigkeiten der Bauprozesse können weitreichende Optimierungspotenziale im gesamten Ablauf nutzbar gemacht werden. Dieses Bauwerksmodell soll über das Bauvorhaben hinweg dynamisch aktualisiert werden und den verschiedenen Nutzern durch gezielte Abfragen zu jeder Projektphase die relevanten technischen und wirtschaftlichen Informationen liefern.

Kritische Prozesse oder Abläufe sollen vorab im virtuellen Modell des Bauvorhabens getestet werden, um später auf der realen Baustelle ohne Verzögerungen und unnötige Stillstandszeiten durchgeführt werden zu können. Auch der wirtschaftliche Erfolg eines Bauvorhabens kann über die virtuellen Modelle bereits in frühen Projektphasen abgeschätzt werden. Während der gesamten Bauzeit soll die tatsächlich erbrachte Leistung auf der Baustelle durch mobile EDV-Systeme online dokumentiert und in das vorhandene virtuelle Baustellenmodell eingepflegt werden, um auch dort den Baufortschritt zu protokollieren und im Bedarfsfall die Planungen anpassen zu können. Somit entstehen dynamische 4D-Modelle der Baustelle, die neben der Geometrie und

### NEUE TECHNOLOGIEFELDER FÜR DIE VIRTUELLE BAUABWICKLUNG



- Simulation (Ablauf + Struktur)**  
⇒ Prozessoptimierung
- Visualisierung der Planung**  
⇒ Virtual Reality (VR/AR)
- Baustellencontrolling**  
⇒ Kostencontrolling  
⇒ Leistungscontrolling  
⇒ Soll-Ist Abgleich
- Digitale 3D-Vermessung im gesamten Bauverlauf**  
⇒ Laserscanning
- Dynamische parametrisierte 3D-CAD Modelle**
- Interaktive „intelligente“ Planungsmodelle für Technik und Kalkulation**
- Maschinendatenüberwachung**  
⇒ Controlling per Galileo
- Mobile Datenerfassung**  
⇒ MDA, OBU, AutoID (z.B. RRD)
- Datenmanagement**  
⇒ Vernetzung CAD + ERP-Systeme

dem zeitlichen Verlauf auch zusätzliche baumodellbezogene Daten wie z.B. Qualitätsmanagement relevante Daten beinhalten.



**4. VORGEHENSWEISE:**

Die Hauptaufgaben des Forschungsvorhabens lassen sich im Wesentlichen mit folgenden Kernpunkten beschreiben:

- Durchgängige 3D-Modellierung des Bauwerks, der Baustelle und der Bauprozesse mit Nutzung der Modelldaten über alle Prozessstufen hinweg in einem zentralen Datenbanksystem (PDM)
- Dynamische Ablaufsimulation der Bauprozesse in der frühen Planungsphase zur Validierung der statischen Projektpläne
- Zentrale Datenverwaltung und Entwicklung von Strategien zur modellbezogenen Datenhaltung und kontextbezogenen Aufbereitung für die verschiedenen Nutzer des Modells
- Ganzheitliche Optimierung der Prozessabläufe auf der Baustelle unter Berücksichtigung der Subunternehmereinbindung

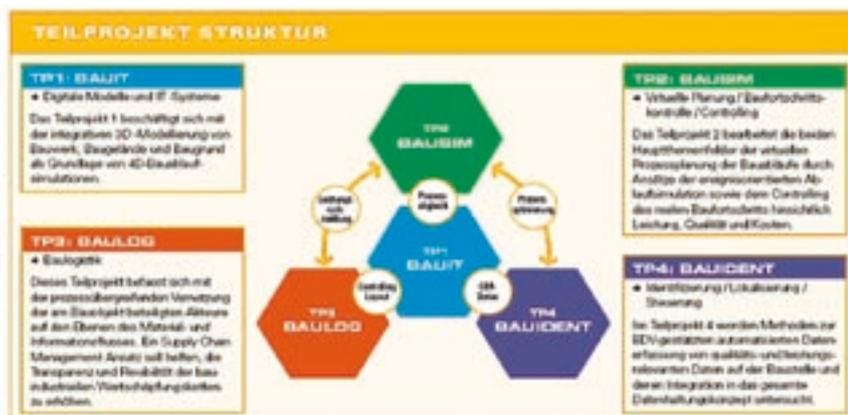
Zur Realisierung dieser Aufgabenstellungen ist ein Kerngedanke des Projektes die frühzeitige Integration vorhandener innovativer Techniken mit wissenschaftlichen Methoden in ein standardisierbares Prozessmodell der Baustellenabwicklung, das über den gesamten Projektverlauf genutzt und weiter bearbeitet wird.

Bisher sind derartige Ansätze nur wenig verbreitet und auch nur unzureichend in den gesamten Bauablauf eingegliedert. Vor allem im Bereich der CAD-Modellierung würden sich durch eine prozessübergreifende Nutzung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks deutliche Optimierungspotenziale ergeben.

**5. TEILPROJEKTE**

Das Forschungsvorhaben „Virtuelle Baustelle – Digitale Werkzeuge für die Bauplanung und -abwicklung“ unterteilt sich im Wesentlichen in vier Teilprojekte (TP). TP1 befasst sich mit dem Thema BAU-IT-Systeme, TP2 mit BAU-Simulation, TP3 untersucht den Bereich der Bau-Logistik und TP4 ist für die Baustellen-Steuerung bzw. Identifizierung verantwortlich. Eine genauere Beschreibung der Aufgaben der einzelnen Teilprojekte kann aus der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

Innerhalb des Projektes erfolgt eine eng verknüpfte Zusammenarbeit zwischen den wissenschaftlichen Mitarbeitern und den Industriepartnern. Hierzu finden mehrmals im Jahr Mitarbeiter-sitzungen, Teilprojekt-sitzungen, Arbeitskreistreffen, Institutssitzungen und Vollversammlungen statt. Durch diese enge Kooperation wird sichergestellt, dass eine optimale und praxisgerechte Lösung für das Vorhaben gefunden werden kann.



**6. WISSENSCHAFTLICHE PROJEKTPARTNER**

Neben den in ForBAU kooperierenden universitären Forschungseinrichtungen der Universitäten Erlangen-Nürnberg mit dem Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Logistik, der Hochschule Regensburg mit der Fakultät Bauingenieurwesen und der TU München mit den Lehrstühlen für Computation in Engineering, für Fördertechnik Materialfluss Logistik und dem Zentrum Geotechnik sind über 35 Industriepartner aktiv an dem Forschungsvorhaben beteiligt.

**7. AUFGABEN DER HOCHSCHULE REGENSBURG**

Die Fakultät Bauingenieurwesen der HS-Regensburg bearbeitet mit dem Fachbereich Vermessungskunde/Verkehrswesen das Thema der terrestrischen Vermessung, 3D-Laserscanning, GPS-Vermessung, Maschinensteuerung und weitere Gesichtspunkte innerhalb der Vermessung. Im Fachbereich Bauinformatik/CAD versucht man Ansätze hinsichtlich der BAU-IT zu entwickeln, die eine Volumenmodellierung des Trassenmodells mit geotechnischen Nachweisen ermöglicht. Außerdem untersucht man zusammen mit dem Lehrstuhl Computation in Engineering an der TU München Datenstrukturen, die sich für eine Integration in ein PDM/PLM – System eignen.

**7.1 Aufgaben der Vermessung**

Der Fachbereich Vermessung sieht sich im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt als die Schnittstelle zwischen der realen und der virtuellen Welt hinsichtlich der geometrischen

Modellbildung. Die Vermessung liefert in der Startphase auf verschiedenen Wegen die für die Modellbildung nötigen Grundlagendaten.

Als „reale Welt“ dienen hierbei vom Forschungsverbund ausgewählte Baustellen der Industriepartner, die möglichst viele von den zu untersuchenden Teilaspekten einer idealisierten Streckenbaustelle abbilden sollen.

Im Zuge der Vermessungstätigkeiten wird auch bereits interdisziplinär untersucht, welche Vermessungstechnologie unter den jeweils gegebenen Randbedingungen zum Erreichen der gewünschten Daten am besten geeignet ist.

In Zusammenarbeit mit den Industriepartnern, wie Instrumentenherstellern, deren Vertriebspartnern und auch Ingenieurbüros, werden zu diesem Zweck Außendiensttermine unter Realbedingungen durchgeführt.



**Abbildung:** Obiges Bauwerk, gescanned mit einer Leica „Scanstation 2“



**Abbildung:** Neubau der B299 bei Neumarkt (Bauwerk 4.1)

Diese sind gerade bei neu entwickelten Messsystemen reich an wertvollen Erfahrungen für alle Beteiligten, lassen Auswertungen hinsichtlich Aufwands und Ergebnisses zu und bieten nicht zuletzt auch die Möglichkeit des Informationsrückflusses in die Lehre.

Die so erhaltenen Messdaten sollen schließlich in einen von allen Disziplinen nutzbaren „Datenpool“ einfließen. Unter diesem Aspekt arbeitet auch der Fachbereich Vermessung an der Entwicklung einer möglichst redundanzfreien und feingranularen Art der Datenhaltung mit.

Im zeitlichen Ablauf der Bautätigkeit wird die Vermessung - als eine mögliche Disziplin - immer wieder den Ist-Stand zurück in das System der „virtuellen Baustelle“ liefern und somit einen Abgleich zwischen Planung und Realität schaffen. Hierzu ist es im Rahmen des Forschungsprojektes wie-

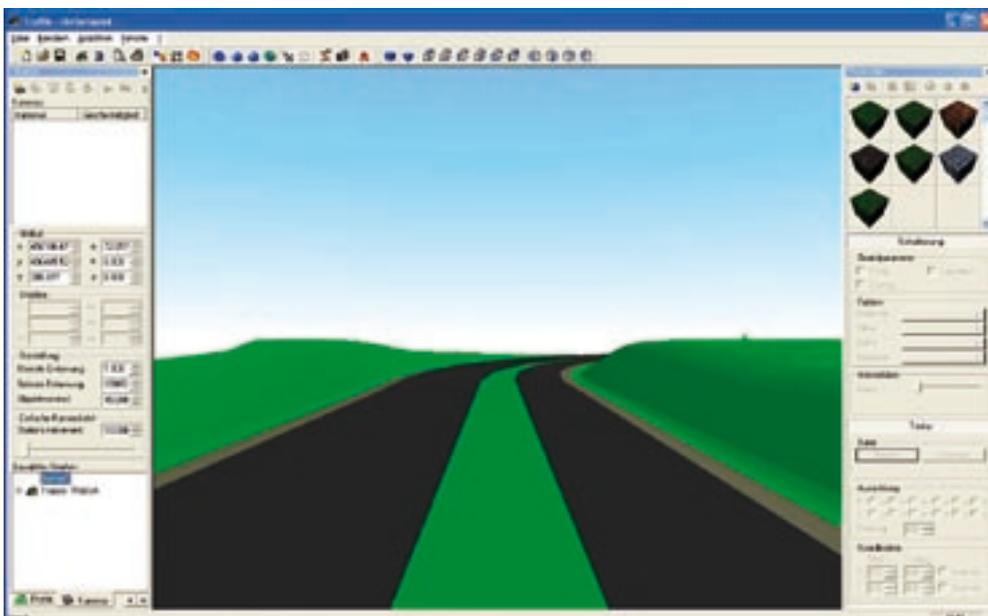
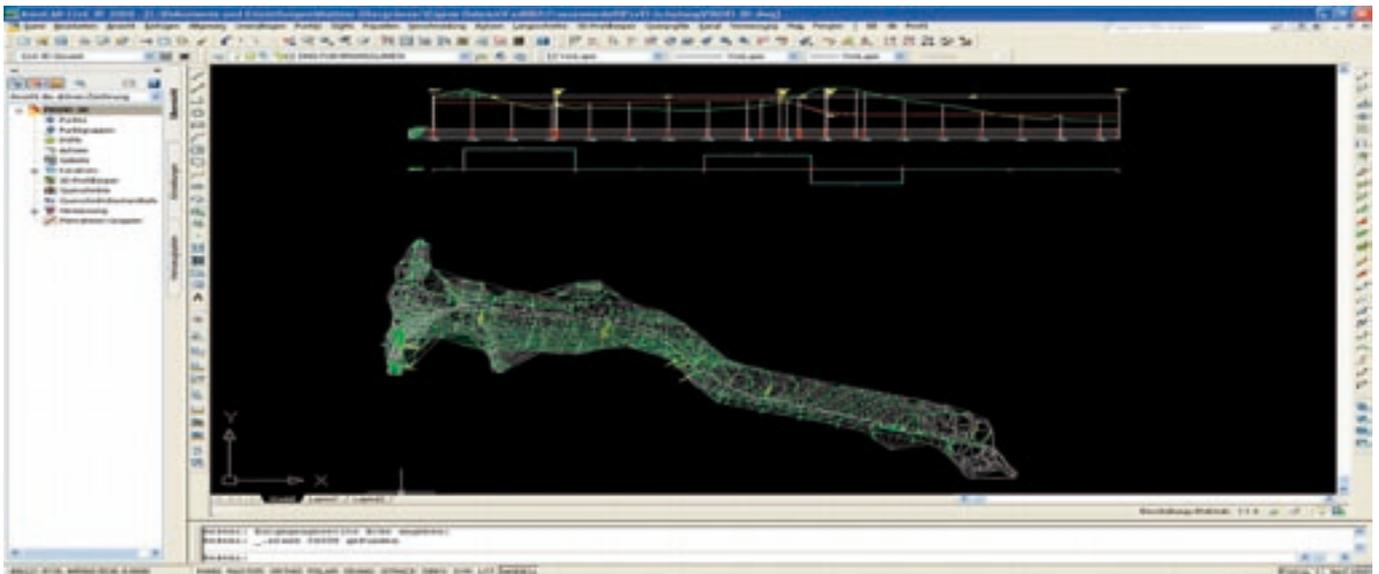
derum nötig, mögliche Ansätze des Abgleichs auf ihre Machbarkeit und Rentabilität hin zu überprüfen und die erzielbaren Ergebnisse zu bewerten.

### 7.2 Aufgaben der Bauinformatik

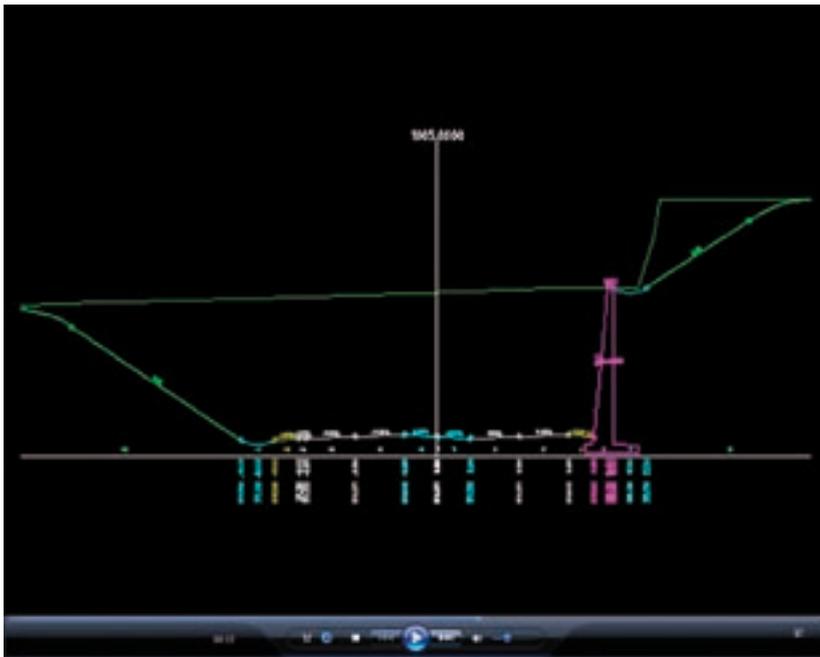
Im ersten Schritt hat sich der Fachbereich Bauinformatik/CAD die Aufgabe gesetzt, kommerzielle 3D Trassierungssoftwares wie z.B. AutoCAD Civil 3D von Autodesk,

ProVI ([www.provi-cad.de](http://www.provi-cad.de)) und InRoads von Bentley ([www.bentley.com](http://www.bentley.com)) zu evaluieren. Hieraus möchte man eine Aussage erhalten, welches Programm sich für die Anwendung innerhalb des Forschungsprojektes am Besten eignet.

Die Evaluierung wird anhand von verschiedenen Untersuchungskriterien wie geeignete Datenschnittstellen (z.B. REB, OKSTRA, LandXML), Performance, Benutzerfreundlichkeit und Praxistauglichkeit durchgeführt.



**Abbildungen:**  
Trassierungssoftware ProVI



**Abbildung:**  
Trassierungssoftware ProVI

Ein weiteres Kriterium ist die Möglichkeit ein gutes Integrationsniveau zu erreichen, welches z.B. durch die Verfügbarkeit geeigneter Schnittstellen zur Anwendungsprogrammierung (API's) gewährleistet sein kann.

Auf Basis des erstellten digitalen Geländemodells (DGM) (→Vermessung) wird dann untersucht, Trassierungsstrukturen (Oberflächen-DGM, Erdschichten-DGM's) aus dem Programm geeignet auszulesen. Betrachtet werden hierzu Querschnittsbereiche die einen geotechnisch kritischen Trassierungspunkt (hoher Einschnitt, im Bereich der Brückengründung) darstellen. Neben dem 3D-Gelände / -Untergrundmodell wäre es deswegen sinnvoll, Standsicherheitsmaßnahmen wie Stützbauwerke, Anker, Verbauwände, hydraulische Bauwerke in das Trassierungsstruktur-Modell zu integrieren.

Der Datenexport der Trassierungs-, Gelände- und Bodenstrukturen erfolgt in eine geometrisch und semantisch (boden-spezifisch) separierte Datenstruktur (z.B. auf Basis von LandXML), welche direkt von Software zur geotechnischen Strukturanalyse gelesen wird. Damit reduziert sich zum einen der Aufwand zur Modellierung geometrischer und schicht-spezifischer Eigenschaften, und zum anderen ist die zentrale Modellierung dieser Informationen eine Voraussetzung für weitgehende Redundanzfreiheit.

In einem weiteren Schritt werden Daten und Prozesse in ein geeignetes PDM-System integriert, um allen Projektbeteiligten

Zugriff auf gewünschte Informationen zu ermöglichen. Zentraler Gedanke ist, durch die datenbankunterstützte Verwaltung notwendiger Informationen ein weitgehend redundanz-freies System zu gewährleisten.

Das PDM-System wird in Anlehnung an die PLM-Systeme (Product Lifecycle Management -System) aus der Fahrzeug- und Flugzeug-technik untersucht. Hierzu werden die PLM-Systeme Teamcenter Express bzw. Engineering ([www.plm.automation.siemens.com](http://www.plm.automation.siemens.com)) und Productstream ([www.autodesk.de](http://www.autodesk.de)) eingesetzt. Diese beiden Produkte haben sich bereits in der Automobil- und Flugzeugbaubranche etabliert. Es ist zu prüfen, ob, und welche Prozesse sich innerhalb des Systems auf die Baubranche übertragen lassen. Nach der Evaluierung der beiden Systeme wird eines hinsichtlich bauspezifischer Prozesse angepasst bzw., falls zusätzliche Prozesse notwendig sind, erweitert. Für den Abgleich der Software wurde eine Systemanalyse durchgeführt, die die Planungs- und bauspezifische Prozesse, sogenannte „Workflows“ widerspiegelt.

Die benötigten planungsspezifischen Daten sollen aus einem einzigen Modell, das im PDM-System vorgehalten wird, bezogen werden können. Dies ermöglicht eine deutliche Reduzierung des Datenflusses zwischen den baubeteiligten Planungsbüros und Baufirmen und verhindert die unnötige und zeitintensive Mehrfachmodellierung der Bauwerks- und Trassierungsstrukturen.



Forschen heißt, Neuland zu betreten...



...Innovation im Hochbau

**Justiz**

Justizzentrum Schweinfurt  
JVA Stralsund  
JVA Tonna

**Verwaltung**

Audi Ingolstadt  
Sparkasse Regensburg  
Hypo-Vereinsbank Regensburg

**Hochschulen, Labors**

FH Amberg  
Uni Bayreuth  
TU Dresden

**Industrie**

Siemens Regensburg  
BMW Regensburg, Dingolfing  
Audi Ingolstadt, Győr



**DÖMGES ARCHITEKTEN AG**  
Architektur und Stadtplanung

Boelckestraße 38 D-93051 Regensburg  
Telefon +49- (0) 941-99 206-0  
Telefax +49- (0) 941-99 206-66

info@doemges.ag  
www.doemges.ag

Ihr leistungsstarker Partner rund um das Gebäude



**Götz-Gebäudemanagement**  
**RSL GmbH & Co KG**

Hofer Straße 10 • 93057 Regensburg  
Tel. +49 (0)941 64 04-0 • Fax +49 (0)941 64 04-190  
service@goetz-fm.com

**www.goetz-fm.com**

Mit über 70 Niederlassungen und Stützpunkten in Deutschland, Österreich, in der Schweiz,  
in der Tschechischen Republik, in Ungarn, Kanada und am Persischen Golf.

zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2000 und 14001:2005



## Partnerschaft und Kompetenz

... Basis für maßgeschneiderte Hydrauliksysteme

Kleine Hydrauliksysteme

für Patientenlagerung, mikrohydraulische Systemlösungen  
und Fahrzeugtechnik

**www.hoerbiger.com**

HOERBIGER Micro Fluid GmbH  
Borsigstraße 11 · 93092 Barbing  
e-mail info-hmf@hoerbiger.com

  
**HOERBIGER**  
because performance counts

# Bauartikel für mehr Sicherheit am Dach

Als Hersteller sicherheitsfördernder und werterhaltender Produkte rund ums Dach ist LEHMANN schon lange ein Begriff in der Branche. Der Anspruch: qualitativ hochwertige Produkte zu einem marktgerechten Preis. Dafür verarbeiten wir beste Vormaterialien bei konstant hohem Fertigungsstandard. Denn wir sind überzeugt, dass nur echte Spitzenqualität auf dem Markt bestehen wird.



Ebenfalls Top-Qualität liefert unsere weit über die regionalen Grenzen hinaus bekannte **Feuerverzinkerei** mit Beratung, Abholservice und **Qualitätsverzinkung** nach DIN EN ISO 1461.

## Das Komplett-Paket aus einer Hand im zertifizierten Duplex-System:

Feuerverzinkung nach DIN EN ISO 1461 und Beschichtung nach DIN EN ISO 12944 erfüllt die Anforderungen der neuen ZTV KOR 2002 für **besondere Nachhaltigkeit** im Korrosionsschutz.



# Feuerverzinken

plus Beschichtung auf höchstem Qualitätsniveau



# LEHMANN

Otto Lehmann GmbH · Postfach 15 61 · 93070 Neutraubling

Telefon: 09401 786-0 · Telefax: 09401 786-47

Internet: [www.otto-lehmann-gmbh.de](http://www.otto-lehmann-gmbh.de) · E-Mail: [info@otto-lehmann-gmbh.de](mailto:info@otto-lehmann-gmbh.de)

## SCHNELLNACHWEIS VON METHICILLIN-RESISTENTEM STAPHYLOCOCCUS AUREUS – ÖKONOMISCHE ASPEKTE VON SCREENING BEI AUFNAHME DES PATIENTEN

Vortrag anlässlich der Jahresversammlung des Berufsverbands der Ärzte für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie, 25. – 27. März 2004, Potsdam

Aktualisierte Fassung

### **EINLEITUNG**

Methicillin-Resistenz bei *Staphylococcus aureus* (MRSA) stellt therapeutisch ein erhebliches Problem dar: Eine Reihe von Studien belegt eine längere Behandlungsdauer und eine höhere Komplikationsrate mit schlechterem Endergebnis, wenn Betaaktame als primäre Therapieform nicht wirksam sind (2;4;7;9;15). Eine weitere Einschränkung der therapeutischen Möglichkeiten droht durch das Auftreten von MRSA-Stämmen mit verminderter Empfindlichkeit bzw. Resistenz gegen Glykopeptide oder Linezolid (26). Der zunehmende Gebrauch von Glykopeptiden zur Behandlung von MRSA steht mutmaßlich im Zusammenhang mit der Selektion von Vancomycin-resistenten Enterokokken (VRE), die ihrerseits als Ursprung der Glykopeptidresistenz bei MRSA gelten (5;31;34). Es ist deswegen als bedrohlich anzusehen, wenn – weltweit wie auch in Deutschland – eine Zunahme von MRSA bei Krankenhausisolaten von *S. aureus* zu verzeichnen ist (20). Deutschland wies in einer Studie der European Antimicrobial Resistance Surveillance System (EARSS; [www.earss.rivm.nl](http://www.earss.rivm.nl)) aus den Jahren 1999 bis 2002 von allen europäischen Ländern die höchsten MRSA-Zuwachsraten auf bei großen Unterschieden zwischen verschiedenen Regionen (32). In der Resistenzstudie der PEG aus dem Jahre 2004 hat der Anteil von MRSA in Deutschland und angrenzenden Ländern bereits 22,6 % erreicht ([www.p-e-g.de](http://www.p-e-g.de)). In den USA, wo der Anteil von MRSA in Krankenhäusern landesweit 50 % beträgt („hospital associated MRSA“; HA-MRSA), wird analog der Ausbreitung von Penicillin-resistenten *S. aureus* in den 50er Jahren nun eine weitere Verbreitung von MRSA „aus dem Krankenhaus heraus“ auch außerhalb von medizinischen Einrichtungen befürchtet (30). Eine neue Bedrohung stellen MRSA-Stämme dar, die primär außerhalb von medizinischen Einrichtungen vorkommen (sog. „community-associated MRSA“; CA-MRSA) (23), und wegen ihrer höheren Virulenz in medizinischen Einrichtungen ein erhebliches nosokomiales Problem darstellen können (22).

Konzepte zur Eindämmung von MRSA in medizinischen Einrichtungen liegen vor, sie gründen sich auf koordinierte Maßnahmen: 1. Erkennung der Einschleppung von MRSA durch Screening-Maßnahmen, 2. Verzögerung der Evolution bzw. Selektion durch Infektionsprävention und rationalen Einsatz von Antibiotika, und 3. Verhütung der Verbreitung durch Hygienemaßnahmen. Die Maßnahmen sind beispielsweise in den Niederlanden, Dänemark und Slowenien muster-gültig umgesetzt und werden als „search, separate, destroy, declare“-Politik bezeichnet (32;33). Aktive Suche nach MRSA durch Screening-Maßnahmen bei Aufnahme von Risiko-Patienten, nach Kontakt mit MRSA-Patienten (andere Patienten und Personal) sowie nach Sanierung des Trägerstatus ist ein fester Bestandteil des niederländischen Konzepts. Aufwändige Isolierungsmaßnahmen, die die Übertragungsrate wesentlich senken (16-18), und wie sie auch in deutschen Krankenhäusern üblich sind, können aber nur dann ihre volle Wirksamkeit erfassen, wenn sie möglichst frühzeitig angewandt werden. Eine Statusbestimmung und Konsensempfehlung über die Indikation und den Umfang von MRSA-Screeninguntersuchungen in Deutschland wurde unter Federführung des Robert Koch-Instituts im Herbst 2005 vorgestellt (12). Offene Fragen betreffen z. B., ob alle Patienten oder nur Risikopatienten bei Aufnahme (bzw. Entlassung) untersucht werden sollten, welche Kriterien für die Einstufung als „Risikopatient“ gelten, wie welche Untersuchungsmaterialien zu entnehmen sind (z. B. trockene oder angefeuchtete Abstrichtupfer von Nase und ggf. anderen Entnahmestellen, wenn ja: welche?, „poolen von Abstrichen“?), und welche Labortechniken mit welcher Sensitivität bzw. Zeitaufwand zum Einsatz kommen sollten (8). Die Einführung neuer Indikationen bzw. schneller und teurer Untersuchungsverfahren (z. B. Direktnachweis mittels PCR) muss sich dabei neben Fragen zur medizinischen Sinnhaftigkeit ganz besonders die Frage gefallen lassen, ob diese Maßnahmen kosteneffektiv sind. Eine Reihe von klinischen Studien sowie Modellrechnungen belegen einen positiven Effekt von MRSA-Screeninguntersuchungen bzgl. der Verhütung von neuen Infektionen, sowie eine Senkung der Gesamtkosten (13;19;25;27;36). Auch eine aktuelle Studie aus Deutschland kommt unter DRG-Abrechnungsbedingungen zum Schluss, dass MRSA-Screening kosteneffektiv ist (35). In vielen Institutionen stoßen die Empfehlungen zu MRSA-Screening allerdings auf Vorbehalte, schließlich werden zusätzliche Kosten nicht nur durch die Diagnostik verursacht, sondern bei positivem Nachweis auch in erheblichem Umfang durch die nun notwendigen Isolierungsmaßnahmen. Für die einzelne medizinische Institution erscheint eine Entscheidung schwierig, weil Kostenstruk-

<sup>1</sup> Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene, Universität Regensburg, Regensburg

<sup>2</sup> Fachhochschule Regensburg, Fachbereich Betriebswirtschaft, Rechnungswesen und Controlling, Regensburg

turen aus Studien nicht einfach übertragen werden können, weil die lokale MRSA-Rate vom allgemeinen Durchschnitt stark abweicht, oder weil der Nettoeffekt wegen der außerordentlichen Komplexität der Kostenberechnungen schwer kalkulierbar ist.

Der vorliegende Artikel möchte 1. die Problematik einer Kostenabschätzung diskutieren, 2. die aktuell durchgeführten Screeningmaßnahmen für MRSA mittels schneller PCR-gestützter Diagnostik am Universitätsklinikum Regensburg mit den dazugehörigen Kostenaspekten in einer „sensitivity“-Analyse (25) darstellen, und 3. eine solche Modellrechnung der „sensitivity“-Analyse für andere medizinische Institutionen zur Verfügung stellen.

**MATERIAL UND METHODE**

**MRSA-Risikostatus von Patienten**

Laut Beschluss der Hygienekommission am Universitätsklinikum Regensburg vom 06.05.2003 werden Patienten in Bezug auf ihren MRSA-Risikostatus in 4 Gruppen aufgeteilt (Tab. 1).

**MRSA-Screening-Diagnostik**

Zum Screening wird routinemäßig ein Nasenabstrich (für beide Nasenvorhöfe), sowie falls vorhanden zusätzliche Proben aus Infektionsherden (Wunde, Sputum, BAL, etc.), entnommen. Anschließend wird der Nasenvorhof mit besonderer Berücksichtigung des medialen Abschnittes abgestrichen (6). Die kulturelle Diagnostik erfolgt ohne Voranreicherung auf nicht-selektiven und selektiven Festnährmedien (Columbia-Schaffblutagar mit aufgelegtem Aztreonam- und Ciprofloxacin-Blättchen, Mannit-Kochsalz-Agar). Verdächtige Kolonien

werden mittels Standard-Methoden identifiziert (1) und eine Resistenzbestimmung nach CLSI durchgeführt (24).

In einer parallel durchgeführten Studie zum schnellen PCR-gestützten MRSA-Nachweis August bis November 2003 wurden dieselben Untersuchungsmaterialien verwendet. Nach automatisierter DNA-Isolierung (MagnaPure®, Roche, Mannheim) wurde mittels LightCycler® (Roche) die PCR für das mecA-Gen, ein S. aureus-spezifisches Gen sowie ein Staphylokokken-spezifisches Gen durchgeführt. DNA-Isolierung und Inhibition wurden durch geeignete Kontrollen überprüft (28). Die Ergebnisse ließen in 86 % der Fälle eine eindeutige Aussage zu, die Sensitivität betrug 94 %, und der negative Vorhersagewert 99 % (21). Derzeit wird in der klinischen Routine ein verbesserter PCR-Test 2 mal täglich durchgeführt, sodass die Ergebnisse jeweils ca. um 13:00 bzw. 17:00 desselben Tages vorliegen (14).

„sensitivity“-Analyse: Die Faktoren für die Berechnung der Kosten wurden in einem Excel®-Arbeitsblatt erfasst. Die folgenden verschiedenen Zahlen- und Kostenblöcke wurden berücksichtigt:

**Block 1, Patienten mit MRSA bei Aufnahme:** Anzahl der Patienten, MRSA-Prävalenz, Anteil mit MRSA kolonisierter Patienten, Anteil MRSA-infizierter Patienten, Anteil MRSA-infizierter Patienten mit schwerer (lebensbedrohlicher) Infektion, zusätzliche Mortalität durch MRSA-Infektion.

**Block 2, Patientenscreening, erkannte Patienten:** Anteil Risikogruppe insgesamt, Anteil Risikogruppe „hohes Risiko“, tatsächliche Screening-Rate, Sensitivität der Diagnostik, Spezifität der Diagnostik, Anzahl der Untersuchungen pro Patient, Rate der zufälligen Diagnostik, Rate der wieder aufgenommenen Patienten, Rate des spontanen Verlusts von MRSA.

**Block 3, Übertragungsfenster:** Mittlere Patientenverweildauer, mittlere Patientenverweildauer Kolonisierte, zusätzliche

Risiko	Station	Kriterien	Maßnahmen
Hoch	Alle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MRSA bekannt &lt; 1 Jahr</li> <li>• Verlegung von externer Intensivstation</li> <li>• Verlegung von Ausland</li> </ul>	Screening Präventive Isolierung*
Überdurchschnittlich	Alle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MRSA bekannt &gt; 1 Jahr</li> <li>• in externem Krankenhaus &gt; 2 Wochen innerhalb des letzten Jahres</li> <li>• Kontakt zu MRSA-Patient**</li> </ul>	Screening
Niedrig	Intensiv	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlegung aus Alten-/Pflegeheim</li> <li>• Chronische Erkrankungen</li> </ul>	Screening
Sehr niedrig	Alle anderen	–	–

**Tabelle 1:** MRSA-Risikostatus von Patienten am Universitätsklinikum Regensburg

\* bis Ergebnis der Diagnostik bekannt

\*\* Unterbringung in demselben Zimmer

Verweildauer Infizierte, Zeitdauer Diagnostik, Übertragungsintervall vor Diagnostik Screening, Übertragungsintervall vor Diagnostik zufällig, Übertragungsintervall nach Diagnostik Kolonisierte, Übertragungsintervall nach Diagnostik Infizierte.

**Block 4, Neue MRSA-Patienten:** Neue MRSA-Fälle/MRSA-Pat.-Tag ohne Isolierung, Risiko-Reduktionsfaktor durch Isolierung, Neue MRSA-Fälle/MRSA-Pat.-Tag mit Isolierung.

**Block 5: Kosten:** Isolierung Kolonisierter pro Tag, Behandlung Infizierter pro Tag, alternativ: Entgangener Deckungsbeitrag (nach DRG), Material mit Anforderung „Screening“, Material mit Anforderung „Entzündungserreger“ bei Infektion, Therapiedauer Infizierte

Aus diesen Größen wurden u. a. die folgenden Parameter errechnet: Therapiekosten bei Infektion, Kosten der konventionellen Diagnostik bei Infektzeichen, Kosten von Screening, Kosten der präventiven Isolierung, Kosten der Isolierung nach positivem Befund, intangible Kosten: zusätzliche Mortalität, Zunahme der MRSA-Rate innerhalb eines Jahres. Es wurden die absoluten Kosten sowie der Quotient aus den aufgewendeten Kosten und den Kosten für verhütete Fälle als Maß für Kosteneffizienz gebildet. (stark mod. nach [25]).

**ERGEBNISSE**

**Kostenabschätzung**

Nach S. B. Levy betreffen Infektionskrankheiten die Gesellschaft. Dies weist auf die außerordentliche Komplexität von Kosten-Nutzen-Kalkulationen hin. Durch MRSA bzw. Gegenmaßnahmen verursachte Kosten müssen für einen Vergleich in intangible Kosten (Kosten, die nicht berechnet werden können) und erfassbare Kosten (direkte und indirekte) unterschieden werden. In einer polarisierten Sicht lassen sich 2 verschiedene Strategien annehmen („Therapie“: keine Diagnostik, kalkulierte Gabe von MRSA-wirksamen Medikamenten bei jeder Infektion; „Prävention“: Diagnostik zur Erkennung von Trägern und Infizierten sowie entsprechende Hygienemaßnahmen), die sich in ihrer Kostenstruktur grundlegend unterscheiden (vgl. Tab. 2).

Wie intangible Kosten durch Antibiotikaresistenz von S. aureus betroffen sein können, zeigt das Beispiel der Geschichte der Penicillinresistenz von S. aureus. Zwischen 1950 und 1960 kam es durch einen Anstieg der Penicillin-resistenten S. aureus auf > 90 % zu einem Wiederanstieg der Mortalität bei Bakteriämie durch S. aureus von 20-30 % auf 40-50 %

„Therapie statt Prävention“	„Prävention statt Therapie“
<b>Erhöhung intangibler Kosten durch</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Mortalität</li> <li>• Erhöhte Morbidität</li> <li>• Gefährdung anderer Patienten</li> <li>• Gefährdung des Personals</li> <li>• Selektion von VRE, GISA, VRSA, HA-MRSA, CA-MRSA*</li> <li>• Ausbreitung von MRSA außerhalb von medizinischen Einrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschlechterung der Prognose der Grunderkrankung</li> <li>• Psychische Belastung durch Isolierung</li> </ul>
<b>Erniedrigung intangibler Kosten durch</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verhütung anderer nosokomialer Infekte bzw. Erreger</li> </ul>
<b>Erhöhung direkter/indirekter Kosten durch</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Therapie</li> <li>• Verlängerte Verweildauer durch verzögertes Ansprechen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Screening/Hygiene/Dekontamination</li> <li>• Verlängerte Verweildauer durch erschwerte Behandlung der Grunderkrankung</li> </ul>
<b>Erniedrigung direkter/indirekter Kosten durch</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rationale Antibiotikatherapie</li> </ul>

\*VRE: Vancomycin-resistente Enterokokken; GISA: Glykopeptid-intermediäre S. aureus; VRSA: Vancomycin-resistenter S. aureus; HA-MRSA: „hospital-associated“ MRSA; CA-MRSA: „community-associated“ MRSA

**Tabelle 2:** Gegenüberstellung von Kosten durch eine Strategie der „Therapie statt Prävention“ bzw. „Prävention statt Therapie“.

(29). Schlechter beherrschbare infektiöse Komplikationen nach primärem Erfolg von „high tech“-Medizin (z. B. Organtransplantationen, Immunsuppression, Verbrennungen, etc.) sind in Bezug auf die Kosten-Nutzen-Analyse von Infektionen durch MRSA mit Sicherheit relevant, jedoch in ihrer Größenordnung schlecht abzuschätzen. Was es für die kalkulierte Behandlung von leichteren Infektionen außerhalb von Krankenhäusern bedeuten würde, wenn sich MRSA-Stämme dort weiter ausbreiten, ist derzeit nicht abschätzbar.

Die Betrachtung und der Vergleich von Kostenaspekten werden durch unterschiedliche Strukturen und Bedingungen in verschiedenen medizinischen Einrichtungen weiter erschwert. Eine Reihe von Faktoren kann bei einer Kosten-Nutzen-Betrachtung zu höchst unterschiedlichen Ergebnissen führen (Tab. 3, ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

Die Problematik sei am Beispiel der Auswirkung von kürzeren Krankenhausverweilzeiten (durch DRGs) skizziert. Als Folge(n) wäre z. B. vorstellbar:

- Art und Spektrum der vorherrschenden (Epidemie-)Klone von MRSA
- Prävalenz von MRSA in Normal- und Risikopatienten
- Anteil der MRSA-Träger mit anschließender Infektion
- Verweildauer der Patienten
- MRSA-Trägerrate von Personal, Risikofaktoren
- Selektionsdruck durch Antibiotika (Art und Umfang)
- Umsetzung von Basis-Hygiene-Maßnahmen (Rate der Händedesinfektion)
- Umsetzung von MRSA-spezifischen Hygiene-Maßnahmen
- Bauliche Bedingungen (wie viele Patienten in einem Raum?, „overcrowding“)
- Stellenschlüssel („understaffing“)/Motivation/Ausbildung des Personals
- Kosten für mikrobiologische Untersuchungen
- Finanzielle Konsequenzen bei Überschreiten der durchschnittlichen Liegedauer durch infektionsbedingte Komplikationen

**Table 3:** Faktoren, die die Vergleichbarkeit von Kosten-Nutzen-Betrachtungen aus verschiedenen medizinischen Einrichtungen einschränken

- eine Abnahme der Anzahl der Übertragung durch ein verkleinertes Übertragungsfenster,
- eine Zunahme der Übertragung durch Vernachlässigung von Basis-Hygiene bei der möglichst schnellen Durchführung der diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen (d. h. Erhöhung der Übertragungsrate), oder auch
- eine „Pseudo“-Abnahme durch ausbleibende Erfassung von neu erworbenen MRSA-Stämmen bei bereits entlassenen Patienten.

### Screeningmaßnahmen und Kostenüberlegungen am Universitätsklinikum Regensburg

Kostenabschätzungen zur Einführung einer neuen Maßnahme können sich in einem ersten Schritt an einem Vergleich der Kosten der neuen Maßnahme und ihrem Potential zur Verhütung einer MRSA-Infektion orientieren. Wird beispielsweise einer Maßnahme das Potential zur Verhütung einer MRSA-Infektion pro Monat zugeschrieben, und sind die zusätzlichen Kosten durch eine solche Infektion bekannt, so kann daraus das Budget zur Finanzierung dieser Maßnahme abgeschätzt werden. Beispiel: Bei unter DRG-Bedingungen nicht erstatteten Kosten von € 5705,75 für eine nosokomiale Infektion durch MRSA (35) könnten pro Jahr maximal  $1/\text{Monat} \times 12 \text{ Monate} \times € 5.705,75 = 68.469 €$  zusätzlich ausgegeben werden (Anzahl der verhüteten Fälle  $\times$  Kosten pro Fall). Für die Variable „Anzahl der verhüteten Fälle“ kann in der Praxis eine (pessimistische) Schätzung

angenommen bzw. eine Annahme getroffen werden, da genaue Daten oft nicht vorliegen.

Um eine Kostenabschätzung im Sinne einer Kosten-Nutzen-Analyse für die Durchführung von MRSA-Schnelldiagnostik mittels PCR bei Aufnahmescreening von Risikopatienten auf Intensivstationen zu erhalten, wurde am Universitätsklinikum Regensburg eine „sensitivity“-Analyse durchgeführt. Die Fragestellung war, in welchem Maß eine PCR-gestützte Schnelldiagnostik, deren Ergebnis nach drei Stunden verfügbar ist, zur Verhütung einer weiteren MRSA-Übertragung bzw. zur Steuerung von Ressourcen auf einer Intensivstation beitragen kann. Dabei werden die Kosten der Diagnostik und die Kosten für präventive Isolierung bei Hochrisikopatienten bzw. Isolierung bei positivem Nachweis den Kosten für mögliche neue MRSA-Fälle gegenübergestellt. Es wurde darauf geachtet, dass sämtliche Rechnungsgrößen aus Daten von Intensivstationen des Universitätsklinikums Regensburg stammen.

Die Zahlen zur Trägerrate von MRSA bei Aufnahme der verschiedenen Risikogruppen sowie die Übertragungsrate auf neue Patienten wurden aus aktuell durchgeführten Studien übernommen (Manuskript eingereicht). In der ersten Studie ( $n = 450$  Patienten) betrug die Trägerrate bei neu aufgenommenen Patienten auf die Intensivstation  $68/1.000$  (Hochrisikopatienten  $280/1.000$ ). In einer zweiten Studie wurden Patienten ( $n = 285$ ; 1.064 Abstriche), die im Zimmer eines Patienten mit neu erkanntem MRSA lagen, über 14 Tage regelmäßig auf MRSA untersucht. Bei 7 % dieser Kontaktpatienten konnte ebenfalls MRSA gefunden werden. Aus der Kontaktdauer ließ sich eine Übertragungsrate von  $1/100$  pro Kontakttag mit einem MRSA-Patienten abschätzen, wenn man annimmt, dass bei dem neu betroffenen Patienten nicht schon vorher unerkannt MRSA vorhanden war (Manuskript eingereicht).

### Berechnete Modellvarianten

Für die Beschreibung von unterschiedlichen klinischen Ansätzen zum Management von MRSA-Patienten wurden 4 verschiedene Handlungsmodelle angenommen, in denen Therapie, Diagnostik und hygienische Maßnahmen einen unterschiedlichen Stellenwert einnehmen. Die 4 Modelle lassen sich beschreiben als: Modell 1: Keine Screening-Diagnostik, keine Infekt-Diagnostik, kalkulierte Gabe von MRSA-wirksamen Antibiotika bei jeder Infektion, keine Isolierung; Modell 2: Keine Screening-Diagnostik, Infekt-Diagnostik, mit MRSA-infizierte Patienten werden isoliert; Modell 3: Kon-

Modell	Direkte Kosten						Intangibel
	Diagnostik Infektion	Diagnostik Screening	Isolierung Risikopat.	Isolierung nach positivem Screening	Isolierung Infektion	Therapie	Mortalität MRSA-Rate
1	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	
2	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	
3	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	
4	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	

**Tabelle 4:** Kostenblöcke der 4 verschiedenen Handlungsmodelle

ventionelle Screening-Diagnostik, Infektdiagnostik, asymptomatische Träger und infizierte Patienten werden isoliert; Modell 4: Schnelle Screening-Diagnostik, Infektdiagnostik, Risikopatienten, asymptomatische Träger und infizierte Patienten werden isoliert. Dabei entspricht das Modell 1 am ehesten der (radikalen) Annahme „Therapie statt Diagnostik“, während die Modelle 3 und 4 der Annahme „Diagnostik statt Therapie“ entsprechen. Modell 2 dürfte für den größten Teil der Krankenhäuser in Deutschland gelten. In der Tab. 4 sind für die 4 verschiedenen Handlungsmodelle die jeweiligen Kostenblöcke aufgeführt.

Die Berechnungen der verschiedenen Kostenblöcke unter den verschiedenen Modellannahmen 1-4 ergab die folgenden Ergebnisse (vgl. auch Tab. 5): Modell 1 schneidet weist mit großem Abstand die niedrigsten €-Kosten auf, umgekehrt verhält es sich bei den intangiblen Kosten, die eine ungebremste Zunahme von MRSA sowie eine erhebliche zusätzliche Mortalität zeigen. Modell 2 weist bereits erhebliche €-Kosten auf, die im Vergleich zu Modell 1 sich vor allem durch die zusätzlich durchgeführten Isolierungsmaßnahmen und die lange Verweildauer von infizierten Patienten ergeben. Modell 3 und in noch stärkerem Umfang Modell 4 führen bei geringfügig höheren Kosten zu einer weiteren wesentlichen Senkung der

intangiblen Kosten. Der Quotient aus „Kosten aus verhüteten Fällen“/„Kosten durch Prävention“ fällt in den Modellen 3 und 4 als „kleiner 1 aus“. In dieser isolierten Betrachtung ist die Kosteneffizienz negativ.

**Modellrechnungen für andere Institutionen**

Um die „sensitivity“-Analyse für andere Institutionen anzuwenden, lassen sich für alle Parameter in den Excel®-Arbeitsblättern leicht die entsprechenden Werte annehmen, die entweder aus eigenen Untersuchungen stammen, der Literatur entnommen sind, oder Grenzwerte von Schätzungen (höchster oder niedrigster anzunehmender Wert) darstellen. Entsprechend lassen sich für alle anderen Werte die für die jeweilige medizinische Einrichtung gültigen Werte einsetzen und per Excel®-File Kosten und Nutzen errechnen. Das Excel®-Arbeitsblatt zur eigenen Berechnung kann beim Autor angefordert werden.

**DISKUSSION**

Eine vollständige Abschätzung von finanziellen Nutzen und Kosten durch die Einführung neuer diagnostischer Verfahren ist wegen der großen Anzahl der einzubeziehenden Fak-

Modell	Kosten gesamt (€)	Kosten Therapie (€)	Kosten Prävention (€)	Kosten Therapie neue Fälle* / Kosten Prävention	Neue MRSA-Patienten (n)	Zusätzlich verstorben (n)	MRSA-„Zins“ (%)	Zunahme MRSA nach 1 Jahr (%)
1	24.687	24.687	0	n. d.	4,4	0,059	4,28	395
2	134.101	134.101	0	n. d.	2,1	0,028	2,01	184
3	161.464	123.302	38.162	0,15**	1,1	0,014	1,05	113
4	177.771	121.961	55.810	0,15***	0,6	0,008	0,60	91

450 Patienten, davon 68 mit MRSA, Intensivstationen, Universitätsklinikum Regensburg. \* „worst case“-Annahme: alle neuen Patienten erleiden eine Infektion, durchschnittliche Kosten pro Infektion € 5.705,75 (35). \*\* Vergleich Modell 3 vs. Modell 2; \*\*\*Vergleich Modell 4 vs. Modell 2.

**Tabelle 5:** Direkte und intangible Kosten durch Screening entsprechend der Handlungsmodelle 1-4

toren und der Komplexität ihrer Beziehungen untereinander schwierig. Intangible Kosten sowie der direkte medizinische Nutzen für den Patienten und die Gesellschaft müssen zudem gesondert bewertet werden. Gleichzeitig befördern in Deutschland die neuen Abrechnungsmodalitäten ein individuelles ökonomisches Verhalten von Kostenträgern, das auf eine Verschiebung von Kosten zielt (vgl. „tragedy of the commons“, (11)). Die Diskussion der Kostenproblematik ist nicht Gegenstand des vorliegenden Artikels. Vielmehr wird ein Rechenmodell vorgestellt, in dem Kosten und der zu erwartende Nutzen einer neuen diagnostischen Methode für die jeweils besondere Situation einer medizinischen Einrichtung abgeschätzt werden können.

Aktuelle Daten zur zunehmenden Verbreitung von MRSA in Deutschland sowie die Erfahrungen anderer Länder (Hochprävalenzland USA, Niedrigprävalenzländer Niederlande, Dänemark) haben in Deutschland zu einer breiteren Diskussion über Kosten und Nutzen von Screeninguntersuchungen auf MRSA bei Aufnahme von (Risiko-)Patienten geführt (8;12). Neben Screeninguntersuchungen bei Aufnahme besteht eventuell ein weiterer Nutzen von Screeninguntersuchungen nach Kontakt von Patienten mit MRSA-Patienten, bei Entlassung, oder bei regelmäßigen Personaluntersuchungen. Evidenzbasierte Daten, die den Nutzen von MRSA-Screening zeigen, liegen leider nur begrenzt vor (35;36). Auf die Bedeutung von möglichst einfachen Definitionen wurde im Rahmen der Expertenkommission des Robert Koch-Instituts hingewiesen. Der Nachweis von MRSA direkt aus Probenmaterial mittels PCR bei Risikopatienten bei Aufnahme mit einer Verfügbarkeit des Ergebnisses innerhalb von drei Stunden verspricht zusätzlich eine Reihe von klinischen Vorteilen: -relativ sicherer (Negative Vorhersagewert > 99 %) Ausschluss einer Besiedlung von Patienten mit MRSA, bei Infektzeichen eine klare Indikation zur kalkulierten Therapie mit MRSA-wirksamen Medikamenten, sowie Durchführung von Isolierungsmaßnahmen; -frühzeitig verfügbare Entscheidung zur Fortführung der präventiven Isolierung bei Hochrisikopatienten bzw. deren Aufhebung. Damit leistet MRSA-Screening im allgemeinen und die schnelle PCR-Diagnostik im besonderen einen Beitrag zu einer rationalen Antibiotikatherapie, Verhütung von MRSA-Ausbreitung sowie Steuerung der Isolierungsressourcen. Am Universitätsklinikum Regensburg ist die Einführung der Untersuchung auf eine hohe Akzeptanz der klinischen Kollegen gestoßen, weil die Raum- und Personalplanung frühzeitig erfolgen kann. Auf der anderen Seite steht dem Nutzen ein erheblicher materieller, technischer und personeller Aufwand entgegen. Ziel der

vorliegenden Überlegungen war es, unter Einbezug von möglichst lokalen epidemiologischen Daten abzuschätzen, ob in finanzieller Hinsicht ein Nutzen der finanziellen Aufwendungen besteht. Zur Abschätzung wurde in Anlehnung an Papia et al. (25) die Methode der „sensitivity“-Analyse gewählt und modifiziert. Die Attraktivität der Anwendung der „sensitivity“-Analyse in Kombination mit Excel® besteht in der einfachen Möglichkeit, schnell verschiedene Werte für die einzelnen Parameter „durchzuspielen“. Wahlweise können eigene Daten, Literaturangaben oder pessimistische bzw. optimistische Annahmen gemacht werden. Auf diese Weise lassen sich auf einfache Art individuelle Szenarien erstellen. Unter Annahme der epidemiologischen Daten für die Situation auf Intensivstationen in Regensburg ergab sich ein differenziertes Bild. Die Werte der von uns verwendeten Rechnungsgrößen (z. B. Übertragungsrate pro Patiententag) ist mit Angaben aus aktuellen Studien vergleichbar (10;27;35). Der Quotient aus vermiedenen gegenüber den tatsächlich aufgewendeten Kosten lag für konventionelles MRSA-Screening von Risiko- und für PCR-gestütztes MRSA-Screening von Hochrisikopatienten weit unter 1. In diesem direkten monetären Vergleich kann eine Kosteneffizienz nicht festgestellt werden. Dieser Befund steht in Gegensatz zu publizierten Daten (25;36). Im Unterschied zu den genannten Studien wurden in der hier vorliegenden Berechnung die Kosten für die Isolierung von kolonisierten Patienten zusätzlich berücksichtigt. Diese Kosten machen einen erheblichen Teil der Kosten aus, und verändern deswegen das Verhältnis von aufgewendeten und eingesparten Kosten. Im Unterschied zur Kosteneffizienz belegen die Zahlen jedoch einen deutlichen Effekt der Handlungsmodelle 3 und 4 in Bezug auf die intangiblen Kosten „neue MRSA-Patienten“, „zusätzliche Todesfälle durch MRSA-Infektion“, sowie der „Zunahme von MRSA“. Dieser positive Effekt wird durch relativ geringfügige Mehrausgaben erreicht. Insbesondere Modell 4 scheint geeignet, langfristig die Rate von MRSA zu reduzieren. Zu diesem Ergebnis kommen auch eine Arbeitsgruppe um Marc Bonten (3). Aus infektiologisch-hygienisch-epidemiologischer Sicht erscheint die Durchführung von Screening bei Risikopatienten deswegen höchst sinnvoll.

Der Vorteil des verwendeten Rechenmodells besteht darin, dass andere medizinische Einrichtungen entsprechenden Abschätzungen, auch unter Verwendung von lokalen Daten, durchführen können. Der Umfang von Screening sollte für die jeweilige medizinische Einrichtung individuell festgelegt werden. Weitere klinische Studien zur Indikation und Methode von MRSA-Screening sind dringlich.

*Danksagung*

Wir danken Herrn Prof. Dr. P. Oberender, Universität Bayreuth, für die kritische Diskussion und Anregungen.

*Korrespondenzadresse*

PD Dr. med. Hans-Jörg Linde  
 Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene  
 Universität Regensburg  
 Franz-Josef-Strauss-Allee 11  
 93049 Regensburg  
 Tel.: 0941 944-6414  
 Fax: 0941 944-6402  
 E-Mail: Hans-Joerg.Linde@klinik.uni-regensburg.de

**LITERATURVERZEICHNIS**

1. Becker K. Diagnostik von Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA)-Stämmen Teil 1. Taxonomische Einordnung, Anzucht und Differenzierung von *Staphylococcus aureus*. *Mikrobiologie* 2004;14:7-21.
2. Blot SI, Vandewoude KH, Hoste EA, Colardyn FA. Outcome and attributable mortality in critically ill patients with bacteremia involving methicillin-susceptible and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Arch. Intern. Med.* 2002;162:2229-2235.
3. Bootsma MC, Diekmann O, Bonten MJ. Controlling methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*: Quantifying the effects of interventions and rapid diagnostic testing. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2006;103:5620-5625.
4. Chang FY, MacDonald BB, Peacock JE, Jr., Musher DM, Triplett P, Mylotte JM, O'Donnell A, Wagener MM, Yu VL. A prospective multicenter study of *Staphylococcus aureus* bacteremia: incidence of endocarditis, risk factors for mortality, and clinical impact of methicillin resistance. *Medicine (Baltimore)* 2003;82:322-332.
5. Chang S, Sievert DM, Hageman JC, Boulton ML, Tenover FC, Downes FP, Shah S, Rudrik JT, Pupp GR, Brown WJ, Cardo D, Fridkin SK. Infection with vancomycin-resistant *Staphylococcus aureus* containing the vanA resistance gene. *N. Engl. J. Med.* 2003;348:1342-1347.
6. Cole AM, Tahk S, Oren A, Yoshioka D, Kim YH, Park A, Ganz T. Determinants of *Staphylococcus aureus* nasal carriage. *Clin. Diagn. Lab. Immunol.* 2001;8:1064-1069.
7. Cosgrove SE, Sakoulas G, Perencevich EN, Schwaber MJ, Karchmer AW, Carmeli Y. Comparison of mortality associated with methicillin-resistant and methicillin-susceptible *Staphylococcus aureus* bacteremia: a meta-analysis. *Clin. Infect. Dis.* 2003;36:53-59.
8. Daschner FD. MRSA - Die Katastrophe droht. *Klinikarzt* 2004;33:7.
9. Engemann JJ, Carmeli Y, Cosgrove SE, Fowler VG, Bronstein MZ, Trivette SL, Briggs JP, Sexton DJ, Kaye KS. Adverse clinical and economic outcomes attributable to methicillin resistance among patients with *Staphylococcus aureus* surgical site infection. *Clin. Infect. Dis.* 2003;36:592-598.
10. Forrester M, Comm B, Arts B, Anthony N, Pettitt AN. Use of stochastic epidemic modeling to quantify transmission rates of colonization with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in an intensive care unit. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* 2005;26:598-606.
11. Foster KR, Grundmann H. Do we need to put society first? The potential for tragedy in antimicrobial resistance. *PLoS. Med.* 2006;3:e29.
12. Gastmeier P, Witte W. Zum Management des MRSA-Screenings. *Epidemiologisches Bulletin* 42. 2005;385-389.
13. Girou E, Azar J, Wolkenstein P, Cizeau F, Brun-Buisson C, Roujeau JC. Comparison of systematic versus selective screening for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* carriage in a high-risk dermatology ward. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* 2000;21:583-587.
14. Hagen RM, Seegmuller I, Navai J, Kapstein I, Lehn N, Miethke T. Development of a real-time PCR assay for rapid identification of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* from clinical samples. *Int. J. Med. Microbiol.* 2005;295:77-86.
15. Harbarth S, Rutschmann O, Sudre P, Pittet D. Impact of methicillin resistance on the outcome of patients with bacteremia caused by *Staphylococcus aureus*. *Arch. Intern. Med.* 1998;158:182-189.
16. Heuck D, Witte W. Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus* (MRSA) in deutschen Alten- und Pflegeheimen - zur Situation. *Epidemiologisches Bulletin* 19; 2003;145-148.
17. Höpgen ME, Dreesmann J, Bräulke C, Heuck D, Witte W. MRSA-Besiedlung in einem Alten- und Pflegeheim: Risikofaktoren und Prävalenz. *Hygiene und Medizin* 2001;26:225-230.
18. Jernigan JA, Titus MG, Groschel DH, Getchell-White S, Farr BM. Effectiveness of contact isolation during a hospital outbreak of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Am. J. Epidemiol.* 1996;143:496-504.
19. Karchmer TB, Durbin LJ, Simonton BM, Farr BM. Cost-effectiveness of active surveillance cultures and contact/droplet precautions for control of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *J. Hosp. Infect.* 2002;51:126-132.

**Prof. Dr. rer. pol., Dipl.-Kfm. Gerald Mißbeck**

Tel.: 0941 943-1398

Fax: 0941 943-1425

gerald.misslbeck@bwl.fh-regensburg.de

20. Kipp F, Friedrich AW, Becker K, von Eiff C. Bedrohliche Zunahme Methicillin-resistenter *Staphylococcus-aureus*-Stämme. *Dtsch Arztebl* 2004;101:2045-2050.
21. Lehn N, Linde H, Schneider-Brachert W, Kaiser P, Reischl U. MRSA screening on admission by real time PCR directly from the swab within the same day. 2004. 14th Congress of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases, Prag.
22. Linde H, Wagenlehner F, Strommenger B, Drubel I, Tanzer J, Reischl U, Raab U, Holler C, Naber KG, Witte W, Hanses F, Salzberger B, Lehn N. Healthcare-associated outbreaks and community-acquired infections due to MRSA carrying the Panton-Valentine leucocidin gene in southeastern Germany. *Eur.J.Clin.Microbiol.Infect. Dis.* 2005;24:419-422.
23. Moran GJ, Krishnadasan A, Gorwitz RJ, Fosheim GE, McDougal LK, Carey RB, Talan DA. Methicillin-resistant *S. aureus* infections among patients in the emergency department. *N.Engl.J.Med.* 2006;355:666-674.
24. NCCLS. Performance standards for antimicrobial disk susceptibility testing. Ninth informational supplement M100-S9. National Committee for Clinical Laboratory Standards, Villanova, Pa. 1999.
25. Papia G, Louie M, Tralla A, Johnson C, Collins V, Simor AE. Screening high-risk patients for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* on admission to the hospital: is it cost effective? *Infect.Control Hosp.Epidemiol.* 1999;20:473-477.
26. Peeters MJ, Sarria JC. Clinical characteristics of linezolid-resistant *Staphylococcus aureus* infections. *Am.J.Med. Sci.* 2005;330:102-104.
27. Raboud J, Saskin R, Simor A, Loeb M, Green K, Low DE, McGeer A. Modeling transmission of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* among patients admitted to a hospital. *Infect.Control Hosp.Epidemiol.* 2005;26:607-615.
28. Reischl U, Linde HJ, Metz M, Leppmeier B, Lehn N. Rapid identification of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and simultaneous species confirmation using real-time fluorescence PCR. *Journal of Clinical Microbiology* 2000;38:2429-2433.
29. Rubin RJ, Harrington CA, Poon A, Dietrich K, Greene JA, Moiduddin A. The economic impact of *Staphylococcus aureus* infection in New York City hospitals. *Emerg. Infect.Dis.* 1999;5:9-17.
30. Salgado CD, Farr BM, Calfee DP. Community-acquired methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*: a meta-analysis of prevalence and risk factors. *Clin.Infect.Dis.* 2003;36:131-139.
31. Tenover FC, Weigel LM, Appelbaum PC, McDougal LK, Chaitram J, McAllister S, Clark N, Killgore G, O'Hara CM, Jevitt L, Patel JB, Bozdogan B. Vancomycin-resistant *Staphylococcus aureus* isolate from a patient in Pennsylvania. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* 2004;48:275-280.
32. Tiemersma EW, Bronzwaer SLAM, Lyytikäinen O, Degener JE, Schrijnemakers P, Bruinsma N, Monen J, Witte W, Grundmann H, European Antimicrobial Resistance Surveillance System Participants. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in Europe, 1999-2002. *Emerg.Infect Dis* 2004;10:1627-1634.
33. Vriens M, Blok H, Fluit A, Troelstra A, Van Der WC, Verhoef J. Costs Associated with a Strict Policy to Eradicate Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* in a Dutch University Medical Center: A 10-Year Survey. *Eur.J Clin. Microbiol.Infect Dis* 2002;21:782-786.
34. Weigel LM, Clewell DB, Gill SR, Clark NC, McDougal LK, Flannagan SE, Kolonay JF, Shetty J, Killgore GE, Tenover FC. Genetic analysis of a high-level vancomycin-resistant isolate of *Staphylococcus aureus*. *Science* 2003;302:1569-1571.
35. Wernitz MH, Keck S, Swidsinski S, Schulz S, Veit SK. Cost analysis of a hospital-wide selective screening programme for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) carriers in the context of diagnosis related groups (DRG) payment. *Clin.Microbiol.Infect.* 2005;11:466-471.
36. Wernitz MH, Swidsinski S, Weist K, Sohr D, Witte W, Franke KP, Roloff D, Ruden H, Veit SK. Effectiveness of a hospital-wide selective screening programme for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) carriers at hospital admission to prevent hospital-acquired MRSA infections. *Clin.Microbiol.Infect.* 2005;11:457-465.

## DIE VIA-ARRAY-TESTCHIP-SERIE: STATUS UND PERSPEKTIVEN

### 1. EINLEITUNG

Das Kooperationsprojekt von Infineon AG und Hochschule Regensburg zur gemeinsamen Entwicklung von Testchips zur Prozess- und Ausbeuteoptimierung kann mittlerweile auf eine siebenjährige Geschichte zurückblicken. Es wurden in dieser Zeit insgesamt sechs Testchips entwickelt, davon sind zur Zeit 5 in Einsatz, für den neuesten Testchip werden gerade die Masken erstellt.

### 2. GRUNDKONZEPT DER TESTCHIPS

Die vertikalen Verbindungen verschiedener leitender Ebenen auf integrierten Schaltungen stellen in der Fertigung eine besondere Herausforderung dar. Es liegt auf der Hand, dass es schwierig ist, Löcher mit Durchmessern von 0,4 Mikrometern und weniger sauber zu „bohren“, alle Rückstände daraus zu entfernen und sie sauber mit Metall zu füllen. Die metallische Verbindung von unterster Siliziumschicht und der darauf liegenden Metallebene (Metall 1) wird als „Kontaktloch“ bezeichnet, die Verbindung der darüber liegenden Metallschichten (Metall 1 - Metall 2 usw.) als „Via“.

Falls in einem Produkt wie z. B. in einem Mikrocontroller defekte Vias auftreten, ist es sehr zeitaufwändig, aus der Fehlfunktion auf den Ort des Defekts zu schließen, um seine Ursache genauer zu analysieren. Falls es sich um ein teilweise defektes Via handelt, äußert sich dieses möglicherweise überhaupt nicht im Endtest eines Produktchips, kann aber zu Frühausfällen führen.

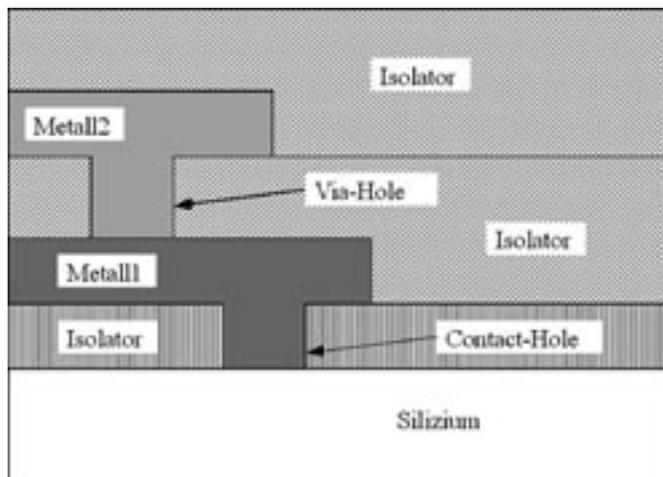


Abb. 1: Verbindungsebenen in integrierten Schaltungen

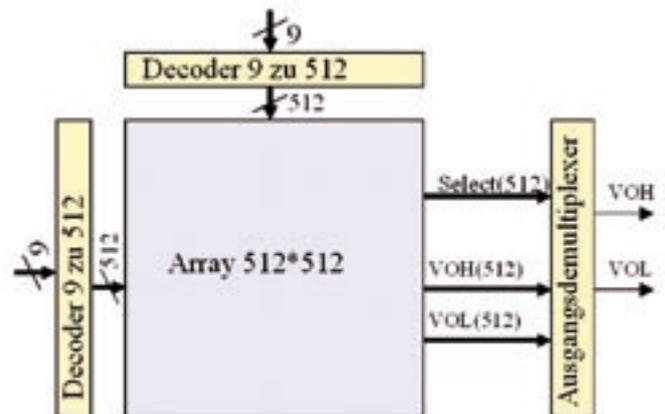


Abb. 2: Arraykonzept

Es wurde daher ein Konzept eines Testchips entwickelt, auf dem eine große Anzahl derartiger Vias in einfacher Weise adressiert und vermessen werden kann, so dass im Falle eines Defekts dieser einfach lokalisiert und untersucht werden kann. Zusätzlich ermöglicht die große Anzahl der Vias statistische Aussagen über Defektdichten, dies kann als laufende Prozesskontrolle ebenso verwendet werden wie als Instrument zur Bewertung von Prozessoptimierungen.

Aufgrund von Erfahrungen bei Infineon und statistischer Überlegungen wurde folgendes Konzept entwickelt (Abb. 2):

Es wird ein Array von 512\*512 Zellen realisiert. In jeder dieser Zellen kann ein Messobjekt (Via) mit dem Messstrom belastet werden, der Spannungsabfall an jedem einzelnen Via wird an die Ausgänge des Chips transferiert (VOH, VOL). Da jeweils nur ein einziges Via im Array bestromt wird, kann aus dem Versorgungsstrom des Arrays und dem Spannungsabfall der ohmsche Widerstand des angesteuerten Vias ermittelt werden. Die bisher gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass eine Widerstandsauflösung von 0,1 Ohm bei einem Messstrom im 100µA-Bereich reproduzierbar realisiert werden kann.

Für die Ansteuerung einer Zelle in Spalte und Reihe sind jeweils 9-Bit-Adressen nötig, die über 9:512-Decoder jeweils eine Spalten- bzw. Reihensteuerleitung aktivieren. Da für die direkte Eingabe der X- bzw. Y-Adressen jeweils neun Adressleitungen erforderlich wären, werden die Adressen seriell über ein 18-Bit-Schieberegister eingegeben, um mit weniger Anschlüssen auszukommen.

Zur Realisierung eines abgekürzten Prozessdurchlaufs und Einsparung von Maskenkosten wurde zusätzlich nur die Ver-

wendung von NMOS-Feldeffekttransistoren beschlossen. Für die Ansteuerlogik (Schieberegister und Decoder) bedeutet dies, dass keine vorhandenen CMOS-Zellen benutzt werden konnten, sondern dass diese in einer reinen NMOS-Enhancement-Logik komplett neu zu entwickeln waren. All diese Anforderungen führten zum Blockdiagramm von Abb. 3.

Da eine Logik auf der Basis von Enhancement-NOS-FET'S eine sehr unsymmetrische Schaltcharakteristik aufweist, wird das Schieberegister mit zwei nicht-überlappenden Taktphasen angesteuert, dies stellt die sicherste Methode zur Ansteuerung von Schieberegistern dar. Die Grundschaltung eines Inverters auf der Basis von N-Kanal-Enhancement-Transistoren und seine Übertragungskennlinie zeigt Abb. 4. Nachteilig bei dieser Schaltungstechnik ist, dass bei einem Low-Pegel am Ausgang ein permanenter Strom fließt. Die Dimensionierung muss daher so erfolgen, dass der Gesamtstrom der Chip-Peripherie die Messnadeln nicht überlastet.

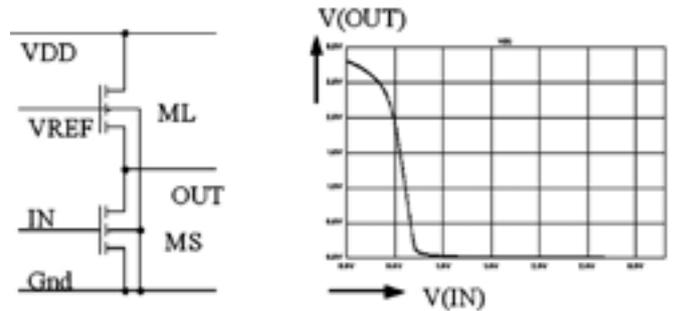


Abb. 4: Enhancement-NMOS-Inverter

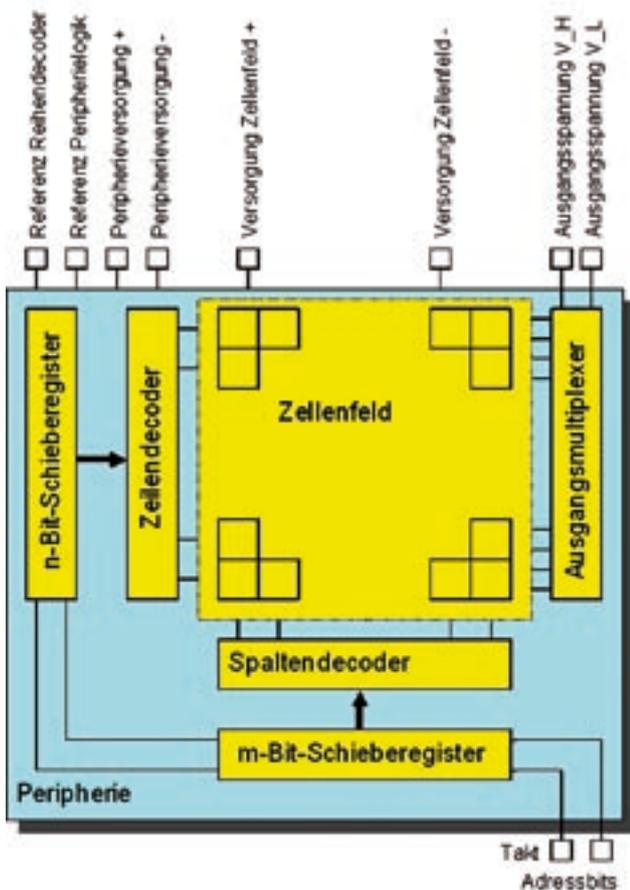


Abb. 3: Blockdiagramm Via-Array

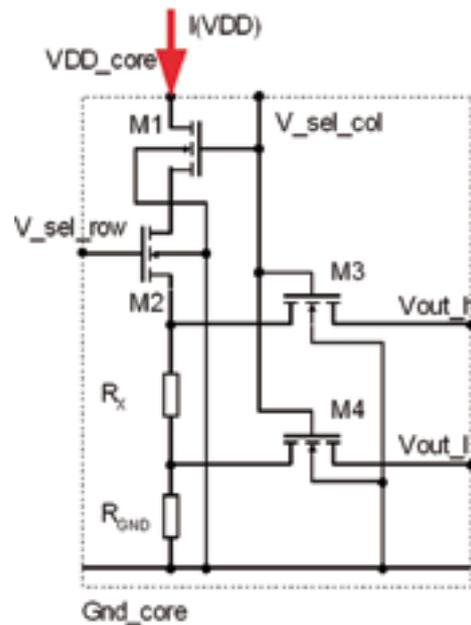


Abb. 5: Schaltung Array-Zelle

Die Schaltung einer einzigen Via-Zelle ist in Abb. 5 dargestellt. Das Messobjekt ( $R_x$ ) wird von den beiden Auswahltransistoren mit dem Messstrom beaufschlagt. Die Leitung  $V_{sel\_col}$  verbindet alle Spalten des Arrays, die Leitung  $V_{sel\_row}$  verbindet alle Reihen des Arrays. Wenn  $V_{sel\_col}$  und  $V_{sel\_row}$  High-Pegel aufweisen, dann leiten M1 und M2, und der zu messende Widerstand ergibt sich aus dem Spannungsabfall am Messobjekt ( $V_{outh} - V_{outl}$ ) und dem Messstrom. Dies stellt eine klassische Vierdrahtmessung (Kelvin Connection) dar. Da die Spannungen an  $R_x$  um mehr als eine Schwellspannung unterhalb von  $V_{sel\_col}$  liegen, ist kein p-FET zur Realisierung des Transmission-Gate

nötig. Ebenso spielt der Gnd-Zuleitungswiderstand keine Rolle. Die Via-Zellen werden zu einem Array verschaltet, zur Weiterleitung des Spannungsabfalls an den Chipausgang ist noch ein weiterer Analogdemultiplexer nötig, wie in Abb. 3 gezeigt.

**3. REALISIERTE TESTCHIPS**

**3.1 Via-Testchip 350nm**

Der Designstart für den ersten Testchip in 350nm-CMOS-Technologie war im Herbst 2002, erste Scheiben lagen Ende 2003 vor. Als Entwurfssoftware wurde das frei erhältlich Paket „LASI“ (Layout System for Individualists“ /1/ genutzt, das um zahlreiche, vom Autor programmierte Routinen zur Layoutautomatisierung und -Verifikation ergänzt wurde.

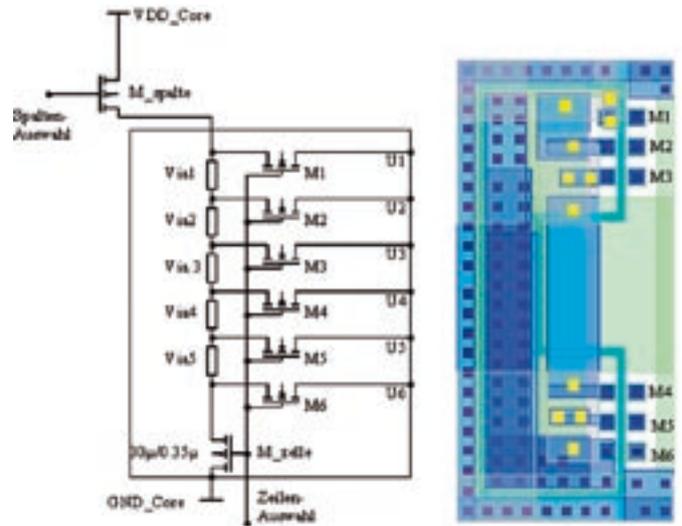
Das untersuchte Objekt auf diesem Chip ist die Verbindung der untersten beiden Metalllagen (Via1). Der Chip wurde in 40 verschiedenen Varianten realisiert, die verschiedene Via- und Metallgeometrien beinhalten, sowie bewusst eingebaute Design-Rule-Verstöße, um deren Auswirkung auf die Ausbeute untersuchen zu können. Auf einem Wafer befinden sich 2400 Chips, was zu 630 Millionen Testvias pro Wafer führt. Diese können einzeln mit einer Widerstandsaufösung von unter 0,1 Ohm gemessen werden.

Der erste Entwurf war sofort voll funktionsfähig, der Testchip wurde seit 2004 intensiv zur Fertigungsoptimierung und Zuverlässigkeitssteigerung im Rahmen des Projekts „Reliability Related Defect Densities (R2D2)“ genutzt.

**3.2 Kontaktloch- und Hochstromtestchip**

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem ersten Testchip wurden im Herbst 2004 neue, erweiterte Anforderungen an zwei neu zu entwickelnde Testchips definiert. Eine Variante sollte mit dem bewährten Konzept die Untersuchung der Kontaktlöcher realisieren, die andere durch einen stark erhöhten Maximalstrom Stress- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen ermöglichen. Als zusätzliche Anforderung sollte der Strom für Untersuchungen des Elektromigrationsverhaltens umpolbar sein. Da der höhere Strom größere Ansteuertransistoren benötigt, wird auf diesem Chip jeweils eine Kette von 5 Vias gleichzeitig gemessen. Die Schaltung einer Hochstrom-Via-Zelle zeigt Abb. 6.

Im März 2005 wurde ein Forschungs- und Entwicklungsvertrag zwischen Infineon Technologies und der FH Regensburg geschlossen, der die Bezahlung studentischer Hilfskräfte



**Abb. 6:** Hochstrom-Via-Zelle, Schaltung und Layout

ermöglichte. Aus diesen Arbeiten entstanden zwei Diplomarbeiten unter der Leitung des Autors (M. Royer /2/ und F. Schnegg /3/). Die Fertigstellung der Designs erfolgte Mitte 2005, erstes Silizium lag Anfang 2006 vor. Auch diese Chips wurden mit dem Designpaket „LASI“ realisiert, die Schaltungsverifikation erfolgte jedoch mit dem ebenfalls frei erhältlichen Paket „Micromagic“ /4/, das wesentlich kürzere Rechenzeiten aufweist. Beide Chips waren sofort voll funktionsfähig, sie werden seitdem intensiv zur Prozessoptimierung genutzt.

**3.3 Universaltestchip 130nm**

Im Januar 2006 ergab sich ein erster Kontakt mit der Business Unit Microcontroller und dem Standort Dresden. Es wurde daraufhin Projekt zur Entwicklung eines Testchips in 130nm-CMOS-Technologie gestartet, das innerhalb des AIM-Projekts „Automotive Excellence“ angesiedelt wurde. Das Projekt wurde in einem sehr engen Zeitrahmen realisiert, der Designabschluss erfolgte im Mai 2006. Die Chip-Peripherie wurde, aufbauend auf den vorhandenen Erfahrungen, an der FH Regensburg vom Autor realisiert, eine Vielzahl von Array-Zell-Varianten wurde in Dresden entwickelt. In Regensburg wurde vom Autor hierbei die Entwurfssoftware „Micromagic“ benutzt. Sie läuft unter den Betriebssystem Linux und hat sich als leistungsfähiger als die Windows-Software „LASI“ erwiesen. Auch hier waren zahlreiche Routinen zu Layoutautomatisierung zu erstellen,

was durch die Tatsache erleichtert wird, dass die Skriptsprache TCL/TK im Micromagic-Paket mit eingebunden ist. Das Zusammenspiel der Softwarepakete „Micromagic“ an der FH Regensburg und der kommerziellen „Cadence“-Tools bei Infineon verlief erstaunlich problemlos, als Datenschnittstelle wurde das verbreitete „GDS2“-Format verwendet.

Der 130nm-Testchip enthält 20 verschiedene Zellvarianten, mit deren Hilfe die unterschiedlichsten Verbindungsstrukturen der 6-Lagen-Kupfermetallisierung getestet werden können.

Im Juli 2006 konnten erste Siliziumscheiben gemessen werden, auch hier konnte die volle Funktionalität nachgewiesen werden. Der Testchip wurde im Herbst 2006 auf der Automobilmesse „Convergence“ der Öffentlichkeit vorgestellt, im Frühjahr 2007 auf der VDE-Tagung „Zuverlässigkeit und Entwurf“.

### 3.4 Testchip 250nm

Anfang 2007 erfolgte eine weitere Anfrage seitens der Business Unit Microcontroller (Dresden), das bewährte Via-Array-Konzept sollte auch für eine 250nm-CMOS-Technologie genutzt werden. Die Arbeiten wurden dann so aufgeteilt, dass nur die elektrische Dimensionierung und Simulation an der FH Regensburg erfolgte, das physikalische Layout und die Designverifikation wurden in Dresden durchgeführt. Letzteres ließ sich relativ einfach realisieren, da die Chip-Peripherie aus dem 350nm-Layout automatisch mit Hilfe eines Layout-Postprocessing-Programms (LAPO) generiert werden konnte. Der Design-Abschluss erfolgte im Herbst 2007, seit Januar 2008 wird der Testchip ebenfalls kontinuierlich im Process-Monitoring verwendet.

### 3.5 Testchip CMOS B7CA Smart Power

Im Wintersemester 2007/2008 konnte der Autor ein Praxisfreisemester durchführen, dies wurde selbstverständlich dazu genutzt, die Testchip-Methodik bei Infineon Technologies weiterzuentwickeln.

Als konkretes Projekt wurde ein Konzept entwickelt, ein Testchip zur qualitativen Absicherung eines Automotive-Sensors einzusetzen, der in einer Smart-Power-Technologie produziert wird. Diese Technologie ermöglicht verschiedenste Bauelemente wie Bipolar- und Feldeffekttransistoren in verschiedenen Spannungsfestigkeiten. Für den Testchip wurden nur die Standard-Low-Voltage-CMOS-Transistoren ausgenutzt. Der Testchip wird hier mit auf die Produkt-Wafer platziert und ermöglicht dadurch ein kontinuierliches Monitoring der Qualität im Via- und Kontaktloch-Bereich. Dieser Einsatz-

zweck bedingt, dass der Testchip die gleichen Dimensionen wie der produktive Chip aufweisen muss, ebenso muss die gleiche Padanordnung benutzt werden. Da der produktive Chip mit relativ wenigen externen Anschlüssen auskommen muss, wäre es nicht möglich, mit einer reinen NMOS-Enhancement-Logik zu arbeiten, da diese für die Referenzspannungen und die getrennten Versorgungen von Peripherie und Array zu viele Pads benötigen würde. Andererseits würden damit ohnehin keine Maskenkosten eingespart, weil der produktive Chip alle Maskenebenen benötigt. Es wurde daher erstmalig das Testchipkonzept in einer echten CMOS-Schaltungstechnik realisiert. In CMOS-Realisierung benötigt die Peripherie nur einen vernachlässigbaren Versorgungsstrom, so dass mit dem gleichen Anschluss die Spannungsversorgung des ganzen Chips und die Messung des Stroms am Messobjekt durchgeführt werden kann. Das Blockdiagramm des Testchips in echter CMOS-Realisierung zeigt Abb. 7.

Da während der Entwicklung des Testchips die Abmessungen des produktiven Chips noch nicht feststanden, musste ein flexibler Weg zur Realisierung des endgültigen Test-

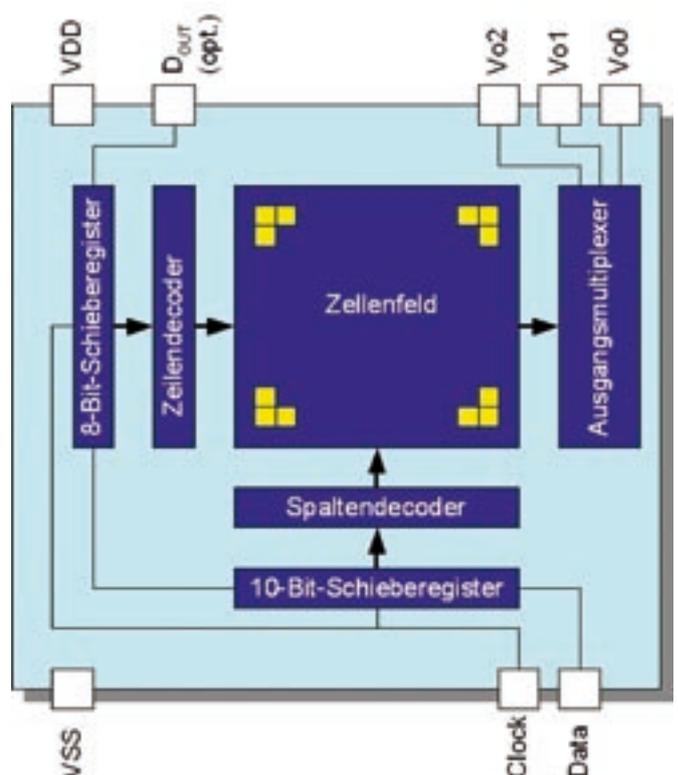


Abb. 7: Blockdiagramm des CMOS-Testchips

chip-Designs gefunden werden. Da die Entwicklung ohnehin bei Infineon stattfand, wurde mit der CAD-Umgebung von Infineon gearbeitet, die größtenteils auf Tools der Firma Cadence basiert. Die Tools von Cadence bieten zur Automatisierung von Designaufgaben die Skriptsprache „SKILL“ an. Es wurde daher ein Skill-Skript entwickelt, das auf der Basis vorgegebener Chipdimensionen die Anzahl der zu platzierenden Zellen berechnet und die Arrayzellen und die an die Zellanzahl angepasste Peripherie automatisch generiert. Die Layoutverifikation erfolgte mit geschätzten Chipabmessungen. Die endgültigen Padpositionen und die Chipabmessungen standen Ende März fest, der Tape Out erfolgte Anfang April.

#### 4. HALBAUTOMATISCHER MESSPLATZ

Für die Messungen der Testchip-Wafer werden produktive Testautomaten verwendet. Diese sind vor allem auf hohen Durchsatz optimiert. Es ist mit diesen Testautomaten aber relativ schwierig, detaillierte Messungen einzelner Chips durchzuführen, die ein unerwartetes Verhalten zeigen. Es wurde daher ein teilautomatisierter Messplatz entwickelt, der manuelle Messungen einzelner Chips ermöglicht. Zur Kontaktierung der Chips wird ein Automatik-Prober mit Nadelkarte benötigt, der die Positionierung der Nadelkarte auf dem Wafer entsprechend vorgegebener Koordinaten ermöglicht. Die Koordinaten stammen aus Messungen mit dem Testautomaten, die auffällige Verhaltensweisen zeigten. Das Eintakten der Adressen kann nicht manuell erfolgen, hier muss eine rechnerbasierte Lösung verwendet werden. Ebenso muss eine Vielzahl von Spannungsquellen und -Messgeräten gesteuert werden, was ebenfalls von einem Steuerrechner aus erfolgt. Das Messprogramm muss aber so flexibel sein, dass die manuelle Adresseingabe möglich ist, und dass es jederzeit im momentanen Zustand angehalten werden kann, um zusätzliche Messungen mit üblichen Messgeräten wie Multimeter und Oszilloskop zu ermöglichen.

Der Messplatz weist daher folgenden Aufbau auf: Die seriell einzutaktenden 18-Bit-Adressen werden von einem FPGA-Board generiert (Xilinx Spartan 3), das über die RS232-Schnittstelle mit dem Steuerrechner kommuniziert. Die Konfiguration des Boards erfolgt über ein eigens dafür entwickeltes VHDL-Design. Das Board überprüft zusätzlich, ob die Adressen, die zur Kontrolle vom Testchip wieder ausgeschoben werden, den eingeschobenen Werten entsprechen. Damit kann die Kommunikation zwischen FPGA-Board und Testchip verifiziert werden.

Als weitere Geräte werden zwei rechnersteuerbare Netzgeräte zur Erzeugung der Referenzspannungen und der Peripherieversorgung benötigt (Töllner 8702). Die Versorgung des Arrays wird mit einem Source-Meter realisiert (Keithley 2040), das gleichzeitig den Versorgungsstrom mit einer Auflösung im  $\mu\text{A}$ -Bereich messen kann. Die Spannungsabfälle an den Messobjekten werden mit Hilfe zweier Keithley-System-Multimeter gemessen. Die Geräte werden über den IEC-488-Bus gesteuert, der an eine Interfacekarte im Steuerrechner angeschlossen ist. Das Messprogramm ist in C geschrieben. Da die Steuerung der RS232-Schnittstelle über die Skriptsprache TCL/TK einfacher zu realisieren ist als in C, wird das FPGA-Board über TCL/TK angesprochen. Das C-Programm wird seinerseits über eine Pipeline vom TCL/TK-Skript gesteuert. Der Messplatz wurde erstmalig im April 2008 eingesetzt, er konnte einige Erklärungen für unerwartete Messergebnisse des Automatik-Testers liefern. Es handelt sich in der Regel um Kontaktierungsprobleme der Nadelkarte.

#### 5. ERGEBNISSE

Die fünf verschiedenen Testchip-Typen, die bisher im Einsatz sind, haben bereits viele wichtige Hinweise zur Prozess- und Ausbeuteoptimierung geliefert. Details dieser Optimierungsmaßnahmen unterliegen selbstverständlich der Geheimhaltung, dennoch sollen einige Resultate angesprochen werden: Es konnte die Ursache von Ausfällen geklärt werden, die durch zu hohe Kontaktwiderstände entstehen. Die Ursache liegt in einer hochohmigen Schicht im Kontakt, die anderweitig während des Herstellungsprozesse nicht detektiert werden könnte.

In Versuchen wurde künstlich eine hohe Dichte von Verunreinigungspartikeln auf dem Wafer erzeugt. Diese verhindern, dass in einem bestimmten Prozessschritt darunter liegender Photolack korrekt entfernt wird. Nach einem Reinigungsschritt ist der Effekt dieser Partikel im Elektronenmikroskop nicht mehr zu erkennen. Dennoch lässt sich der Ort dieser Partikel auf dem Testchip durch erhöhte Durchgangswiderstände an den Stellen der Verunreinigung nachträglich nachweisen. Es werden jetzt Prozessvariationen untersucht, die den Einfluss entsprechender Verunreinigungen auf den Durchgangswiderstand minimieren.

In Dresden werden die Herstellungsprozesse kontinuierlich mit Hilfe des 120nm-Testchips gemonitort. Seit Januar 2008 ist auch der 250nm-Testchip zu diesem Zweck in Einsatz.

**Prof. Dipl.-Ing. Dieter Kohlert**

Tel.: 0941 943-1113

Fax: 0941 943-1424

dieter.kohlert@e-technik.fh-regensburg.de

Im letzten Jahr wurden 340 Wafer des 120nm-Chips prozessiert, das entspricht etwa 1000 Milliarden Vias und Kontaktlöchern.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG, AUSBLICK

Im Zeitraum seit 2001 wurden in der Zusammenarbeit von Infineon Technologies und der FH Regensburg fünf Testchips entwickelt und gefertigt, ein weiteres ist in der Entwicklung abgeschlossen und wird derzeit in die Fertigung überführt. Alle Testchips waren ohne Redesign voll funktionsfähig. Die Zahl der gefertigten Chips hat die Millionengrenze bereits überschritten, zum Handling der anfallenden Datenmengen werden eigene Softwarehilfsmittel entwickelt. Die Testchipmethodik hat sich als wertvolles Hilfsmittel zur Prozessoptimierung und Zuverlässigkeitsoptimierung erwiesen. Gerade für Automotive-Kunden sind derartige Aktivitäten wichtige Kriterien zur Auswahl von Lieferanten. Die Zusammenarbeit läuft weiter, zur Zeit werden weitere Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Smart-Power-Technologien überprüft. Das Projekt ist völlig ohne staatliche Förderung ausgekommen, weshalb der hierfür nötige Aufwand entfallen und unmittelbar in die Lösung der technischen Probleme investiert werden konnte.

### LITERATUR:

- /1/ LASI7: Layoutsystem for Individualists; Dr. David E. Boyce, 68 Bergdorf Rd., Parish, NY 13131, USA  
<http://members.aol.com/lasicad/>
- /2/ M. Royer: „Testchip für Defektdichten- und Stress-tests an Vias“; Diplomarbeit, FH Regensburg, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Juli 2005
- /3/ F. Schneg: „Designflow- und Schaltungsentwicklung für Testchips“; Diplomarbeit, FH Regensburg, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Juli 2005
- /4/ <http://www.micromagic.com>

R. STEINER, G.J. MONKMAN

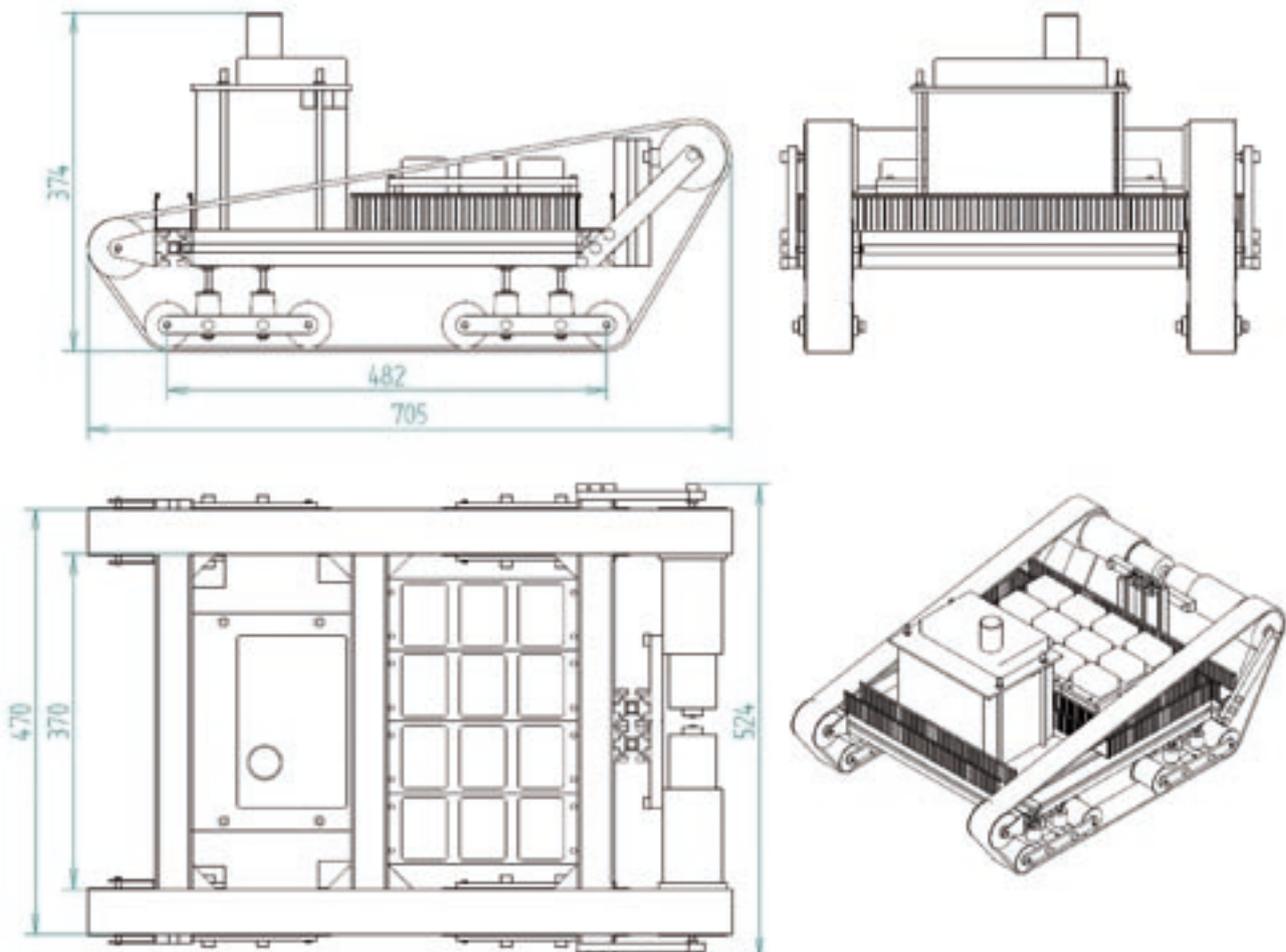
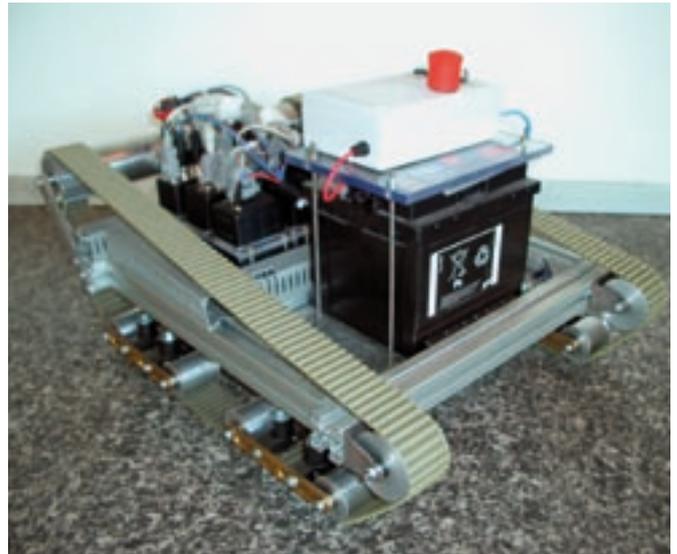
## KONZIPIERUNG UND ENTWICKLUNG EINES MOBILEN ROBOTERS

### 1. ABSTRACT

Die Mechatronics Research Unit (MRU) möchte ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der autonomen mobilen Roboter (AMR) ausbauen. Es sollen Sensor, Aktor und Regelungssysteme im Verbund getestet und evaluiert werden. Im Rahmen einer Diplomarbeit soll eine modular erweiterbare AMR-Plattform konzipiert und entwickelt werden (Abb. 1, 2).

### 2. STAND DER TECHNIK

Derzeitige käufliche Robotersysteme wie der Pioneer 3 AT sind zur Implementierung des klassischen funktionalen AMR-Kontrollansatzes [Nehmzow 2002] geeignet. Bei dem funktionalen Ansatz kann die Verhaltensregelung in vier Ebenen unterteilt werden:



- Wahrnehmung (Sensordatenauswertung)
- Modellierung (Abbildung der Außenwelt in das interne Weltmodell)
- Planung (Planung der Route)
- Ausführung (Steuerung der Aktoren)

Die Routenplanung kann in drei typische Schritte geteilt werden:

- Planer (Routenberechnung, Planung der einzelnen Wegpunkte im bekannten Weltmodell)
- Navigator (Errechnen der Fahrbefehle zu den Wegpunkten)
- Pilot (umsetzen der Fahrbefehle, Steuerung der Aktoren)

Zukunftsweisende AMR-Systeme [Thurn, et al. 2006] verteilen die Aufgaben nach dem Ansatz der Funktionalen Partitionierung. Hierbei läuft die Verhaltensregelung in mehreren parallelen, miteinander verknüpften Prozessen ab.

Beispielsweise kann jedem Sensorsignal ein Wahrnehmungs- und Modellbildungsprozess zugeordnet werden. Ein Planungsprozess errechnet anhand der verschiedenen, unterschiedlich stark gewichteten, Weltmodelle die auszuführenden Aktionen.

Jedem Aktor ist ein Pilotprozess zugewiesen. Mit den auszuführenden Aktionen generiert der Pilot unter Rückführung relevanter Sensordaten die Stellwerte seines korrespondierenden Aktors.

### 3. ANFORDERUNGEN AN DEN MRU-AMR

Um den dem Bedürfnissen der funktionalen Partitionierung gerecht zu werden, müssen für den MRU-AMR folgende grundlegende Anforderungen erfüllt sein:

- Das System soll die modulare Kombination verschiedener Sensoren und Aktoren ermöglichen.
- Die Elektronik soll nach Ihrer Funktion getrennt in Modulboxen integriert werden.
- Das System soll aus mehreren frei skalierbaren digitalen Signalcontrollern (DSC) bestehen.
- Die DSC sollen über ein Feldbussystem miteinander verbunden sein.
- Ein PC soll über WLAN & RS232 an das AMR angebunden werden.

### 4. KONZEPT

Der AMR ist in Modulgruppen, bestehend aus einzelnen Modulen unterteilt.

Die Software ist auf mehrere Controllermodule (dsPIC30F4012) verteilt. Die Controllermodule sind über CAN-Bus miteinander vernetzt.

Die Kontrollstruktur kann sich also auf mehrere Controllermodule verteilen. Ein PC kann in das System über das WLAN Modul der Firma Avisaro oder Rs232 eingebunden werden. Aktuell dient er zur Steuerung der AMR-Bewegung und zur Ausgabe der AMR-Daten.

Der aktuelle Stand der AMR-Hardware beinhaltet eine Modulgruppe zur Überwachung des AMR und eine Modulgruppe zur Motorregelung (Abb. 3).

Die Modulgruppe Sicherheit soll einen grundlegenden Schutz des AMR im Fehlerfall bieten. Hierzu stehen dem Controllermodul folgende Sensoren und Aktoren zur Verfügung:

- Messung des Batteriestromes
- Messung der Batteriespannung
- Messung von vier externen Sensoren (optimiert für NTC-Temperaturwiderstände)
- Ansteuerung von zwei 12V Relais zum Abschalten der Antriebseinheit im Fehlerfall
- Ansteuerung von fünf weiteren Open Drain Ausgängen.

Die Modulgruppe Motorregelung soll die Motordrehzahl regeln und die Motoren überwachen. Ihr Funktionsumfang beinhaltet:

- Messung des Motorstromes
- Messung der Motorspannung
- Messung der Motordrehzahl
- Messung der zurückgelegten Strecke
- Ansteuerung des Motors (H-Brücke).

Als Ausgangspunkt für weitere Projekte steht ein generisches Programm zur Verfügung.

Es generiert die Systemzeit des Controllers, stellt das Datenprotokoll und die hierfür benötigten Datenstrukturen zur Verfügung. Das Datenprotokoll orientiert sich an Feldbussystemen. Es beinhaltet:

- Synchronisierung der Systemzeit
- Einzelne (Mess-)Werte können angefordert werden. Sie werden in Verbindung mit ihrer Entstehungszeit übertragen
- Einzelne Bits können gesetzt werden
- (Parameter-)Werte können übermittelt werden
- (Parameter-)Werte können mit einer zeitlichen Gültigkeit übermittelt werden
- Zum Debugging können Terminal-Nachrichten ausgegeben werden.

Die Nutzung der zeitlichen Gültigkeit für Parameter und der Timestamp jedes Messwertes erlauben die zeitliche Nachvollziehbarkeit der asynchronen Prozesse innerhalb einer verteilten Kontrollstruktur.

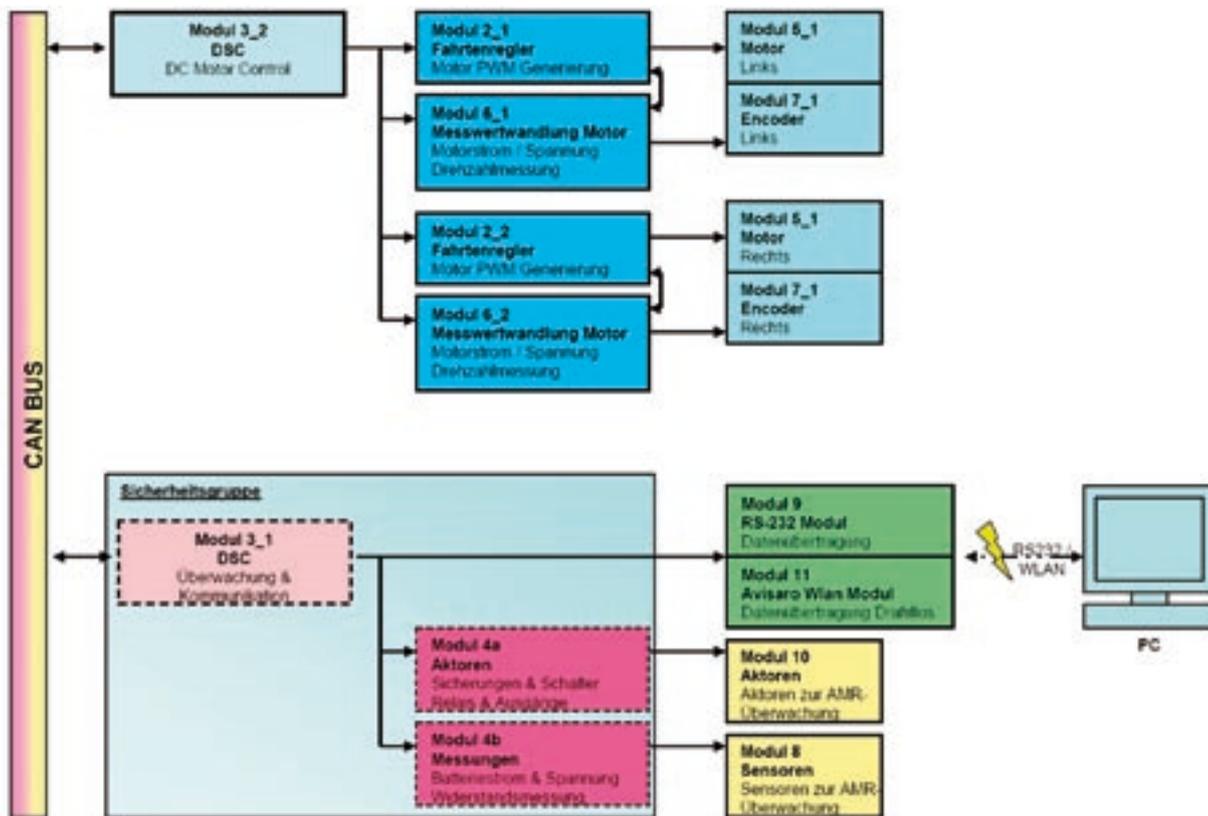
**Prof. Dr. Gareth Monkman**

Tel.: 0941 943-1108

Fax: 0941 943-1424

gareth.monkman@e-technik.fh-regensburg.de

50



## 5. AUSBLICK

Basierend auf dieser Diplomarbeit können weitere Modulgruppen entwickelt werden. Denkbar sind Modulgruppen für Sensoren, bestehend aus dem Sensor, dem Elektronikmodul zu Sensoransteuerung mit Messwertwandlung und dem Controllermodul mit Anbindung an den CAN-Bus zur Datenauswertung.

Die Spezifikation des Datenprotokolls ist erweiterbar. Soll beispielsweise in zukünftigen Anwendungen die Routenplanung und Navigation des AMR auf mehrere Controller verteilt werden, so kann das Protokoll hierhin erweitert werden.

Die Sensordatenauswertung breitbandiger Datenquellen, wie Kameras, kann auch von einem PC durchgeführt werden. Über Wlan können die vom PC generierten Daten von den Controllern abgerufen werden.

Es ist auch denkbar, dass einige Funktionen der Verhaltensregelung auf den PC ausgelagert werden. So können zu Anfang der Entwicklungsphase die Algorithmen am PC schnell optimiert werden. Im Anschluss kann das Programm auf ein Controllermodul portiert werden.

Ein erstes Projekt befasst sich mit der Entwicklung eines Reinigungs-AMR für Spezialaufgaben. Dieses Projekt ist als Kooperation deutscher, englischer und schweizer Partner angedacht. Ein Antrag auf Förderung durch das siebte EU-Forschungsrahmenprogramm wurde eingereicht.

## QUELLENVERZEICHNIS

[Thrun, et. al., 2006]

Sebastian Thrun, et. al

Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge

Journal of Field Robotics – 2006 DOI 10.1002/rob

<http://robots.stanford.edu/papers/thrun.stanley05.pdf>

[Nehmzow, 2002]

Ulrich Nehmzow,

Mobile Robotik,

Springer-Verlag, 2002



Erfolg beginnt bei Nanometern.

MICRO-EPSILON ist bekannt als innovatives Unternehmen für das Messen geometrischer Größen, Weg- und Positionssensoren, Komplettsysteme, Software für das visuelle Programmieren und Bildverarbeitungs-Systeme bilden die vier Säulen der Produktpalette. Renommierete Kunden weltweit verlassen sich auf die wegweisenden Lösungen von MICRO-EPSILON.

Sensoren



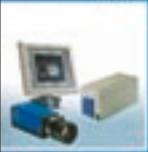
Systeme



Software



Lösungen



MICRO-EPSILON Messtechnik GmbH & Co KG

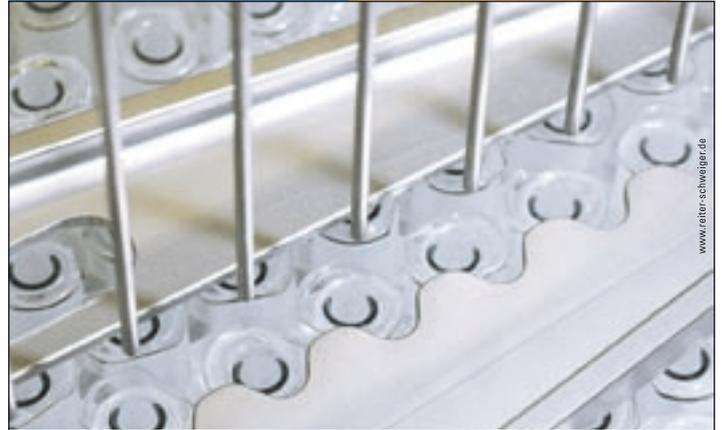
Königbacher Strasse 15 · 94496 Ortenburg

Telefon + 49/8542/168-0 · Fax + 49/8542/168 90

info@micro-epsilon.de [www.micro-epsilon.de](http://www.micro-epsilon.de)

Technologien für mehr Gesundheit

Technologien für mehr Schönheit



## Innovation = Fortschritt!

Wer nur einseitig denkt, kann nie doppelt zu guten Lösungen kommen. Für uns ist dies ein klares Prinzip. Zum einen, was unsere Wege zu perfekten, kundenorientierten technischen Lösungen angeht. Zum anderen, was die Kompetenz in zwei sehr innovativen Branchen betrifft. **Sie sind Ingenieur oder Techniker.** Verstehen den Beruf als Berufung. Suchen keinen kurzfristigen Job, sondern langfristige Perspektiven. Bringen Motivation und Qualifikation mit ein.

**Helfen Sie uns, den Fortschritt weiter voranzutreiben und arbeiten Sie künftig mit uns in unserem Werk in Crailsheim zusammen!**

### **Ingenieure (m/w), Techniker (m/w)**

für moderne Hightech-Verpackungsanlagen für die pharmazeutische und kosmetische Industrie.

#### **Ihr Profil:**

##### **Konstruktion**

- abgeschlossenes Maschinenbaustudium (Schwerpunkt Konstruktion)
- Gute CAD-Kenntnisse
- Berufserfahrung als Konstrukteur
- Team- und Kommunikationsfähigkeit

##### **Vertrieb**

- Erfahrung in der Projektarbeit, insbesondere vertriebliche Aufgaben
- Verhandlungssicheres Englisch
- Berufserfahrung im Verkauf von Sondermaschinen sind von Vorteil

Wir zählen zu den weltweit führenden Spezialisten in der Entwicklung von Spezial-Maschinen für die Pharma- und Kosmetikindustrie. Mit über 500 Mitarbeitern im Stammwerk Crailsheim und Schnelldorf – seit 27 Jahren. **Sympathisch. Sozial. Sicher.** Dies sind die häufigsten Attribute, mit denen unsere Mitarbeiter ihren Arbeitsplatz beschreiben. Beschreiben Sie Ihren demnächst ebenso.

#### **Lassen Sie unsere Ideen zur Realität werden!**

Ihre Bewerbung richten Sie bitte an unsere Personalabteilung.

#### **Wir vergeben laufend interessante Diplomarbeiten!**



**groninger Pharma · groninger & co. gmbh** · Hofäckerstr. 9 · 74564 Crailsheim GERMANY · Tel.: +49 (0)7951/495-0 · e-mail: office@groninger.de

**groninger Kosmetik · groninger GmbH & Co. KG** · Birkenbergstr. 1 · 91625 Schnelldorf GERMANY · Tel.: +49 (0)7950/800-0 · e-mail: office@groninger.de

**groninger USA L.L.C.** · 2520 Whitehall Park Drive · Suite 800 · Charlotte NC 28273 USA · Tel.: +1(704)295-9000 · info@groningerusa.com

## ARCHITEKTURBESCHREIBUNGSSPRACHE (ADL) FÜR SOFTWARE-INTENSIVE AUTOMOTIVE SYSTEME

### ARCHITEKTURMODELLIERUNG: VERGLEICH VON EAST ADL UND SAE AADL

Die wachsenden Anforderungen an die Entwurfsmethoden eingebetteter Systeme im Fahrzeug resultieren durch die steigende Komplexität, wie es der rapide steigende Anteil an Interaktionen zwischen den einzelnen Subsystemen belegt. Die Beherrschung der Komplexität und des Funktionsumfangs zukünftiger software-intensiver Elektrik/Elektronik-Systeme wird durch Einsatz moderner Architekturbeschreibungssprachen erleichtert.

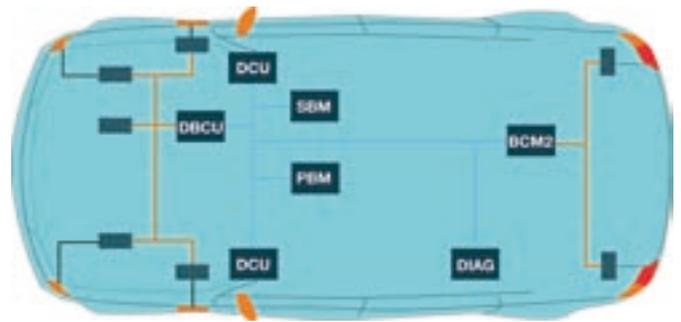
### EINFÜHRUNG

Mit einer Architekturbeschreibungssprache (ADL) ist die Beschreibung der Funktionalität software-intensiver Systeme auf verschiedenen Abstraktionsebenen möglich. Dies beginnt bei den Anforderungen und für den Benutzer wahrnehmbarer Funktionen und reicht bis hinab in die Implementierungsebene. Der Einsatz einer ADL ergänzt die Modellierung mit dem Industriestandard UML. Die Modellierung mit einer ADL ermöglicht die virtuelle Integration eines Systems und dabei die Bestimmung seiner Eigenschaften bevor die Implementierung erfolgt ist. Oft existieren hierfür Simulationswerkzeuge. Dies erhöht die Effizienz der Softwareentwicklung.

Im Rahmen einer Studie wurden die zwei Architekturbeschreibungssprachen EAST ADL und SAE AADL verglichen.

Hauptziel des Projektes EAST-EEA ist die Schaffung eines europaweit akzeptierten Standards zur Architekturmodellierung von software-intensiven Systemen im Automobil. Die Sprache EAST ADL wurde 2004 vorgestellt. Im gleichen Jahr wurde die Architecture Analysis & Design Language (AADL) unter Federführung der International Society of Automotive Engineers (SAE) als SAE AADL standardisiert und veröffentlicht.

Im Zuge der Modellierung des Fallbeispiels Blinkersystem im Automobil mit EAST ADL und SAE AADL wurden Kriterien zum Vergleich der beiden Sprachen gesammelt. Zusätzlich erfolgt eine Einordnung des AUTOSAR Metamodells.



**Bild 1:** System Blinker – Das System/Die Funktion Blinker ist auf mehrere Steuergeräte im Fahrzeug verteilt, welche über CAN und mehrere LIN Busse miteinander verbunden sind. Die Fallstudie beinhaltet Variabilität – Seitenblinker im Kotflügel oder im Seitenspiegel – und auch Safety-Aspekte – Verfügbarkeit der Funktion bei Ausfall eines Steuergeräts.

### DER REFERENZFALL BLINKER

Um die Mächtigkeit der beiden Architekturbeschreibungssprachen so objektiv wie möglich vergleichen zu können, wurde ein fiktives Fallbeispiel konstruiert, auf das beide Sprachen angewendet wurde: das Blinkersystem. Das Fallbeispiel wurde in solcher Weise konstruiert, dass sich ein hoher Grad an Vernetzung von Fahrzeugfunktionen ergab und die Funktion Blinker auf mehrere Steuergeräte im Fahrzeug verteilt ist (Bild 1). Primäres Ziel dieser Fallstudie war es, Aspekte zu definieren, anhand derer die Anwendung beider Sprachen untersucht werden konnten. Das Beispiel beinhaltet nicht nur funktionale Aspekte, zum Beispiel Richtungs-, Warn- und Fahrzeugzugangsberechtigungsblinken, sondern auch nicht funktionale Aspekte wie Variabilität, Safety, Diagnose und die Berücksichtigung von verschiedenen Entwicklungsszenarien (Neu- und Weiterentwicklung, Integration von existierenden Komponenten, etc).

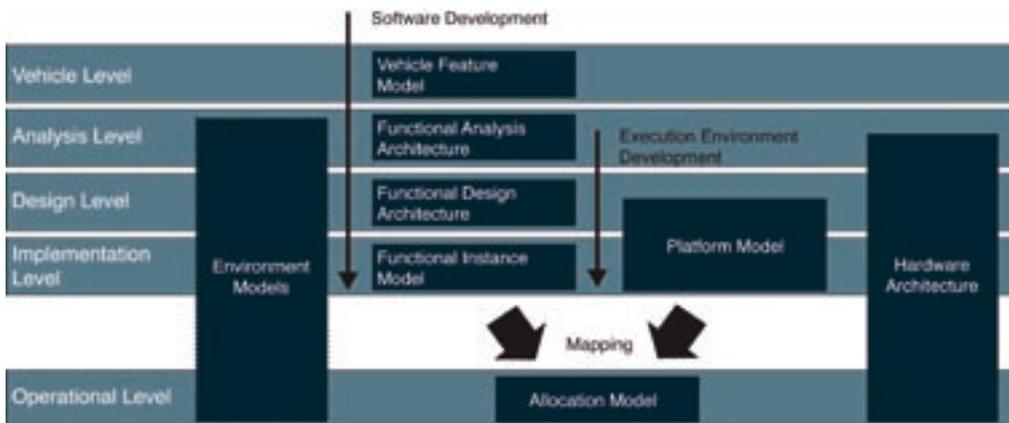
Begonnen wurde mit der Sammlung der Anforderungen an das System Blinker – welches ein Teil des Systems Außenlicht ist – und in weiteren Schritten wurden die Möglichkeiten der beiden Sprachen zur Modellierung des Systems von der Analyse bis zur Implementierung angewendet.

### ABSTRAKTIONSEBENEN GETRIEBENER ANSATZ

Die Fallstudie wurde zunächst mit der EAST modelliert. Die EAST-ADL ist eine auf UML 2 aufsetzenden Architekturbeschreibungssprache, die im Rahmen des ITEA Projektes

<sup>1</sup> Hochschule Regensburg

<sup>2</sup> Functional Safety, Continental Automotive GmbH



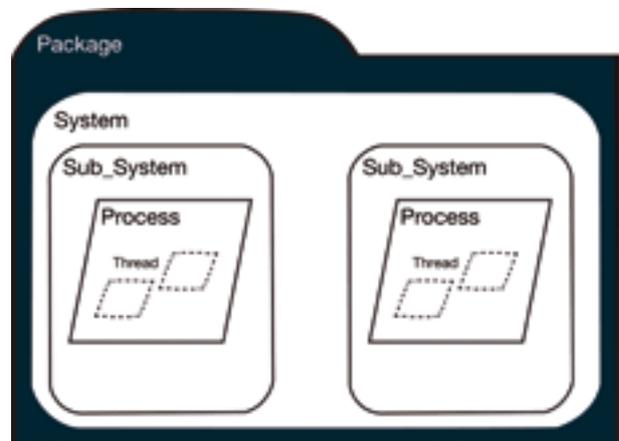
**Bild 2:** Die EAST ADL ist in sieben so genannte Artefakte, welche fünf Ebenen der Abstraktion repräsentieren, unterteilt. Es ist zu beachten, dass die Abstraktionsebenen rein konzeptionell sind und die Organisation der Modell Elemente entsprechend der Artefakte geschieht. Artefakte können sich über mehr als nur eine Ebene erstrecken.

EAST EEA – Embedded Electronic Architecture – von europäischen Automobilherstellern und Zulieferern entwickelt wurde. Das Hauptziel der EAST ADL ist es, eine Sprache für die eindeutige Beschreibung von software-intensiven, eingebetteten Elektronischen Systemen im Automobil zu bieten und das Erstellen von Modellen, zur Unterstützung von Design, Analyse oder der Darstellung von Systemverhalten, zu ermöglichen. Die Modellierung von Hardware und Software wird dabei strikt getrennt und erlaubt ein Einfaches portieren der Software auf unterschiedliche Hardware. Um dies zu erreichen und alle Schritte eines Entwicklungsprozesses unterstützen zu können, gibt die EAST-ADL fünf Ebenen der Abstraktion vor (Bild 2). Durch dieses Konzept können Systeme auf verschiedenen Abstraktionsebenen, von sehr abstrakten Benutzeranforderungen bis hin zu Details wie der zur Zuordnung von einzelnen Tasks zu einer bestimmten CPU, beschrieben werden.

Als Resultat entsteht auf jeder der fünf Ebenen eine Repräsentation des zu entwickelnden Systems mit einem jeweils anderen Detaillierungsgrad. So ist zum Beispiel die Topologie der Hardware (Hardware Architecture) für einen System Ingenieur, der sich mit der wesentlich abstrakteren Analyse der Logik des Blinkersystems (Functional Analysis Architecture) befasst, unwesentlich. Die EAST ADL schreibt keine Methode oder Prozess, wie ein System entwickelt oder wie die Informationen gesammelt werden, vor. Allerdings wird für jede Ebene aufgeführt welche Rollen in die jeweilige Entwicklung eingebunden und welche Informationen für diese Ebene relevant sind. Dies erlaubt eine flexible Anpassung an bestehende Entwicklungsprozesse im Unternehmen.

**AVIONIK ERPROBTER ANSATZ**

Die SAE-AADL wurde nach eigenen Angaben für die Spezifikation, Analyse und der automatischen Integration von Performancekritischen Computer Systemen, unter der Federführung der SAE, entworfen. Die, weitestgehend im Avionic Umfeld eingesetzte, SAE-AADL erlaubt es, Systemdesigns vor der Entwicklung zu analysieren und unterstützt einen modellbasierten und modellgetriebenen Entwicklungsansatz über den ganzen Systemlebenszyklus hinweg. Sie wurde mit dem Ziel entworfen eine Sprache zu definieren die sowohl die Softwarearchitektur als auch die Ausführungsplattform



**Bild 3:** Struktur von AADL. Die Sprache ist in Globale und Private Deklarationen unterteilt welche das Anlegen von Sub-Architekturen ermöglichen. Annex Libraries erlauben die Erweiterung des Kernsprachschatzes um weitere Standardelemente.

beschreiben kann. AADL wurde nicht für ein detailliertes Design oder die Implementierung von Komponenten entwickelt, sondern soll solche Sprachen vielmehr ergänzen. Mit der AADL wird beschrieben wie Komponenten aufgebaut sind und wie sie miteinander interagieren, um eine komplette Systemarchitektur zu bilden. Die SAE-AADL ist nicht, wie die EAST-ADL, in fest definierte Abstraktionsebenen unterteilt. Abstraktion wird vielmehr durch das Prinzip einer unvollständigen Architektur erreicht. Dies bedeutet, dass ein System nur bis zu dem aktuell benötigten Detaillierungsgrad modelliert wird. So ist es möglich Prototypen einzelner Komponenten zu erstellen und erste Analysen, wie z.B. End-to-End-Delay oder Flow-Latency-Analysen, durchzuführen. Die Architektur wird mit fortschreiten des Entwicklungszyklus weiter verfeinert und vervollständigt. Wie bei der EAST-ADL wird bei den Modellelementen zwischen Software und Hardware Typen unterschieden und durch Systemklassen können Hierarchien dargestellt werden. Allerdings geschieht die Modellierung von Soft- und Hardware in einem Modell. Eine gesonderte Sicht ist nicht vorgesehen. Die in Bild 3 zu sehende Struktur der Kernsprache kann, durch so genannte Annex-Bibliotheken, um weitere Elemente wie z.B. Safety- oder Security-Eigenschaften erweitert werden und erlaubt es dem Designer, die Sprache den Projekt- oder Domänenanforderungen anzupassen.

### **MÄCHTIGKEIT DER ADLS**

Anhand der Fallstudie und des darauf basierenden Vergleichs konnte festgestellt werden, dass die EAST-ADL und SAE-AADL unterschiedliche Schwerpunkte hinsichtlich ihrer Verwendung aufweisen. So bietet die SAE AADL z.B. einen deutlich allgemeineren Ansatz für die Verwendung in unterschiedlichen Domänen als die EAST ADL dies ermöglicht. Die EAST ADL wurde mit dem Ziel, eine Architekturbeschreibungssprache für die Automotive Domäne zu schaffen entwickelt, während die SAE AADL, wenn auch im Avionic-Umfeld entwickelt, keine domänenspezifische Ausrichtung verfolgt. Trotz oder gerade wegen dieser Unterschiedlichen Ansätze würden sich die beiden Sprachen gut ergänzen. So findet man bei einer Gegenüberstellung der Sprachen die Schwächen der einen Sprache, auf der Seite der Stärken der jeweils anderen (Bild 4). Es ist z.B. denkbar die EAST-ADL für die Modellierung und Validierung des Designs auf einer hohen Ebene der Abstraktion zu verwenden und die SAE AADL für die Modellierung und die Analyse auf einer Ebene, die deutlich näher an der Implementierung liegt, einzusetzen. Vor allem die ausgeprägte Unterstützung für Ana-

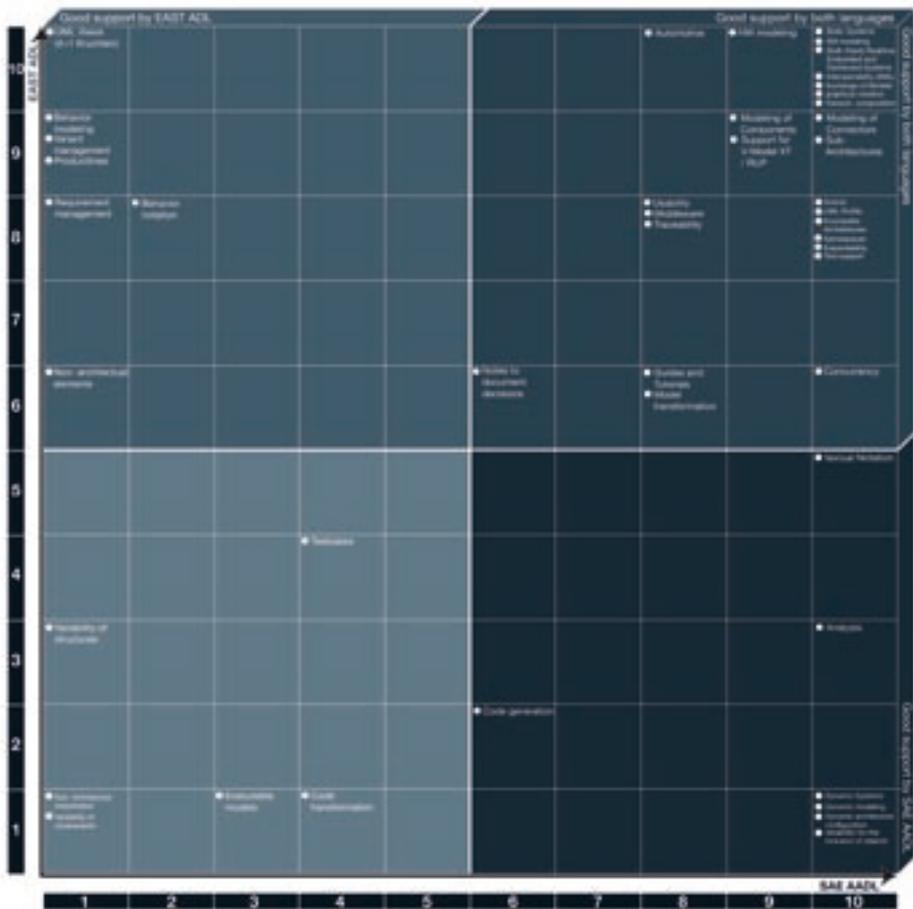
lysen und die gute Zusammenarbeit mit Werkzeugherstellern machen die SAE AADL in diesem Bereich so interessant. Denn obwohl EAST ADL theoretisch Konzepte zur Analyse bietet, gibt es aktuell keine Werkzeuge mit denen sich Analysen durchführen lassen könnten. Mit der SAE AADL können sowohl Analysen von teilweise definierten Architekturmustern (mit eingeschränkten Architektur Details) als auch vollwertige Analysen eines kompletten System Models durchgeführt werden. Dabei unterstützt die SAE AADL frühe Vorhersagen und Analysen kritischer Systemeigenschaften wie z.B. Performance, Scheduling des Taskgefüges und Reliability. Mit beiden Sprachen ist es möglich statische, softwareintensive eingebettete Systeme zu modellieren. Allerdings bietet nur die SAE AADL Möglichkeiten dynamische Systeme, welche Änderungen an der statischen Topologie während der Laufzeit zulassen, abzubilden. Dazu können Komponenten mit so genannten Modes erweitert werden, die alternative Konfigurationen einer Implementierung der Komponenten zu einem bestimmten Zeitpunkt repräsentieren. Dagegen bietet die EAST ADL eine spezielle Sicht zur Modellierung von Verhalten welche bei der SAE AADL nicht berücksichtigt wurde. So können Verhaltensbeschreibungen wie State-Charts- oder Use-Case-Diagramme in das EAST ADL Modell eingebunden werden. Bei EAST-ADL wurden zudem Ansätze für Variantenmanagement, die Unterstützung von Produktlinien und die Aufnahme von Anforderungen in das Modell berücksichtigt. Sowohl mit der EAST-ADL als auf mit der SAE AADL ist es möglich rein auf Textbasis als auch grafisch zu modellieren.

### **EINORDNUNG ZU EXISTIERENDEN STANDARDS**

Im Rahmen der Studie wurde der AUTOSAR-Standard und seine Einordnung zu den beiden Sprachen ebenfalls betrachtet. AUTOSAR vervollständigt das Bild in dreifacher Hinsicht. Erstens, die Sprachen EAST ADL und SAE AADL setzen eine Middleware- und Basis-Software-Infrastruktur voraus, welche durch den Standard AUTOSAR definiert wird. Zweitens, ein weiterer Zweck von AUTOSAR ist die Definition eines präzisen Austauschformats, um Modelle zwischen z.B. Fahrzeughersteller und Zulieferer auszutauschen. Und drittens, unterstützt AUTOSAR die Generierung und Integration von [Software-] Systemen auf Implementierungsebene. Somit stellt sich AUTOSAR als eine wertvolle Ergänzung der beiden Architekturbeschreibungssprachen dar.

Der Schwerpunkt von EAST ADL liegt in dem Bereich Vorgehensweise und Verständnis von Modellen über einen

**Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mottok**  
 Tel.: 0941 943-1120  
 Fax: 0941 943-1424  
 juergen.mottok@e-technik.fh-regensburg.de

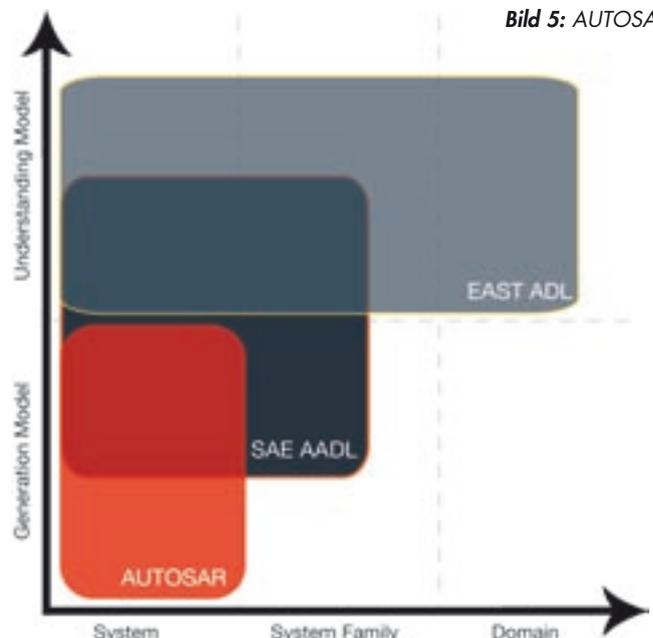


**Bild 4:** Einordnung von EAST ADL und SAE AADL zu AUTOSAR.

weiten Bereich von System, über Systemfamilien bis zu Domänen; die Schwerpunkte der SAE AADL liegen dagegen im Bereich dynamischer Systeme und Generierung von Systemen. Eine Integration der Konzepte beider Sprachen – sowie AUTOSAR – wäre ein weiterer Schritt zu einer sehr mächtigen Architekturbeschreibungssprache in der Automobilindustrie, welche die Bedürfnisse der Fahrzeughersteller sowie Zulieferer erfüllt.

Der vorliegende Artikel ist erschienen bei Hanser Automotive, München, 7-8 (2007) 43-47. Wir danken dem Carl Hanser Verlag für die Genehmigung des Abdrucks.

Diese Arbeit wurde unterstützt durch das FHprofUnd-Förderprojekt DynaS<sup>3</sup>, **Dynamische SW-Architekturen in Steuergeräten in Fahrzeugsystemen** unter Berücksichtigung von Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit, des Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 1752X07).



**Bild 5:** AUTOSAR

## FAHRERADAPTIVES ACC – ADAPTION VON ACC-WARNUNGEN AN DIE FAHRERAUFMERKSAMKEIT

Die seit Jahren rückläufigen Unfallzahlen im öffentlichen Straßenverkehr sollen nach Vorgaben der Europäischen Union weiter drastisch reduziert werden. Es wird angestrebt, die Zahl der Unfalltoten bis 2010 zu halbieren. Etwa 94% (Quelle: www.dvr.de) aller Unfälle im Straßenverkehr können auf menschliches Versagen, Fehleinschätzungen oder Fehlverhalten zurückgeführt werden. Zunehmend wird dies neben den passiven Sicherheitssystemen durch die Fahrerassistenzsysteme der aktiven Sicherheit ermöglicht. Dem Fahrzeugführer muss eine aktive Hilfe zur Seite gestellt werden, die in der Lage ist, Gefahren frühzeitig zu erkennen und den Fahrer zu warnen und/oder gegebenenfalls autonom mit sicheren Aktionen einzugreifen.

### 1 EINLEITUNG

Das Ziel des unfallvermeidenden Fahrens stellt ein Innovationsfeld für softwareintensive Systeme im Automobil dar. Übergreifende Systeme ermöglichen rechtzeitig Warnungen an den Fahrzeugführer durch ein geeignetes Mensch-Maschine-Interface zu geben. Zukünftig werden diese Systeme bei Auftreten von Gefahrensituationen einen aktiven Fahreingriff zur Abwendung von gefährlichen Fahrsituationen ermöglichen. Auf dem Weg zu solchen autonomen Sicherheitssystemen wurde ein abstandsgeregelter Tempomat (Adaptive Cruise Control, ACC) fahreradaptiv ausgelegt, indem eine Videokamera im Fahrzeuginnenraum die Kopfposition sowie die Kopforientierung und damit die Fahreraufmerksamkeit überwacht.

### 2 VIDEOBASIERTE FAHRERBEOBACHTUNG – DAS DRIVER-MONITORING-SYSTEM (DSS-R)

#### 2.1 Aufbau des Systems

Das Fahrerbeobachtungssystem DSS-R der australischen Firma Seeing Machines besteht aus einer im Infrarotbereich arbeitenden Videokamera mit IEEE1394-Schnittstelle, 2 IR-LED-Beleuchtungsmodulen und einem embedded Car PC (Pentium M 1,8 GHz, 1 GB RAM, 1 GB Flashspeicher) für die Bildverarbeitung.

Die verwendete Kamera hat als Bildaufnehmer einen monochromen CCD Sensor mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel. Die Aufnahmezeit beträgt 60 fps (Bilder pro Sekunde).



**Abbildung 1:** Aufbau des DSS-R Systems bestehend aus 1. zwei IR-Beleuchtungsmodulen (rot) und 2. einer IR-Kamera (gelb)

#### 2.2 Ermitteln der Kopfpose und Schätzung der Kopfbewegungen

Die Erkennung eines Gesichtes im Videobild, die anschließende Bestimmung der Kopforientierung und Kopfpositionierung sowie eine Nachverfolgung (Tracking) des sich bewegenden Kopfes kann in zwei Phasen zusammengefasst werden:

##### *Initialisierungsphase*

Basierend auf einer Modellvorstellung des Kopfes, wird das Gesicht dabei durch ein abstraktes, dreidimensionales Kopfmodell mit festen Bestandteilen wie Augen, Nase und Mund, welche eine feste Anordnung und Lage im Gesicht besitzen, beschrieben. Diese festen Vorgaben werden ergänzt durch variable Elemente, wie den exakten Abständen dieser einzelnen Bestandteile. Die Parametrierung dieser variablen Elemente und somit die Anpassung der Kopfmodellform erfolgt individuell auf die jeweils vorliegenden Bilddaten.

Nach bestmöglicher Anpassung des Kopfmodells an die vorliegenden Bilddaten erfolgt eine Bewertung des eingepassten Modells. Das Ergebnis der Bewertung wird über den Parameter Kopfsignalgüte als Prozentwert ausgegeben. Bei unzureichender Kopfsignalgüte erfolgt nach einer bestimmten Zeit automatisch eine Reinitialisierung. Sobald das Kopfmodell erfolgreich eingepasst wurde stehen Informationen zur Kopfposition und Kopforientierung zur Verfügung.

##### *Trackingphase*

In der Trackingphase erfolgt für jedes Frame eine erneute, stark reduzierte Bestimmung der Lage des Kopfmodells. Aufgrund der hohen Framerate von 60Hz und der Tatsa-

<sup>1</sup> Hochschule Regensburg

<sup>2</sup> Audi Electronics Venture GmbH

che, dass der Kopf sich nur mit einer bestimmten maximalen Geschwindigkeit bewegen und somit seine Lage im Kamerabild auch nur mit einer bestimmten Schrittweite verändern kann, ist der Suchbereich von einem Frame zum nächsten stark eingeschränkt. Weiterhin erfolgt auch eine Bewegungsschätzung, wo sich der Kopf im nächsten Frame wahrscheinlich befindet.

### 2.3 Ausgabeparameter

Als Ergebnis des Tracking liefert die Bildverarbeitungssoftware Daten zur Kopforientierung und Kopfpositionierung, die über eine Ethernet-Schnittstelle via UDP ausgegeben werden können. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verfügbaren Signale.

Signalbezeichnung	Einheit	Wertebereich
Kopfsignalgüte	Prozent	0 .. 100
Kopfposition X	Meter	-0,3 .. 0,3
Kopfposition Y	Meter	0,0 .. 0,6
Kopfposition Z	Meter	0,3 .. 1,1
Kopffrotation um X bzw. $\theta$	Rad	-0,78 .. 0,78
Kopffrotation um Y bzw. $\psi$	Rad	-0,78 .. 0,78
Kopffrotation um Z bzw. $\varphi$	Rad	-0,78 .. 0,78

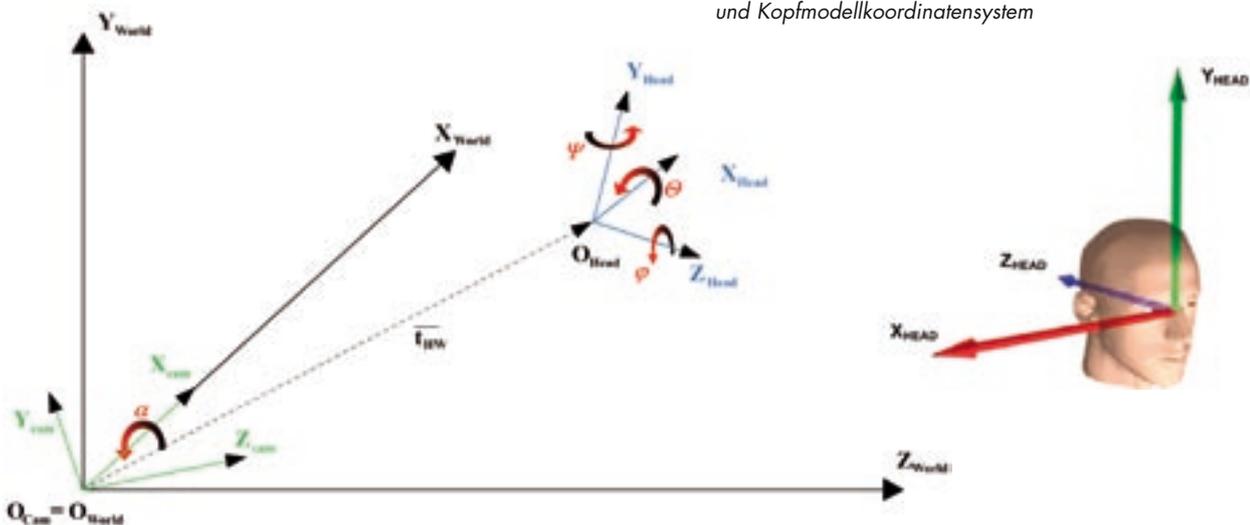
**Tabelle 1:** Ausgangssignale des Driver Monitoring Systems

Die Ausgabeparameter „Kopffrotation um X, Y, und Z“ beschreiben die Drehungen um die Winkel  $\theta$ ,  $\psi$  und  $\varphi$  und die Parameter „Kopfposition X, Y und Z“ die Lage des Kopfmodellkoordinatensystems im Weltkoordinatensystem. Siehe dazu auch Abbildung 2.

### 3 FAHRERADAPTIVES ACC

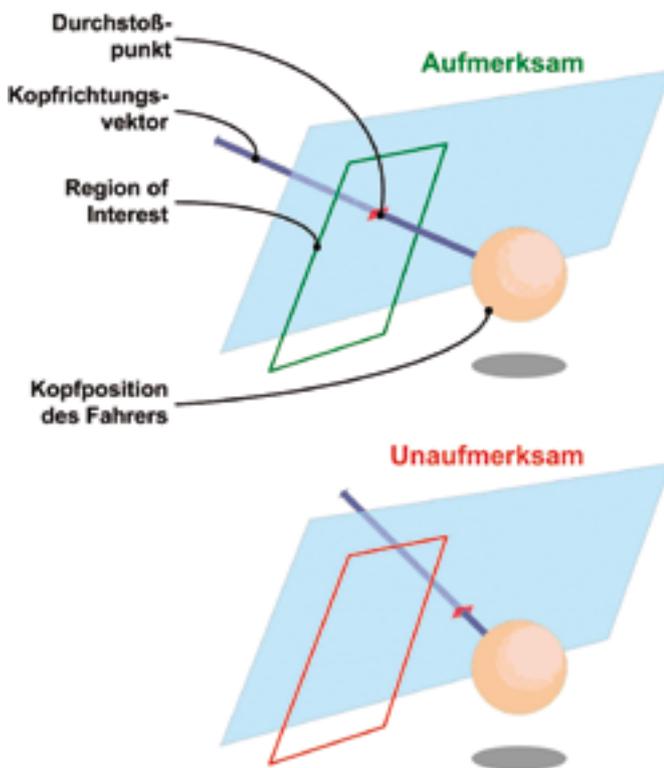
Aus den durch die Fahrerbeobachtung gewonnenen Daten kann ermittelt werden, ob der Fahrer seinen Aufmerksamkeitsfokus auf das Verkehrsgeschehen richtet. Zu diesem Zweck wird aus der Kopfposition und den Orientierungswinkeln ein Kopfrichtungsvektor berechnet. Ist ein Autofahrer beim Fahren mit höherer Geschwindigkeit aufmerksam, so ist anzunehmen, dass sein Kopf in Richtung des vorausfahrenden Verkehrs ausgerichtet ist. Weicht die Kopfrichtung von diesem Aufmerksamkeitszentrum ab, so kann auf eine visuelle Ablenkung des Fahrers, z.B. durch Bedienung des Autoradios, geschlossen werden. Der Fahrer ist kurzfristig unaufmerksam.

Diese Annahme wurde in ein einfaches Modell integriert, die Region of Interest (ROI). Dabei handelt es sich um einen virtuellen Bereich vor dem Fahrer, innerhalb dessen die Kopfausrichtung des Fahrers fallen muss, so dass er als aufmerksam eingestuft werden kann. Verlässt der Kopfrichtungsvektor die Zone der Aufmerksamkeit, so wird der Fahrer nach Ablauf eines Zeitintervalls als kurzfristig unaufmerksam eingestuft. Orientiert sich der Fahrzeugführer wieder in Richtung des



**Abbildung 2:** Beziehung zwischen Welt-, Kamera-, und Kopfmodellkoordinatensystem

vorausfahrenden Verkehrs, muss sein Aufmerksamkeitsfokus eine Mindestzeit innerhalb der Region of Interest liegen, bevor er wieder als aufmerksam eingestuft wird. Siehe dazu auch Abbildung 3.



**Abbildung 3:** Bestimmung der kurzfristigen Aufmerksamkeit mit Hilfe der ROI

Studien haben gezeigt, dass Fahrer, die mehr als 2 Sekunden ihre Aufmerksamkeit vom Verkehr abwenden, mit erhöhter Wahrscheinlichkeit in einen Unfall verwickelt werden. (Quelle: U.S. Department of Transportation) Die Erkenntnis darüber, ob der Fahrer zu einem bestimmten Zeitpunkt unaufmerksam ist, lässt sich dazu verwenden Fahrerassistenzsysteme hinsichtlich Sicherheit und Akzeptanz neu zu parametrieren. So ist es beispielsweise möglich, die Warnstrategien einer adaptiven Fahrgeschwindigkeitsregelung an die Aufmerksamkeit des Fahrers zu koppeln.

Die Adaptive Cruise Control (deutsch: Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung), im folgenden ACC genannt, ist ein modernes Fahrerassistenzsystem. Es dient im ersten Funkti-

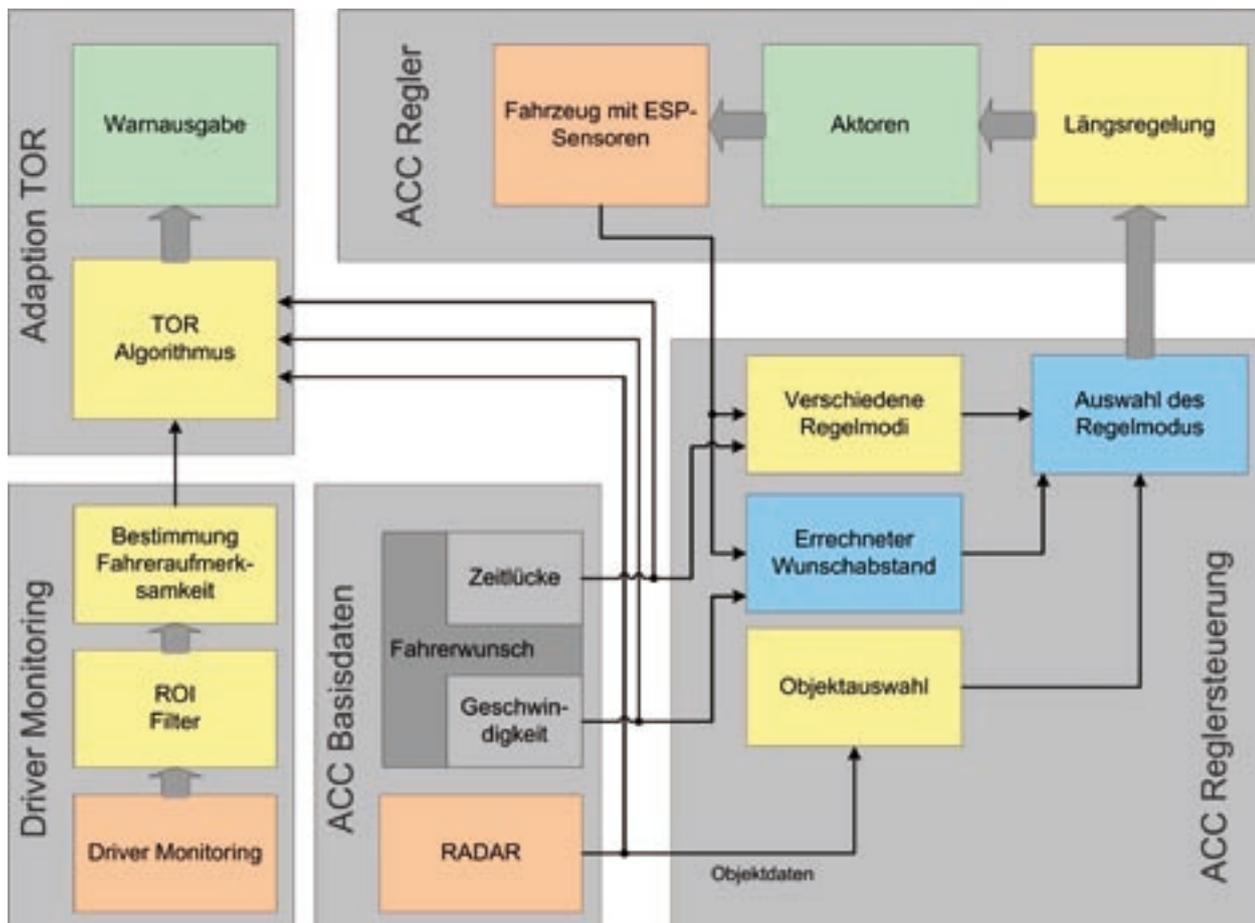
onsteil, wie die einfachere Version Cruise Control (deutsch: Tempomat), dazu, eine vom Fahrer eingestellte Konstantgeschwindigkeit automatisch zu halten. Der Zugewinn von ACC gegenüber dem einfachen Tempomaten besteht darin, dass die Regelung auf Hindernisse im Fahrweg reagieren kann. Diese werden mit Hilfe eines aktiven Radarsensors im vorderen Teil des Automobils erfasst. Holt man beispielsweise ein langsamer fahrendes Fahrzeug ein, so regelt ACC automatisch die Geschwindigkeit herunter, dass das eigene Fahrzeug einen vom Fahrer eingestellten geschwindigkeitsabhängigen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält. Entfernt sich das Hindernis aus dem Fahrweg, so beschleunigt ACC wieder automatisch auf die vorher vom Fahrer gewählte Geschwindigkeit. Erkennt ACC, dass es nicht mehr in der Lage ist die Situation zu kontrollieren, so wird eine akustische und optische Übernahmeaufforderung vom Kombiinstrument an den Fahrzeugführer ausgegeben, der sog. TOR (Take Over Request).

Aus diesem Funktionsumfang ergibt sich eine erhöhte Verkehrssicherheit durch größere Folgeabstände und ein gesteigerter Fahrkomfort für den Fahrer insbesondere bei Folgefahrten.

Diese Übernahmeaufforderung muss jedoch bestimmten Rahmenbedingungen genügen. Es lässt sich feststellen, dass Fahrer in kritischen Situationen möglichst frühzeitig z.B. auf eine drohende Kollision aufmerksam gemacht werden sollte. Wird jedoch schon bei geringem Gefahrenpotential eine Warnung ausgelöst, so sinkt die Akzeptanz des Systems. Deshalb wurde das ACC-System in aktuellen AUDI-Serienfahrzeugen so parametrieren, dass es nur in sehr kritischen Situationen eine Warnung an den Fahrer ausgibt. Durch die Einbeziehung des Aufmerksamkeitszustandes des Fahrers in die ACC-Warnstrategien kann das ACC-System deutlich verbessert werden. Siehe dazu auch Abbildung 3. Wird hierbei der Fahrer als kurzfristig unaufmerksam klassifiziert, so ist es sinnvoll die Übernahmeaufforderung zu einem früheren Zeitpunkt an den Fahrzeugführer auszugeben.

Durch Anpassung des Algorithmus zur Berechnung des TOR sowie durch möglichst präzise Vorhersage der aktuellen Verkehrssituation ist es möglich, die Übernahmeaufforderung im Fall der Unaufmerksamkeit des Fahrers um bis zu 1,5 Sekunden vorzuziehen. Reagiert der Fahrer früher, so können Unfälle vermieden oder zumindest die Unfallschwere deutlich reduziert werden.

**Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mottok**  
 Tel.: 0941 943-1120  
 Fax: 0941 943-1424  
 juergen.mottok@e-technik.fh-regensburg.de



**Abbildung 4:** Fahrerzustandsadaptiver ACC-Regler

**4 FAZIT**

Das ACC System, ein abstandsregelnder Tempomat, entlastet den Fahrer bei der Längsführung des Fahrzeugs. Die Warnstrategien aktueller ACC Systeme ist bislang unabhängig von der Fahreraufmerksamkeit. Durch ein Vorziehen von Warnungen könnte dem Fahrer im Fall von Unaufmerksamkeit jedoch mehr Zeit zum Reagieren auf Gefahrensituationen eingeräumt werden. Damit könnten Unfälle vermieden oder deren Schwere gemindert werden. In diesem Artikel wurde ein Prototyp einer fahreradaptiven ACC-Warnstrategie vorgestellt und diskutiert. Inzwischen ist die frühere Reaktion abgelenkter Fahrer auf kritische Situationen unter Anwendung des vorgestellten Systems empirisch in einer Probandenstudie gezeigt worden.

Der vorliegende Artikel ist erschienen bei Hanser Automotive, München, 3-4 (2008) 20-23. Wir danken dem Carl Hanser Verlag für die Genehmigung des Abdrucks.

## SMART SHELF

Im Rahmen seiner Diplomarbeit entwickelte Herr Georg Vökl ein „intelligentes Bücherregal“. Professor Dr. Rudolf Hackenberg, Fakultät IM, betreute dieses Projekt. Ein Forschungsschwerpunkt von Prof. Dr. Rudolf Hackenberg liegt im Bereich RFID-Systeme, vorzugsweise im Logistik- und Produktionsumfeld. Ein weiteres Anwendungsgebiet seiner Untersuchungen stellt der Einsatz von RFID in Bibliotheken dar.

Die leitende Idee für die Entwicklung dieses Regals war die Rückstellung ausgeliehener Bücher durch den Benutzer selbst und die damit verbundene Kostenersparnis. Durch die RFID-Technologie ist dieses Regal in der Lage zeitnah und automatisch festzustellen, welches Buch in welchem Abteil steht, Buchentnahmen und Rückstellungen zu registrieren und die Benutzer zu erfassen.



### HARDWARE

Der Bestand des intelligenten Bücherregals wird alle 425 Millisekunden vom Symbol Reader XR480 über die AN400 Antenne ausgelesen. Das elektromagnetische Feld strahlt etwa 30 cm durch die Öffnung des Abteils in den Raum. Außerdem erfasst der Reader den Benutzer bei der Entnahme oder Rückstellung eines Buches über eine Manschette:



### SOFTWARE

Die Software zeigt an, welche Bücher auf welches Konto verbucht wurden, welche Bücher aus dem mittleren Regalabteil entnommen sind, welche Bücher nicht in das mittlere Abteil gehören, welcher Benutzer als letzter aktiv war mit einem Auszug seines Kontos, den aktuellen Benutzer, ein Protokoll das jede Aktion dokumentiert und eine Statistik über den Bücherbestand des mittleren Regalabteils. Das Konto des letzten Benutzers zeigt dessen Bild, Name, Adresse und seine ausgeliehenen Bücher. Im Regalprotokoll wird jedes Ausleihen bzw. Rückgeben eines Buches mit einer fortlaufenden Nummer, dem Ausleiher und dem Buchnamen aufgezeichnet. Die Statistik bietet folgende Information über das mittlere Abteil: Anzahl der Bücher in diesem Abteil, Anzahl der ausgeliehenen Bücher, Anzahl der entnommenen Bücher, Anzahl der aktiven Benutzer und Anzahl der falsch gestellten Bücher.

Darüber hinaus bietet die Software die Möglichkeit, Bücher mit einer Karte oder einem Identifikationsmerkmal an der Hand auszuleihen. Will der Benutzer Bücher mit einer Benutzerkarte ausleihen, drückt er am Touchscreen den Button Ausleihen. Danach bekommt er alle entnommenen Bücher als Auswahl zum Ausleihen.

Er wählt nun die Bücher, die er ausleihen möchte, aus. Danach quittiert er, um den Ausleihvorgang abzuschließen. Der Benutzer wird nun aufgefordert, die Benutzerkarte kurz ins elektromagnetische Feld des mittleren Abteils zu bewegen.

Sollte es sich der Benutzer noch anders überlegen, besteht die Möglichkeit, den Ausleihvorgang abzubrechen. Nachdem die Benutzerkarte ins Feld des mittleren Abteils bewegt wurde, werden die vorher ausgewählten Bücher auf diesen Benutzer verbucht.

Wenn der Benutzer die Manschette als Identifikationsmerkmal trägt, wird jede Entnahme eines Buches automatisch auf ihn verbucht, solange er alleine im Regalabteil agiert. Sollten sich zwei Manschetten in einem Abteil befinden, kann die Software die Entnahme keinem Benutzer zuordnen und das Buch wird nur als Entnommen angezeigt.

Prof. Dr. rer. nat., Dipl.-Inf. (FH) Rudolf Hackenberg  
 Tel.: 0941 943-1307  
 Fax: 0941 943-1426  
 rudolf.hackenberg@informatik.fh-regensburg.de

<h3>Ausgeliehene Bücher</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li> Der kleine Grenzverkehr Vökl Georg</li> <li> Musikalische Novellen und Schriften Vökl Georg</li> <li> Engel von Loewen und anderen Erz. Vökl Georg</li> </ul>	<h3>Entnommene Bücher</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li> Programmiersprache Assembler</li> <li> Wege des Glücks</li> <li> Stunden der Besinnung</li> </ul>	<p>Anzahl Bücher mittleres Abteil: 22</p> <table border="1"> <tr> <td>Ausgeliehene: 3</td> <td>Entnommene: 3</td> </tr> <tr> <td>Benutzer: 0</td> <td>Falsch gestellt: 1</td> </tr> </table> <p><b>Ausleihen</b></p>	Ausgeliehene: 3	Entnommene: 3	Benutzer: 0	Falsch gestellt: 1	<h3>Aktueller Benutzer</h3> <p>keiner</p>
Ausgeliehene: 3	Entnommene: 3						
Benutzer: 0	Falsch gestellt: 1						
		<h3>Falsch gestellte Bücher</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li> Logitech Modulo - 2 Post Editor oberes Regal</li> </ul>	<h3>Protokoll Bibliothek</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li>546 Vökl Georg ausgeliehen Engel von Loewen und anderen Erz.</li> <li>545 Vökl Georg ausgeliehen Musikalische Novellen und Schriften</li> <li>544 Vökl Georg ausgeliehen Der kleine Grenzverkehr</li> <li>543 Vökl Georg zurückgegeben Engel von Loewen und anderen Erz.</li> <li>542 Vökl Georg zurückgegeben Musikalische Novellen und Schriften</li> <li>541 Vökl Georg zurückgegeben Knub</li> </ul>				
		<p>Vökl Georg          Leon Christ Weg 3          93055          Regensburg</p>	<h3>Ausgeliehene Bücher</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li> Der kleine Grenzverkehr</li> <li> Musikalische Novellen und Schriften</li> <li> Engel von Loewen und anderen Erz.</li> </ul>				

### Auszuleihende Bücher bitte markieren!

	Programmiersprache Assembler	<input type="button" value="auswählen"/>		<input type="button" value="fertig"/>
	Stunden der Besinnung	<input type="button" value="auswählen"/>		<input type="button" value="fertig"/>
	Wege des Glücks	<input type="button" value="auswählen"/>		<input type="button" value="fertig"/>

**Zum Ausleihen Karte bitte kurz ins Feld bewegen!**

**Abbruch**

## AN INTEGRATED DECISION MODEL FOR EFFICIENT REQUIREMENT TRACEABILITY IN SPICE COMPLIANT DEVELOPMENT

### ABSTRACT

Requirement traceability ensures that (SW-)products meet their requirements and additionally makes the estimation of the consequences of requirement changes possible. It is especially difficult to establish at the transition from requirements specification to its provision in the design, because design processes represent creative and complex transfers of mostly unique problem constellations into a sustainable solution (so-called Wicked Problems). At first, this article searches for symptoms of the problem in analyzing the process model of ISO 12207, the foundation of SPICE or CMMi. This analysis mainly serves the derivation of a concept for the integrated extension of today's traceability models with the aspect of documented design decisions. In the context of current approaches in Rationale Management, our concept proofs as sustainable solution that supports „heavyweight“ prescriptive approaches as well as „lightweight“ pragmatic approaches and – moreover – shows interdependencies between both kinds.

### 1 INTRODUCTION

In the development of safety-critical embedded real-time systems, aspects of safety and reliability have critical importance (cf. [1], ISO 61508). Due to this, issues as control and improvement of software processes (cf. ISO 15504 SPICE) are of high significance. In the course of establishing SPICE at Micron Electronic Devices AG, we have discovered several interesting results in this area. This paper presents parts of our results concerning requirement traceability from requirements specifications to system as well as software designs. Currently, these results are being implemented in a SE tool prototype.

For the development of safety critical embedded systems, traceable and consistent elaboration of requirements throughout all development cycles (especially the design phases) are

mandatory. However, today's document-heavy approaches face problems with redundancy and synchronization of different stakeholders' views. To handle these issues, our approach concentrates on maintaining one consistent view of all requirements between all stakeholders.

In the following design phases, the involved stakeholders and artefacts – of the different engineering disciplines (Systems engineering, HW, SW) – shall be connected by a lightweight model and tool based approach.

The core of this approach is a decision-model, linking requirements, design problems and design together. As a result, new constraints on the solution space can be identified and used similar to requirements. Whereas former traceability approaches regarded decisions as valuable side information, our decisions get directly integrated in the classical traceability information forming traceability chains of decisions through the design processes. As a side effect, the approach addresses several problems in rationale management and encourages direct communication between the stakeholders.

We start with a short description of the state of the art in traceability (Chapter 2). Chapter 3—a kind of insertion—introduces the layered process model of SPICE and shows connections between the process model and traceability issues. This builds ground for Chapter 4 which introduces our integrated decision model that helps to improve currently used traceability models. Chapter 5 shows connections between our decision model and previous approaches in the area of Rationale Management. In Chapter 6, the effects of such a traceability model are discussed. At the end, Chapter 7 shows an example which contrasts our approach to currently used practices. For better understanding of the first theoretical chapters, it is recommended to first take a short look at Chapter 7.

### 2 STATE-OF-THE-ART IN REQUIREMENT TRACEABILITY

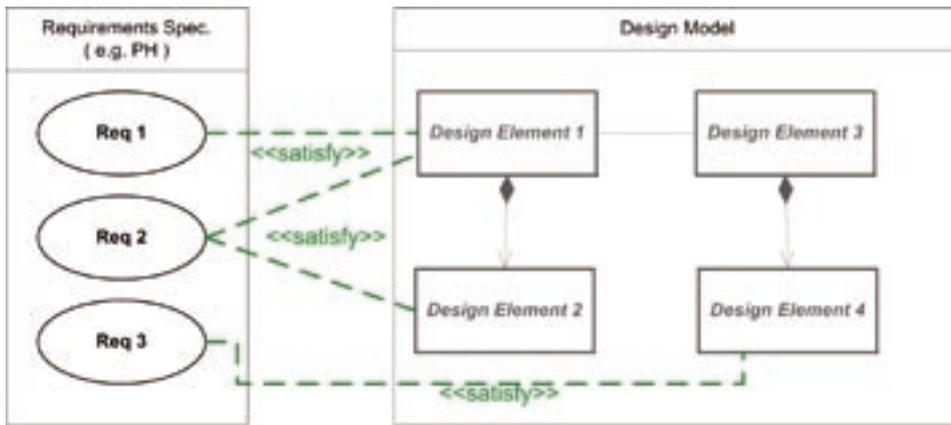
Requirements management, i.e. the activity of organizing, administrating and supervising requirements during the whole development process, and Traceability are mandatory actions to fulfil exigencies imposed by Software Engineering standards like SPICE<sup>1</sup> (Software Process Improvement and Capability dEtermination, cf. [2]) or CMMi (Capability Maturity Model Integration, cf. [3]).

<sup>A</sup> Electronic Systems Engineering, Micron Electronic Devices AG, Neutraubling, Germany; bernhard.turban@micron-ag.com

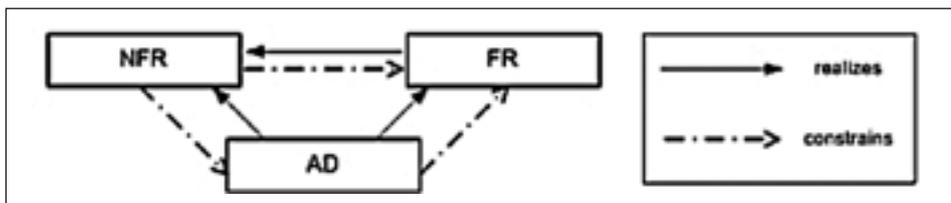
<sup>B</sup> Competence Center SE, University of Applied Sciences, Regensburg, Germany; markus.kucera, athanassios.tsakpinis@informatik.fh-regensburg.de

<sup>C</sup> Institute for Media, Information and Cultural Studies Regensburg University Germany; christian.wolff@sprachlit.uni-regensburg.de

<sup>1</sup> Furthermore the article concentrates on SPICE, but the claims are equally valid for CMMi, since both process models are based on the process model of ISO 12207.



**Figure 1:** Today's practice of establishing traceability via <<Satisfy>>-links



**Figure 2:** Relationships between non-functional (NFR), functional requirements (FR) and architectural decisions (AD) according to [8].

Traceability means „comprehensible documentation of requirements, decisions and their interdependencies to all produced information/artefacts from project start to project end“ ([4; p.407]). Between artefacts or respectively models of different development processes emerging structural interruptions – semantic gaps ([5], [6], [7; p.138f]) – endanger a project’s consistency and the common understanding of its stakeholders. Traceability relationships are intended to close these gaps. Paech et al. [8] indicate that traceability in relation to the design of artefacts is typically seen as a set of bidirectional relationships between requirements and their fulfilling design entities (cf. [9]). Figure 1 schematically shows today’s usual method of relating requirements to design elements by <<Satisfy>>-links<sup>2</sup> (cf. [10], [11]).

Paech et al. [8] show that these relationships can be of a far more complex nature (cf. Fig.2). By restraining the solution space, non-functional requirements (NFR) restrain functional requirements (FR) and architectural decisions (AD). On the other hand, NFRs are realised by FRs and ADs, whereas FRs are realised and restrained by ADs.

### 3 THE PROCESS ARTEFACT MODEL OF SPICE

The SPICE process model uses the standardised process model of ISO 12207 (cf. [2]). In the following, we focus on the processes ENG.2-ENG.5 of SPICE. These processes form a layer model of different levels of abstraction in which problem space descriptions (requirement view: ENG.2, ENG.4) alternate with solution space descriptions (designs: ENG.3, ENG.5) (cf. [13; p.113f], [14]):

- ENG.2: derives from the user requirements specification a general system requirements specification (SYS-RS).
- ENG.3: uses the SYS-RS to create a high-level systems design with the prior emphasis on HW-SW-partitioning.
- ENG.4: the software requirements specification (SW-RS) derives from ENG.2 and ENG.3.
- ENG.5: uses the SW-RS for the design of the SW architecture.

SPICE-oriented traceability models require a continuous link chain between the artefacts of ENG.2, ENG.3, ENG.4, ENG.5 to ensure the consistency of the entire model (cf. [15], [6]).

As our research has shown, this clear separation is a more or less metaphoric one (cf. [16]) providing orientation aid for the developers as process models do. However, in practical terms, such a clear separation is mostly not viable ([2; p.103], [13; p.114]).

<sup>2</sup> Lately, the trend arises to use SysML ([12]) for these relations.

Especially the proclaimed specification of SW requirements should be dealt with cautiously in our application domain, since a really separate SW-specification<sup>3</sup> faces the following problems:

- Often, requirements on HW and SW are strongly interwoven (cf. [2; p.104]).
- In many cases, SW functionality is already clearly demanded in the user requirements specification (ENG.1). Thus, if applying such a clear separation, those requirements must be taken over into the SYS\_RS (ENG.2) and SW\_RS (ENG.4) causing additional efforts and redundancies (cf. [18]).
- Other requirement types exist not attributable to either HW or SW (e.g. project management, quality management, mechanical construction). Alternatively, in current requirements management tools like DOORS®, a HW-SW-partitioning of requirements is also viable using an attribute (proposed values: System, HW, SW, construction, management).
- Generally, linking of different artefacts is a time consuming, unproductive and error-prone administrative work that should be minimized.

Thus, concentrating on more pragmatic views of the agility scene (cf. [19]), we propose to merely concentrate on one dependable, consistent artefact (cf. DRY-principle (don't repeat yourself) in [18]) to store all contractually obligatory requirements as one common view / interface to synchronize the views of all stakeholders in the project.

At least two dedicated exceptions exist that should be dealt with on their own and will not be part of the further discussion below:

- Complex Systems (System of Systems): If complex systems can be divided into relatively independent subsystems (with exactly definable interfaces), then the subsystem specifications should be separated.
- For development parts delegated to subcontractors the interface and context of these must be deeply analysed and defined.

#### 4 RELATIONSHIP BETWEEN LAYERED PROCESS MODEL AND TRACEABILITY

This chapter is concerned with the core of above described process layer model. In refining the previously described metaphoric idea of the process layer model, we come to the proposal of our approach.

<sup>3</sup> Boehm points out, that the separation between Systems and SW engineering has been a historical and artificial one ([17]).

The actual core of this approach is the following: System design has high impact on its SW design by raising new „requirements“ in addition to the pristine requirements of the stakeholders (e.g. in the automotive sector, SW-design must be subordinated under constraints of extremely cost-optimized HW components. At the moment, SPICE neglects these critical connections between HW and SW).

However, one issue in SW requirements which might benefit from more intensive discussion is their negotiability. „Real requirements“ are forming the contractual basis between the stakeholders -particularly with the customer. Occurring changes must be harmonized with the customer via a Change Control Board (CCB). Whereas, for „requirements“ to change with the origin of the definitions of the design, it is possible to search for an project internal solution first, before escalating the issue to a CCB is considered.

Thus, both kinds of requirements should be strictly separated in their notion. We use the following taxonomy (Fig.3):

- Requirements are directly allocated to the SYS-RS, since they concern the legal agreement between customer and contractor.
- „Requirements“ derived from requirements or designs are called DesignConstraints.
- Requirements and DesignConstraints have similar qualities and structure. Thus, we use the term RequirementItem (RI) for both items.

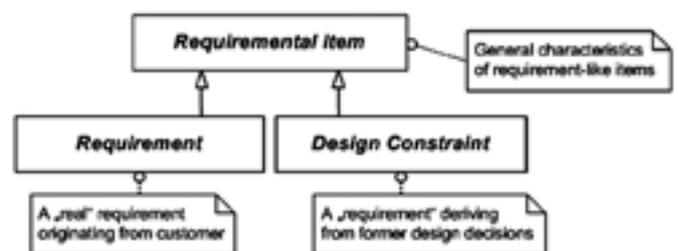
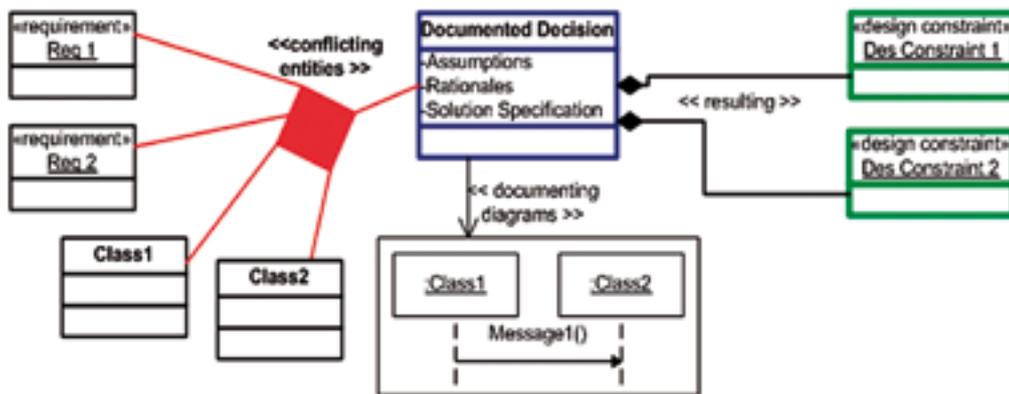


Figure 3: Requiremental items taxonomy

Requirements have to refer to their origin (cf. [7], [4]). This relation should apply to all RIs. The origin of DesignConstraints lies in previously made design decisions solving the conflicts/forces between RIs and/or architectural items constraining the broader more abstract solution space to a more concrete one.



**Figure 4:** Documented decisions build the connection between requirements, design elements and resulting design constraints.

These considerations suggest the inclusion of a decision model in the traceability information (cf. Fig.4<sup>4</sup>) helping to document the origin of new DesignConstraints (this especially helps to make the HW's influence on SW more transparent (cf. [20; p.415])) in a lightweight and need-oriented way.

The conventional scheme of relating requirements to realizing model elements is extended by a dialog allowing the capture of documented decisions. In this dialog, elements of the requirement model and the design model which are conflicting/ causing a problem can be chosen. Equally, diagrams describing aspects of the conflicting situation shall be attached as additional information (<<documenting diagrams>>).

Furthermore the decision can be specified on demand via a text component. The text component accepts unstructured text, but -when needed- can give adequate templates to support the decision documentation. A possible way to structure -the user should choose these freely- is given in Fig.4 with the decision's attributes assumptions, rationales and solution specification.

## 5 RELATION TO PREVIOUS APPROACHES OF RATIONALE MANAGEMENT

The decision model presented here is strongly connected to the research area called rationale management (RM), since both deal with decisions during SE processes. In classical RM,

the focus lies on documenting, recovering, further usage and reuse of justifications (= rationale) behind design decisions. RM mainly targets on the information about the „Why“ of design decisions in order to alleviate the knowledge transfer of decision makers to other involved stakeholders.

However, existing approaches could not succeed in practice [22], even though documenting design decisions is regularly called for in literature (cf. IEEE 1471:2000, [23], [24], [25], [26], [27], [28]) and practitioners acknowledge the importance of this type of documentation ([29]). Diverse causes for this negligence have been identified, but the problem of capturing the rationale seems to be the main obstacle (cf. [22], [30]):

1. Most approaches are highly intrusive (bothersome and interfering) to the design process with extra effort for capturing ([31], [30]).
2. The approaches tend to have negative impact on the decision process, since not all (aspects of) decisions can be rationally justified, but arise from intuitive considerations (Fischer and Schön's „Theory of Reflective Practice“ [32], [22]) basing on diffuse experiences (tacit knowledge [33]) (cf. [22], [30], [34]).
3. Decisions must be made despite of unclear circumstances and it is impossible to include all relevant information (bounded rationality [30]). Thus satisfactory solutions must be found although problem knowledge is clearly limited ([35]).
4. Grudins Principle [31] suggests that collaborative systems fail, if the invested value is not returned to the information bearers ([22], [36]).

The problem mentioned in Point 1 implies that in any case not all decisions can be treated exhaustively. For example, Clement, Bass et al. only refer to the documentation of the

<sup>4</sup> Fig.3 shows this concept extending today's traceability models by an explicit decision model. The diagram sketches a concrete situation, where a conflict between two requirements (Req\_1, Req\_2) and two UML model elements (Class1, Class2) is resolved by a design decision resulting in two new DesignConstraints (DesConstraint1, DesConstraint2).

most important decisions ([23], [24]). Booch ([28]) gives another lead by dividing decisions into strategic (i.e. with striking impact on architecture, mostly made on the early stage of a project) and tactical (i.e. locally limited impact on the architecture).

In this context, strategic decisions must/should be thought through carefully and should – if possible – be made on explicit rationale grounding. For this relatively small fraction, the investment in more intensive analyses is highly valuable, as discussed by most approaches on rational management ([37], [23], [24], [38]). These issues may be analyzed in a prescriptive schema as IBIS ([39]), or the Rationale Model of Ramesh and Jarke ([37]), or REMAP ([40]), or Clement and Bass ([23], [24]). Our decision model (see Fig.3) supports this by additionally allowing to define a project individual template for the textual description component of the decision (here shortly sketched by the bullets „Assumptions“, „Rationales“ and „Solution Specification“).

On the other hand, Booch also demands that tactical decisions should be documented. At that time, Booch thought both kinds would disclose itself by applying adequate modeling. Today's experiences show that such modeling just documents the How, but not the Why of decisions.

In our opinion, the developers should at least get the possibility to document decisions on demand, but considering aspects mentioned in Point 2 and 3, the intrusion on the development process must be minimized ([36], [30], [22], [34]). Therefore, the proposed decision model provides a minimal notational framework to identify the conflicting elements (requiremental and design) and to derive in the resulting consequences as DesignConstraints. Thus, the conflicting elements span an area of conflict, automatically documenting the basic rationale behind a decision.

In that case, however, the model is minimalistic and of a purely descriptive nature. Any further users of such minimalistically documented decisions must at first derive the actual knowledge about the decision on their own. But at least the fact that the context (the conflicting items and the results of the decision as DesignConstraints) for each decision is present provides evidence to later users: They can infer that a decision has been made consciously and first clues are given for refinding the rationale (cf. [41]).

In that way, not all decisions can be reconstructed. Since the tool discussed here shall also automatically record metadata like the author(s) of a decision, the decision's later user (rationale seeker) can thus consult the author(s) about unclear aspects. Additionally to tool usage, a process rule shall prescribe that the information seeker must document the results

of this decision recovery in the decision's textual description to further improvement of the decision's documentation.

This procedure – inspired by Schneider ([36]: „Put as little extra burden as possible on the bearer of rationale“) helps to cope with the problem in point four (see above), because by deferring the documentation work to the inexperienced rationale seeker, the experienced know-how bearers are disburdened significantly from communication/documentation work. As a positive side-effect, the transferred knowledge gets tightened in the rationale seeker during his documentation work.

On the other side, only unclear decisions will go through this further rationale request and documentation process. Therefore, the approach indirectly minimizes the documentation overhead by orienting on the selective information need of the further decision seekers.

Thus, concerning RM, our approach tries to balance and connect descriptive pragmatism and structured prescriptive methodologies. RM is not our central issue, but this chapter shows that requirement traceability and RM are very closely related to each other and complement one another.

A further general problem of RM not yet discussed here is the retrieval of documented decisions. Horner and Atwood ([30]) argue that fixed schemes – in contrast to unstructured text – offer better possibilities in indexing for retrieval. The following chapter shows how the retrieval problem can be avoided through usage of the gathered traceability information of this approach.

## 6 EFFECTS ON THE TRACEABILITY MODEL

The idea of including decisions into the traceability models has already been proposed by Ramesh with his REMAP-tool([40]). In a later empirical study on traceability, he and Jarke ([37]) detected a real need by experienced users. Therefore they include a separate traceability submodel (rationale submodel) for decisions which is oriented on the former works with REMAP.

The decision model being proposed here has been inspired by the rationale submodel, but in our view Ramesh and Jarke's ([37]) solution lacks making concrete proposals for implementation and thus, the RM component appears loosely connected to the other traceability submodels. Besides, the rationale submodel (orienting on REMAP) extends IBIS ([39]), which is a prescriptive and intrusive method (cf. [42; p. 202ff]).

In contrast, our decision model directly fits into the schema for traceability to the design. In that way, a semi-formal

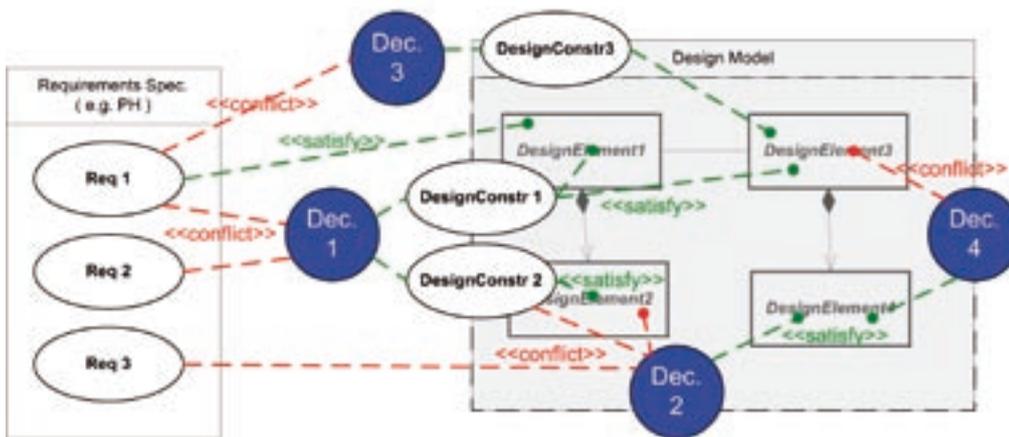


Figure 5: The newly emerging more detailed traceability information scheme.

model has evolved which provides easy handling and which has the following characteristics:

- A constellation (combination) of requirements and design elements leads to conflicts.
- Decisions do not directly influence dedicated design objects, but they bear DesignConstraints that can be flexibly assigned to design elements during the project.
- All other important information for documenting a decision can be added on demand as unstructured descriptive text.
- For important strategic decisions a template can provide prescriptive elements to assure these decisions have been made thoroughly.

The usage of the decision model has effects on existing traceability models. The traceability model described in Fig.1 is extended to a model briefly sketched in Fig.5. Since design elements influence the decision process as well, the requirement dimension migrates to a close coupling with the design. Simple <<satisfy>> relationships can occur next to (as Req.1 maps to DesignElement1), more complex traceability networks may occur. Thus, e.g. Req.2 only impacts the design by the decisions Dec.1 and Dec.2.

Dec.2<sup>5</sup> arises from the conflict situation of Req.3, DesignConstr.2 and DesignElement2, whereas Dec.3 is only derived from requirement Req.1 (which then corresponds to a <<Derive>>-relationship as described in [5;p.33]). Consequently, DesignElements alone should also be able to invoke a decision (Req1 → Dec.3 → DesignConstr3).

<sup>5</sup> Dec.2 is directly mapped to DesignElement4. This may also be possible, when no further information for understanding the decision is needed.

With adequate tool support, these traceability relationships as indicated in Fig.5 could be visualized as a traceability tree. A kind of browser should support:

- Detailed impact analyses: Starting with a starting impact set, all subsequent paths would firstly be classified as impacted. During the following detailed check, the tool should allow to take out paths identified as none-relevant and to add paths detected as relevant.
- An adequate context for the simple retrieval of documented decisions.

## 7 EXAMPLE

To contrast the differences between current approaches and our proposal, we use an example system requirements specification (SYS-RS) with three requirements causing a problem encountered by the Micron AG by one of its projects:

- Req.1: An external watchdog component must monitor the system.
- Req.2: Parametric data must be changeably by the customer during operation.
- Req.3: Parametric data must be stored in EEPROM.

### 7.1 Current practice

In current practice, the system design determines that the system will include a micro controller (controller), an external watchdog component and an external EEPROM (cf. Fig.6).

The HW requirements specification (HW-RS) derived from the SYS-RS and system design again contains Req.1 and Req.3 linking back (Fig.6: fat blue arrows) to the SYS-RS.

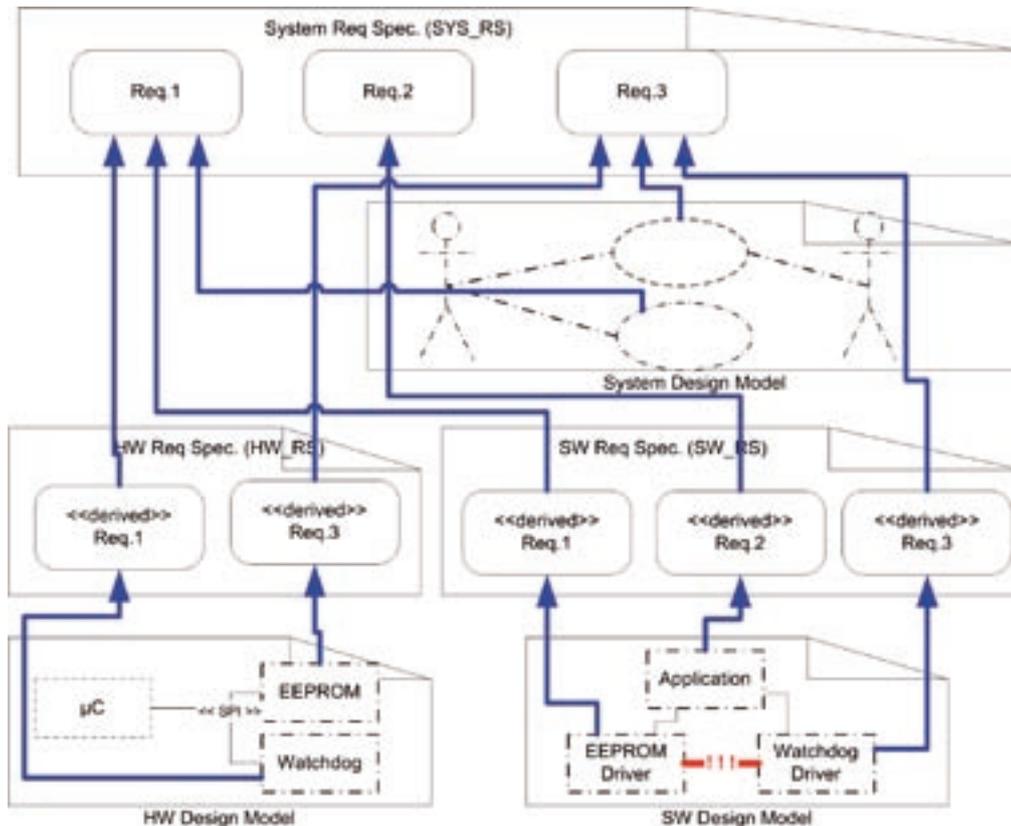


Figure 6: The example in previous approaches

The detailed HW-design determines that watchdog and EEPROM will share the connection pins to the controller by an SPI<sup>6</sup>-communication interface, because other connected components have already used up all remaining pins of the controller. Req.1 gets linked to the watchdog symbol and Req.3 to the EEPROM symbol in the HW design.

The SW requirements specification (SW-RS) contains Req.1, Req.2 und Req.3 linking back to the SYS-RS.

During SW design, the architect discovers the potential resource conflict in the shared usage of one SPI for EEPROM and watchdog. Since driving the EEPROM is very time intensive and triggering the watchdog is very time critical, the architect rates this combination as risk, but changes of the HW are rejected due to higher costs. The solution for this conflict, the EEPROM and watchdog drivers must be „artificially“ coupled to implement a cooperative handshake<sup>7</sup> solution (Fig.6: red association with “!!!”).

The solution implies that the planned original standard drivers of a supplier must be adapted internally. In the further progress of the project, these adaptations caused extra efforts not traceable to its background.

## 7.2 The new approach

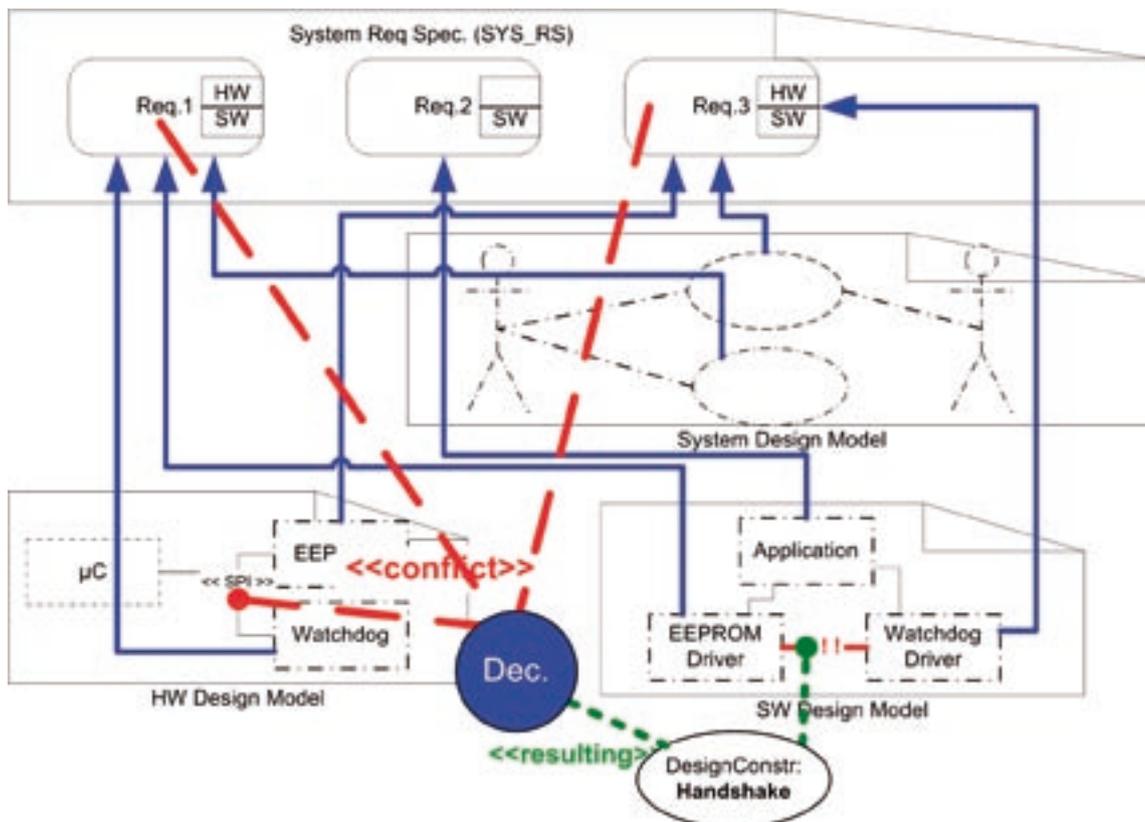
The system design is done similar to Chapter 7.1 (Fig.7). The SYS-RS contains an attribute that allows a SW-HW partitioning. Req.1 and Req.3 are marked as relevant for HW and SW, Req.2 only for SW.

The HW-RS is not directly applied, since the relevant HW requirements are marked in the SYS-RS. The HW design is done similar to Chapter 7.1 and linked to the Req.1 and Req.3 in the SYS-RS.

The SW-RS is not applied, since the relevant SW requirements are marked in the SYS-RS. The SW design will be developed from the SYS-RS and the system design model. The architect discovers the same problem concerning watchdog and

<sup>6</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface\\_Bus](http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus)

<sup>7</sup> When triggering needed soon, the watchdog requests the EEPROM-module, which handles preempting its task in a secure state.



**Figure 7:**  
The example  
the new way

EEPROM. He opens a decision wizard and marks Req.1 and Req.3 as conflicting and links to the HW-design diagram that documents the conflict. As further rationale, the architect textually documents „synchronization conflict at SPI between time intensive EEPROM application and time critical watchdog application“. A further click helps the architect to put the conflict into the risk list.

As resulting DesignConstraint, the architect sketches the cooperative handshake and links the DesignConstraint to the EEPROM and watchdog design elements in the SW design.

Our implementation follows the ideas described in Chapter 7.1. In the further project progress necessary changes are detected early by impact analyses and the additional costs can be compared to the cost savings of the rejected HW change.

The artefacts HW-RS and SW-RS not realized can be generated out of the model, on demand by summing up all requirements related to the corresponding design (HW design model for the HW-RS, SW design model for the SW-RS).

## 8 SUMMARY AND PROSPECTIVE

This article shows the interdependencies between the SPICE layered process model, requirements, traceability, designs and decisions with special attention on as low redundancy in the traceability information as possible. We plea for a strict separation between contractual mandatory requirements (real requirements) and requirements resulting from former design decisions (design constraints).

Furthermore we try to show in how far decisions are the link between requirements, designs and from those derived DesignConstraints. This closely connects and synchronizes approaches in requirement traceability and rationale management to lift synergic effects.

These remarks suggest, as has already been noted in the literature ([43], [6], [8], [44], [37], [11]), that the influence of requirements on design processes -and vice versa- is only insufficiently modeled by bidirectional linkages.

Therefore, a cooperation between Micron AG, the Competence Center for Software Engineering of the University of Applied Sciences Regensburg and the Media Computing

Group of the University of Regensburg work on a prototype system that enhances currently used traceability approaches by the solutions sketched above. The main goal is to find a solution to document traceability information in a lightweight fashion and, as a by-product, during design processes (cf. [45]). The decision model for deriving further design constraints discussed here will be a key step towards this goal.

## REFERENCES

- [1] O. Benediktsson, R. Hunter and A.D. McGettrick. Processes for Software in Safety Critical Systems. In *Software Process: Improvement and Practice*, volume 6 issue 1, p. 47-62, 2001
- [2] K. Hörmann, L. Dittmann, B. Hindel and M. Müller. *SPICE in der Praxis, Interpretationshilfe für Anwender und Assessoren*, dpunkt Verlag, Heidelberg, 2006.
- [3] R. Kneuper. *CMMI. Verbesserung von Softwareprozessen mit Capability Maturity Model Integration*. Volume 2, dpunkt Verlag, Heidelberg, 2006.
- [4] Ch. Rupp. *Requirements-Engineering und -Management*, Volume 2, Hanser, München, 2002.
- [5] M. Lindvall. A study of traceability in object-oriented systems development. Licenciate thesis, Linköping University, Institute of Technology, Sweden 1994.
- [6] A. von Knethen. *Change-Oriented Requirements Traceability. Support for Evolution of Embedded Systems*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2001.
- [7] Ch. Ebert. *Systematisches Requirements Management*, dpunkt, Heidelberg, 2005.
- [8] B. Paech, A. Dutoit, D. Kerkow and A. von Knethen. Functional requirements, non-functional requirements, and architecture should not be separated - A position paper, REFSQ Essen, 2002.
- [9] O. Gotel, O., A. Finkelstein. An Analysis of the Requirements Traceability Problem. *ICRE'94.*, pp. 94-101, 1994.
- [10] M. Hause. Successfully Managing An Incremental Real Time Project; Part Three: Requirements Management. 1999, <http://www.artisansw.com/>; (Access 10/2005).
- [11] S. Allderidge. A Use Case Driven Safety Critical Programme; INCOSE UK Spring Symposium 2003. [http://www.artisansw.com/pdflibrary/DS&S\\_INCOSE\\_2003.pdf](http://www.artisansw.com/pdflibrary/DS&S_INCOSE_2003.pdf), (Access 11/2005).
- [12] Object Management Group (ed.). *Systems Modeling Language Specification*. OMG adopted specification, Mai 2006, <http://www.sysml.org/docs/specs/OMGSysML-FAS-06-05-04.pdf>, (Access 10/2006).
- [13] K. Pohl and E. Sikora. Requirements Engineering für eingebettete Systeme. In [20], P.101-140, 2005.
- [14] B. Nuseibeh. Weaving together requirements and architectures. *IEEE Computer*, 34 (3) p.115-117, 2001.
- [15] J. Dick and J. Chard. *The Systems Engineering Sandwich: Combining requirements, models and design*. 2004. <http://www.telelogic.com/corp/download/index.cfm?id=3640>; (Access 06/2006).
- [16] O. Nierstrasz. Software Evolution as the Key to Productivity. In A. Knapp, M. Wirsing and S. Balsamo (Eds.) *Radical Innovations of Software and Systems Engineering in the Future*, LNCS, vol. 2941, Springer-Verlag, 2004, P. 274-282.
- [17] B. Boehm. *The Future of Software and Systems Engineering Processes*. 2005. <http://sunset.usc.edu/publications/TECHRPTS/2005/usccse2005-507/usccse2005-507.pdf> (Access 10/2006).
- [18] A. Hunt and D. Thomas. *The pragmatic programmer*. Hanser, München 2003.
- [19] B. Boehm and R. Turner. *Balancing Agility and Discipline - A guide for the perplexed*. Addison Wesley 2003.
- [20] P. Liggesmeyer, P. and D. Rombach (Eds.): *Software Engineering eingebetteter Systeme Grundlagen - Methodik - Anwendungen*. Volume 1., Elsevier, München, 2005.
- [21] A. Dutoit, A., R. McCall, I. Mistrik and B. Paech (Eds.). *Rationale Management in Software Engineering*. Springer, Berlin 2006.
- [22] A. Dutoit, R. McCall, I. Mistrik and B. Paech. *Rationale Management in Software Engineering: Concepts and Techniques*. In [21], p 1-48, 2006.
- [23] P. Clements, F. Bachmann and L. Bass. *Documenting SW Architectures-Views and Beyond*. Addison Wesley 2002.
- [24] L. Bass, P. Clements, R.L. Nord and J. Stafford. Capturing and Using Rationale for a Software Architecture. In [21], 2006.
- [25] M. Riebisch. *Prozess der Architektur- und Komponentenentwicklung*. In R. Reusser, W. Hasselbring (Eds.): *Handbuch der Software-Architektur*, dpunkt, Heidelberg, p.65-88, 2006.
- [26] T. Posch, K. Birken and M. Gerdorn. *Basiswissen Softwarearchitektur- Verstehen, entwerfen, bewerten und dokumentieren*. dpunkt, Heidelberg, 2004.
- [27] M. Gerdorn, T. Posch. *Pragmatische Software-Architektur für Automotive Systeme*. OBJEKTSpektrum, 05/2004, p.64fff, 2004.
- [28] G. Booch. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. 2nd Ed., Addison Wesley, Santa Clara, 1994.

**Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Inf. Athanassios Tsakpinis**

Tel.: 0941 943-1315

Fax: 0941 943-1426

athanassios.tsakpinis@informatik.fh-regensburg.de

- [29] A. Tang, M. Ali Babar, I. Gorton and J. Han. A Survey of the Use and Documentation of Architecture Design Rationale, In Proc. of 5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA'05), 2005
- [30] J. Horner, M.E. Atwood. Effective Design Rationale: Understanding the Barriers. In [21], p.72-90, 2006.
- [31] J. Grudin. Evaluating opportunities for design capture. In T.P. Moran, J.M. Carrol (Eds.). Design Rationale: Concepts, Techniques, and Use. Erlbaum Associates, Mahwah NJ, 1996.
- [32] D. Schön. The reflective practitioner. How professionals think in action. Temple Smith, London, 1983.
- [33] M. Polanyi. The Tacit Dimension. Doubleday, New York 1966.
- [34] F. Shipman III and C. Marshall. Formality Considered Harmful: Experiences, Emerging Themes, and Directions on the Use of Formal Representations in Interactive Systems. Computing Support Cooperative Work, 8 (4), p.333-352, 1999
- [35] M. Lehman and J. Fernández-Ramil. The Role and Impact of Assumptions in Software Engineering and its Products. In [21], p.313-328, 2006.
- [36] K. Schneider. Rationale as a By-Product. In [21], p. 91-109, 2006.
- [37] B. Ramesh, M. Jarke. Toward Reference Models for Requirements Traceability. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 27, No. 1, 2001.
- [38] Tyree, J.; Akerman, A.: Architecture Decisions: Demystifying Architecture. IEEE SW, vol. 22(2), p.19-27, 2005.
- [39] W. Kunz, H. Rittel. Issues as elements of information systems. Working Paper 131, Center for Urban and Regional Development, University of California, Berkeley, 1970.
- [40] B. Ramesh and V. Dhar. Supporting Systems Development by Capturing Deliberations During Requirements Engineering. IEEE Transactions on Software Engineering. Vol. 18, No. 6, JUNE 1992.
- [41] R. Roeller, P. Lago, H. van Vliet. Recovering architectural assumptions. The Journal of Systems and Software, 79, 2006.
- [42] P. Louridas, P. Loucopoulos. A Generic Model for Reflective Design. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, Vol. 9, No. 2, April 2000, 199-237.
- [43] A. von Knethen. A Trace Model for System Requirements Changes on Embedded Systems. In Proc. of 4th International Workshop on Principles of SW Evolution. Sept. 2001.
- [44] R. Pettit. Lessons Learned Applying UML in Embedded Software Systems Design. Second IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems. Wien, 2004.
- [45] K. Pohl. PRO-ART: A Process Centered Requirements Engineering Environment. In M. Jarke, C. Roland, A. Sutcliffe and R. Dömges (Eds.): The NATURE of Requirements Engineering, Shaker Verlag, p. 255-278, 1999.

## TORQUE CYCLE FATIGUE OF WIRE ROPES

Running ropes have a limited service life. Material fatigue is caused by oscillating bending stress as the rope runs over sheaves and by pulsating tension-tension stress during service. Oscillating bending stress and fluctuating tension-tension stress may occur simultaneously too. Depending on the application one of these forms of loading is predominant. In applications with friction winders and high lifting heights such as occur in the mining industry the rope opens and closes itself in cyclic manner while running through the shaft. These torque stress also leads to material fatigue. Beyond with a certain shaft depth material fatigue is caused mainly by the torque stress. The service life of ropes stressed by pulsating or oscillating torque is hardly explored until now. In the following torque tests will be reported and an equation for describing the expected service life will be introduced.

### 1 INTRODUCTION

The service life of running ropes is limited because oscillating and pulsating loads lead to fatigue of wire material. As a result more and more broken wires occur in the stressed rope sections.

Fatigue caused by bending cycles has been explored previously. Feyrer 2000 has delivered the essential contributions and gives a good overview about the actual level of knowledge.

Fatigue caused by tension-tension loading has not been investigated in such detail. To date, the best equation to describe the number of tension-tension cycles until failure is given by Feyrer 1995. Klöpfer 2002 has extended this work to include test results of various ropes of same construction and the results of other authors. Briem 2006 has also added to the same data base with information on 8-stranded special wire ropes.

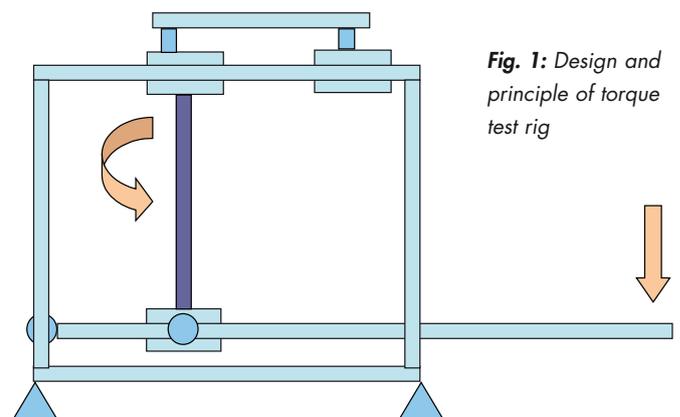
In deep shaft installations with friction winder a third stress occurs which leads to fatigue. While running through the shaft the rope opens and closes itself. Beginning with a certain shaft depth fatigue is caused mainly by that cyclic torque stress.

For estimation of the expected service life of ropes in deep shaft installations with friction winder it is necessary to know the rope deterioration caused by cyclic torque stress. A special test rig was built to investigate that kind of deterioration behaviour. In that test rig ropes can be twisted

cyclically in opening and closing sense with adjustable angles. In the following tests on these test rig will be reported. Results will be processed in a way that an estimation of expected service life under cyclic torque stress is possible.

### 2 TEST RIG

The test rope is held vertically in the test rig. The lower termination is rotationally fixed and the upper chuck is connected to a crank drive. The chuck may be adjusted so that the rope can be opened and closed by various angles. The lower chuck is connected to a lever arrangement so that the rope can be loaded with a constant line pull. Fig. 1 shows the design and principle of operation and Fig. 2 the fabricated test rig.



**Fig. 1:** Design and principle of torque test rig



**Fig. 2:** Test rig for investigation of torque cycle fatigue of wire ropes

### 3 TESTS

The tests are carried out with samples of a rope EPIWRC + 8x26 WS, Ø18 mm, 1770 N/mm<sup>2</sup>, galvanized, RHLL. The Cross-section of the rope is shown in Fig. 3. All in all 54 torque tests were carried out. 40 of them could be evaluated. The other test samples were undamaged after finishing the tests. The specific rope line pull was 7,3% of minimum breaking load.

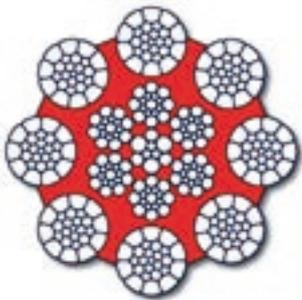


Fig. 3: Cross-section of EPIWRC+8x26 WS

The specific rope twist (between 188 and 291°/100d), the direction of twist (rope closing, rope opening or rope opening and closing with half angle) and the number of torque cycles until the tests were stopped (between 80,000 and 150,000) were varied. In the tests fluctuating torque stress in the ropes led to

internal broken wires only. After stopping of tests the internal broken wires were counted.

### 4 EVALUATION

The tests have shown that the direction of cyclic rope twist (rope closing, rope opening or half opening – half closing) has a significant influence on the rope deterioration. The least damaging is where the cyclic rope twist is in opening sense followed by the cyclic rope twist in closing sense. The greatest damage is where the cyclic rope twists in both opening and closing senses. In accordance to experiences with other machinery elements oscillating stress is worse than pulsating stress.

For deep shaft installations with a friction winder this result corresponds with statements in the literature, for example Haibach and Fuchs 1985. Rope sections which are described as the most heavily stressed sections twist themselves per one working cycle once in the opening sense and once in the closing sense. The rope deterioration in these sections was attributed until now to the effect of high acceleration forces.

The tests have shown that the difference in rope deterioration between cyclic rope twist in the opening sense and cyclic rope twist in the closing sense is approximately of the same size as the

difference in deterioration between cyclic rope twist in closing sense and cyclic rope twist in half opening – half closing sense. Therefore the differences between the several twist directions can be described with one single so called “Dummy-variable” X with the values X = 0 for half opening – half closing, X = 1 for rope closing and X = 2 for rope opening. In order to describe the variation in rope deterioration depending on the direction of cyclic rope twist, regression calculations with the mentioned “Dummy-variable” were carried out.

As might be expected the number of broken wires after a certain number of torque cycles increases with increasing rope twist. It has been determined that a half logarithmic equation leads to the best correlation value. The regression equation is:

$$\log B = a_0 + a_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot X \tag{1}$$

- with B ... number of broken wires
- φ ... specific rope twist angle [°/100d]
- X ... X = 0 for half opening – half closing  
X = 1 for rope closing and  
X = 2 for rope opening
- a<sub>i</sub> ... constants

Fig. 4 shows test results with respective regression curves. The correlation value is 65.2%.

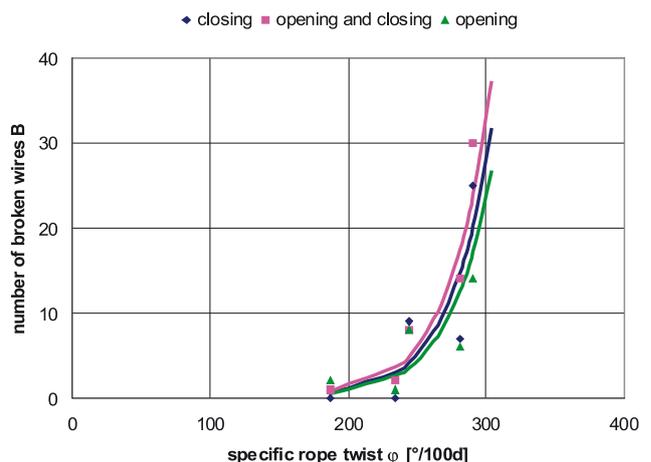


Fig. 4: Influence of specific rope twist to number of broken wires.

For description of dependence of number of broken wires on the number of torque cycles regression calculations were carried out also. The direction of cyclic rope twist was been considered with the Dummy-variable X once more. It has shown that a double logarithmic equation leads to the best correlation value. The regression equation is:

$$\log B = b_0 + b_1 \cdot \log N + b_2 \cdot X \quad (2)$$

with B ... number of broken wires  
 N ... number of torque cycles  
 X ... X = 0 for half opening – half closing  
       X = 1 for rope closing and  
       X = 2 for rope opening  
 b<sub>i</sub> ... constants

with B ... number of broken wires  
 N ... number of torque cycles  
 φ ... specific rope twist angle [°/100d]  
 X ... X = 0 for half opening – half closing  
       X = 1 for rope closing and  
       X = 2 for rope opening  
 q<sub>i</sub> ... constants

Fig. 5 shows test results with respective regression curves. The correlation value is 77.4%.



Fig. 5: Influence of number of torque cycles to number of broken wires.

The common evaluation of all test results was carried out with a combination of equations (1) and (2). Subsequently the regression equation is:

$$\log B = c_0 + c_1 \cdot \log N + c_2 \cdot \varphi + c_3 \cdot X \quad (3)$$

with B ... number of broken wires  
 N ... number of torque cycles  
 φ ... specific rope twist angle [°/100d]  
 X ... X = 0 for half opening – half closing  
       X = 1 for rope closing and  
       X = 2 for rope opening  
 c<sub>i</sub> ... constants

The correlation value is 52.1%. If equation (3) is solved for log N a conditional equation for the expected number of torque cycles will be created:

$$\log N = q_0 + q_1 \cdot \varphi + q_2 \cdot \log B + q_3 \cdot X \quad (4)$$

In very deep shafts in which the ropes fatigued mainly by cyclic torque stress the number of torque cycles is quite the same as the number of working cycles and therefore a value for the service life. During one up and down movement of the cage the rope twists itself one time in opening sense and one time in closing sense. If in equation (4) the number of broken wires B is substituted by the discard number of broken wires B<sub>A</sub> then the number of torque cycles N gives the discard number of working cycles Z<sub>A</sub> e.g. the number of lifting cycles until discard state of rope. For the case of maximum rope deterioration e.g. rope twists in opening and closing sense (X = 0) the discard number of working cycles is given by the following equation:

$$\log Z_A = q_0 + q_1 \cdot \varphi + q_2 \cdot \log B_A \quad (5)$$

with Z<sub>A</sub> ... discard number of torque cycles  
 φ ... specific rope twist angle [°/100d]  
 B<sub>A</sub> ... discard number of broken wires  
 q<sub>i</sub> ... constants

Fig. 6 shows the expected discard number of torque cycles in dependence of the specific rope twist angle for two different discard numbers of broken wires.

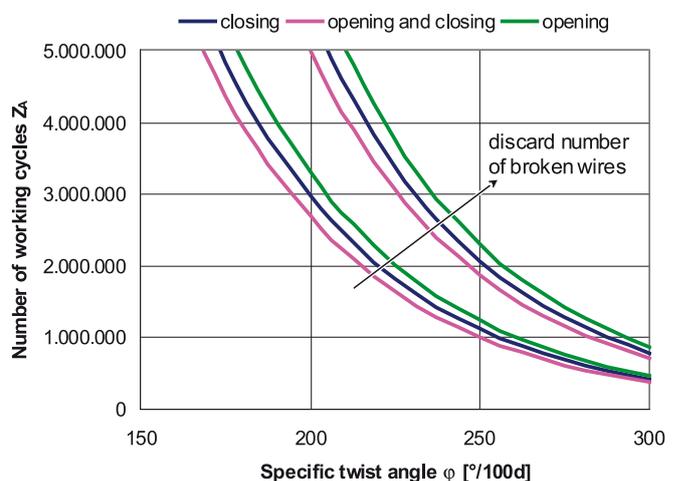


Fig. 6: Influence of discard number of broken wires to number of working cycles.

**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem**

Tel.: 0941 943-5163

Fax: 0941 943-1428

ulrich.briem@maschinenbau.fh-regensburg.de

## 5 CONCLUSION

Oscillating or pulsating rope twist limits the service life of ropes because it leads to material fatigue. Tests on a special torque test rig were carried out to investigate that kind of fatigue and to detect the most important parameters which affect the expected service life. In all tests the progressing rope deterioration has been shown by internal broken wires. All ropes which are subjected to torsion fatigue will fail from the inside as noticed in practice too.

The direction of rope twist (rope closing, rope opening or rope opening and closing with half angle each) has a significant influence on rope deterioration. The smallest influence has rope twists in opening sense followed by rope twists in closing sense. The greatest influence has rope twists in opening and closing sense.

The number of broken wires after a certain number of torque cycles increases with increasing rope twist angle. The relationship between these parameters can be described by using equation (1).

Likewise the number of broken wires for a certain cyclic rope twist increases with increasing number of torque cycles. The relationship between these parameters can be described by using equation (2).

The dependence of number of broken wires on the three parameters direction of rope twist, rope twist angle and number of torque cycles can be described by using equation (3). Resolved to number of torque cycles a conditional equation for the expected number of torque cycles will be created, equation (4).

By knowing the cyclic rope twist in the shaft – it depends on the shaft and load parameters – and the discard number of broken wires – it varies from country to country – the expected service life could be calculated with help of equation (5).

## 6 ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank CASAR Drahtseilwerk Saar GmbH for design and fabrication of test rig as well as for providing test ropes. Also he would like to thank people of test field for making the tests as well as for analysing rope samples.

## 7 REFERENCES

- Briem 2006: Tension-tension behaviour of 8-strand ropes. OIPEEC Conference; Athens March 2006, pp. 223 to 230
- Feyrer 1995: Seillebensdauer unter Zugschwellbelastung. OIPEEC Technical; Meeting Stuttgart Sept. 1995, pp. 2-1 to 2-10
- Feyrer 2000: Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit. 2. Auflage, Berlin: Springer; Verlag, 1994, ISBN 3-540-67829-8
- Haibach and Fuchs 1985: Zur Betriebsfestigkeit von Förderseilen auf Koepe-Anlagen. DRAHT 36 (1985) 5, S. 232–236
- Klöpfer 2002: Untersuchung zur Lebensdauer von zugschwellbeanspruchten Drahtseilen. Diss. University of Stuttgart 2002

## PROJEKT WINDMAN

### EINLEITUNG

Die beeindruckende Entwicklung der Computertechnik in den vergangenen 25 Jahren macht es möglich, immer detailliertere und umfangreichere Klimamodelle zu simulieren. Für eine exakte Vorhersage ist dabei ein möglichst großes Wissen über den aktuellen klimatischen Zustand zwingend erforderlich. Insbesondere in nicht oder nur sehr dünn besiedelten Gebieten (z.B. Ozeane, Arktis), in größeren Höhen über Grund und in strömungsmechanisch schwer zu modellierenden Gegenden (z.B. Hochgebirge) gab es bisher kaum die Möglichkeit ausreichend Messwerte für eine repräsentative Zustandsschätzung zu erhalten.

Um dem entgegen zu kommen, wurde vor etwa einem Jahr im Labor Windkanal/Strömungsmesstechnik (Leitung Prof. Dr.-Ing. Lämmlein) das Projekt WindMAN ins Leben gerufen. Ziel dabei ist es, zusätzliche Daten über Temperatur, Luftfeuchtigkeit und die Luftströmung mit Hilfe einer fliegenden Messplattform zu erfassen und dadurch die Datenbasis für Simulationen zu ergänzen. Im Gegensatz zu vergleichbaren Projekten die sich ebenfalls mit diesem Thema beschäftigen (z.B. M<sup>2</sup>AV T200 der TU Braunschweig), wird beim Projekt WindMAN der Schwerpunkt auf möglichst geringe Gesamtkosten und zivil zugängliche Einzelkomponenten gelegt. Dadurch soll ein möglichst einfacher, großräumiger Einsatz erleichtert werden.

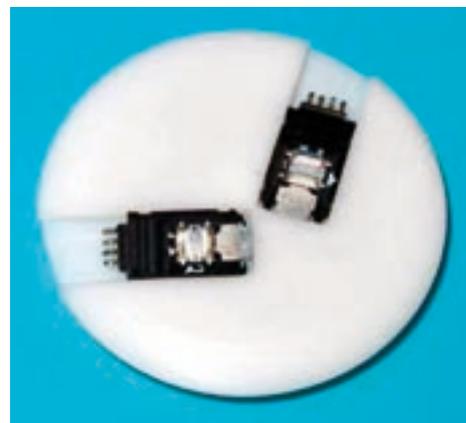
### UMSETZUNG

Während der bisherigen Entwicklung wurden drei Diplomarbeiten und eine Masterarbeit zu unterschiedlichen Teilaspekten des Projektes durchgeführt:

### MESSTECHNIK

Während bei anderen Projekten meist Fünfflochsonden oder mehrere Flügelradanemometer zur Bestimmung des Windvektors eingesetzt werden, sollte beim Projekt WindMAN auf etablierte Technik aus der Automobilbranche zurückgegriffen werden. Luftmassensensoren auf Basis der Heißfilm-Anemometrie finden hierfür Verwendung. Diese werden seit einigen Jahren in Verbrennungsmotoren eingesetzt um die Menge des zu verbrennenden Treibstoffes bestmöglich, im Sinne des Wirkungsgrades, zu steuern. In der Masterarbeit „Messtechnische Eignung von Kraftfahrzeugluftmassenmessern als richtungsabhängige Strömungsmesssonden“ (G. Schmitz) wurde nachgewiesen, dass sich solche Sensoren ebenfalls für die Bestimmung des Strömungsvektors eignen. Hierfür verwendete wurden zwei geringfügig mechanisch modifi-

zierte Sensoren der Firma Siemens VDO vom Typ SIMAF verwendet. Diese werden gemeinsam auf einem definierten Sondenträger montiert. Dieser wegen seiner Form als „UFO“ bezeichnete Träger kann sehr einfach auf die fliegende Messplattform montiert werden. Abbildung 1 zeigt solch einen Sondenträger bestückt mit zwei SIMAF Sensoren.



**Abbildung 1:**  
Sondenträger  
„UFO“, bestückt  
mit zwei SIMAF  
Sensoren

### DATENAUFZEICHNUNG

Da eine Flugphase nur etwa 20 bis 30 Minuten dauert, ist es völlig ausreichend, die Messwerte während des Fluges aufzuzeichnen und im Anschluss auszuwerten. Eine Auswertung in Echtzeit ist nicht notwendig wodurch sich eine Funkübertragung einsparen lässt. Stattdessen wird beim Projekt WindMAN ein Flugdatenrekorder der Firma Eagle Tree Systems eingesetzt. Dieser enthält bereits einen barometrischen Höhensensor, vier AD-Wandler Kanäle, einen Temperatursensor sowie die Möglichkeit ein GPS Modul direkt anzuschließen. Außerdem besteht die Möglichkeit den FDR direkt mit der USB Schnittstelle eines Rechners zu verbinden um die Messwerte zu übertragen.



### DATENAUFBEREITUNG

Um aus den aufgezeichneten Spannungsverläufen wieder den Windvektor zu erhalten, ist es notwendig unter kontrollierten Bedingungen eine Kalibrierung im Windkanal durchzuführen.

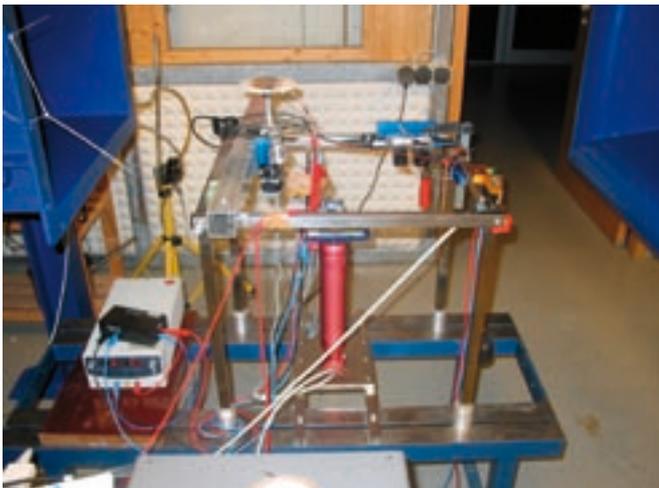


Abbildung 3: Messaufbau

ren. Abbildung 3 zeigt den gesamten Messaufbau. Hierbei werden im Winkelbereich von +/- 30 Grad und im interessanten Geschwindigkeitsbereich von 5 bis 45 m/s Kalibriermessungen durchgeführt: Man erhält wie in Abbildung 4 dargestellte Verläufe. Fehlende Zwischenwerte werden dabei mittels Polynomen interpoliert.

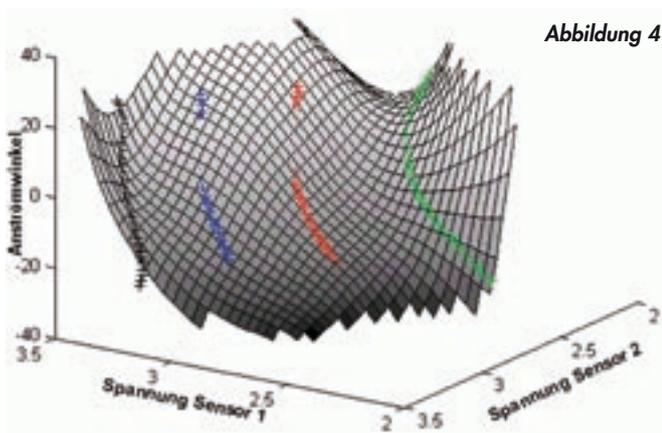


Abbildung 4

Mit Hilfe des in Abbildung 5 dargestellten Zusammenhanges zwischen gemessenem Windvektor und GPS Flugkurs kann im Anschluss der tatsächliche Windvektor bestimmt werden.

**DATENAUSWERTUNG**

Um diese Aufgaben automatisiert ablaufen zu lassen, wurde in Matlab eine spezielle Software entwickelt, welche direkt die Daten des FDR einlesen kann. Als Ausgabeformat bietet

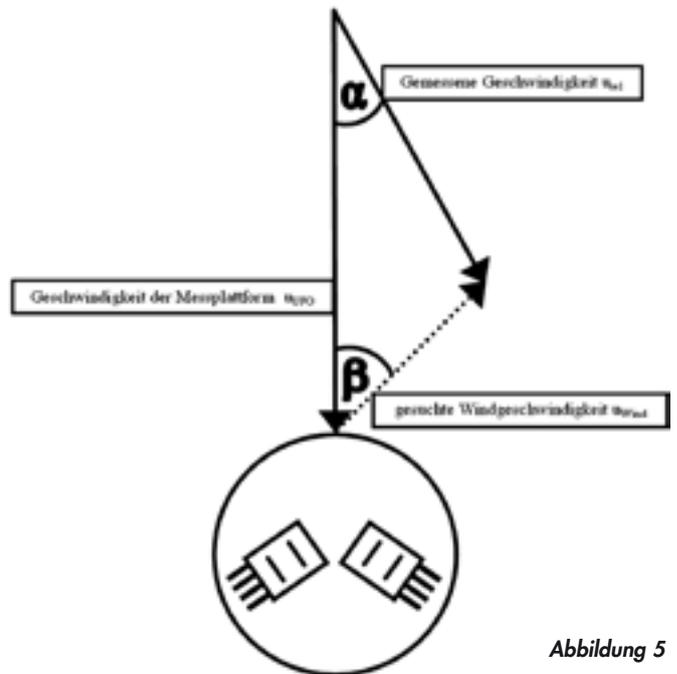


Abbildung 5

dieses Programm die Möglichkeit die aufbereiteten Daten direkt in einem Excel kompatiblen Austauschformat abzuspeichern oder alternativ direkt eine Grafik zu erzeugen. Abbildung 6 zeigt die Darstellung als Ekman Spirale.

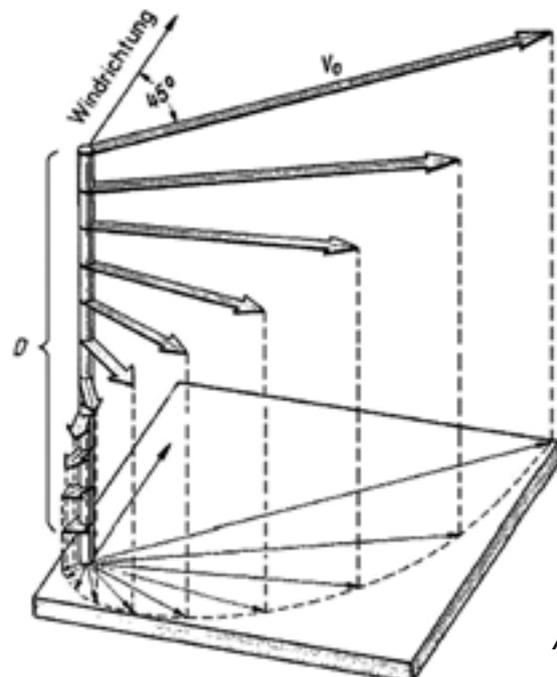
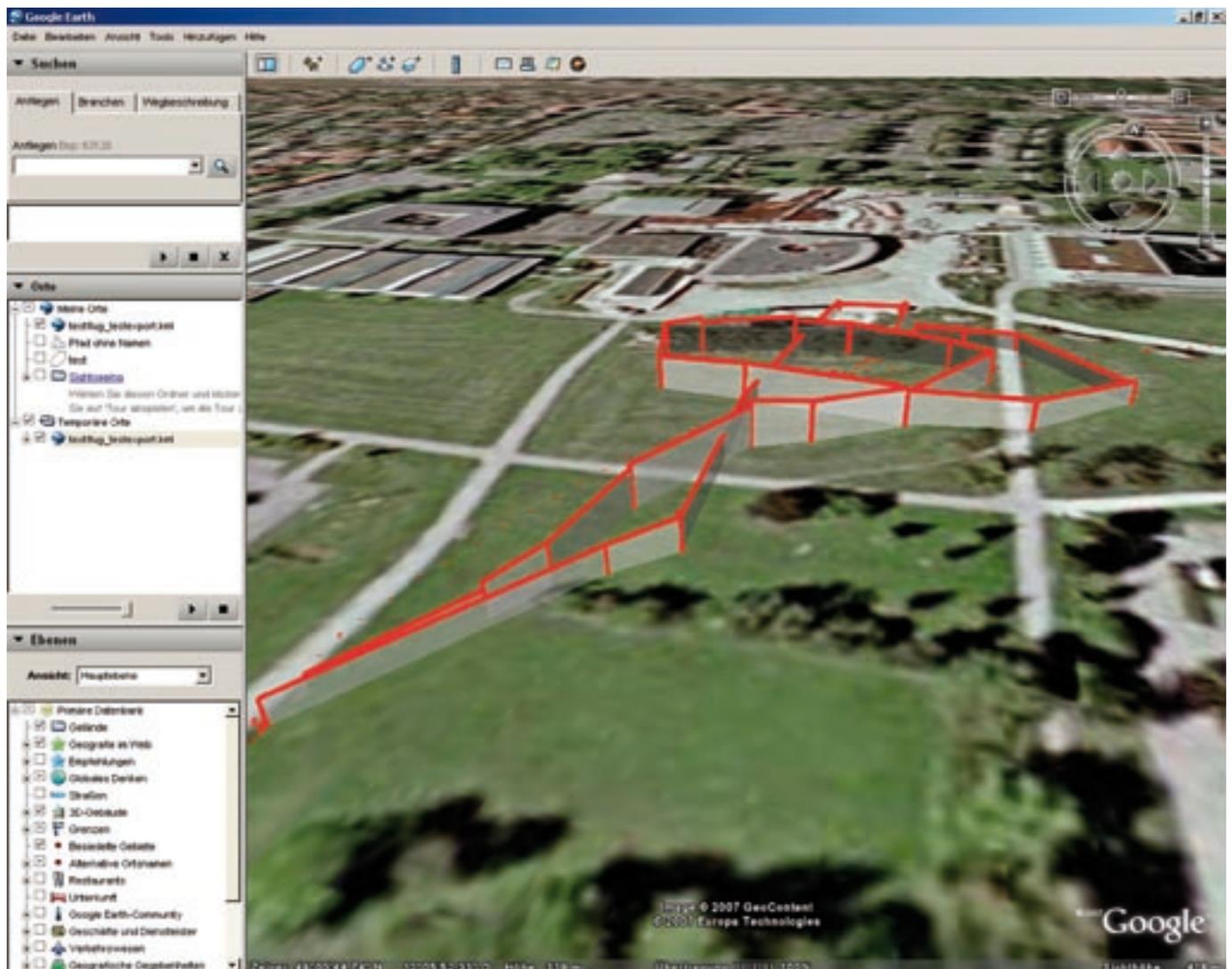


Abbildung 6

**Prof. Dr.-Ing. Stephan Lämmlein**  
 Tel.: 0941 943-5155  
 Fax: 0941 943-1428  
 stephan.laemmlein@maschinenbau.fh-regensburg.de



Hierbei wird der durchschnittliche Windvektor über der Höhe über Grund aufgetragen. Zusätzlich bietet es sich an die Flugbahn mit Google Earth darzustellen (siehe Abbildung).

## AUSBLICK

Derzeit befindet sich das Projekt WindMAN im Teststadium, d.h. es werden eine Reihe von Testflügen durchgeführt um die Praxistauglichkeit der verwendeten Komponenten, insbesondere der Strömungssensoren, und der Software zu überprüfen.



## Jede vierte Flasche auf der Welt

Die Entwicklung neuer Technologien und das permanente Optimieren von Abfüll- und Verpackungsmaschinen haben bei KRONES Tradition. Mit unseren Innovationen setzen wir Maßstäbe für die Märkte der Zukunft. Und der Erfolg gibt uns recht: Jede vierte Flasche, die weltweit geöffnet wird, ist auf einer KRONES Anlage gefüllt, etikettiert oder verpackt worden.

DIPL.-ING. (FH) CHRISTINA ARTMANN, DIPL.-ING. (FH) MARTIN BOCK, DIPL.-ING. (FH) TOBIAS BRAUN,  
 DIPL.-ING. (FH) MARKUS HELDMANN, DIPL.-ING. (FH) THOMAS HOFHERR, PROF. DR.-ING. HANS-PETER RABL

## THERMODYNAMISCHE AUSLEGUNG DER 2-STUFIGEN ABGASTURBOAUFLADUNG FÜR EINEN OTTOMOTOR MIT DIREKTEINSPRITZUNG FÜR BENZIN UND ETHANOLE85-BETRIEB IM RAHMEN EINES DOWNSIZING-KONZEPTE

### 1 MOTIVATION UND POLITISCHE GRUNDLAGEN

#### 1.1 Motivation für das Forschungsprojekt

Kein Thema wurde in den letzten Jahren so ausführlich diskutiert wie die globale Erwärmung und der Klimawandel. Vor allem die Veröffentlichungen des „Intergovernmental Panel of Climate Change“ (IPCC) führen zu weltweiten Diskussionen über dieses Thema.

Der IPCC, der auch als „Weltklimarat“ bekannt ist, erforscht die Ursachen und Folgen der Erderwärmung und fasst den aktuellen Kenntnisstand in ihren Klimaberichten zusammen, die in regelmäßigen Abständen veröffentlicht werden. Außerdem werden in diesen Berichten Abhilfe-Maßnahmen diskutiert, um der weiteren Erwärmung vorzubeugen. Für seine Arbeit wurde der IPCC im Dezember 2007, zusammen mit Al Gore, dem ehemaligen Vize-Präsidenten der USA, mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet.

Als Hauptursache für die globale Erwärmung nennt der IPCC in seinem Klimabericht den vermehrten Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). [1]

Dieses Gas wird hauptsächlich bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugt. In den dadurch entstandenen Diskussionen geriet vor allem die Automobilindustrie, die als eine der Hauptverursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen gilt, zunehmend in Kritik. Als Reaktion auf die vermehrten Vorwürfe, verabschiedete die „European Automobile Manufacturers' Association“ (ACEA), ein Zusammenschluss der europäischen Automobilhersteller, eine Selbstverpflichtung zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf 140 g CO<sub>2</sub>/km im Flottendurchschnitt bis zum Jahr 2008. Abbildung 1 zeigt die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und die ACEA-Zielsetzung für den Zeitraum von 1995 bis 2015.

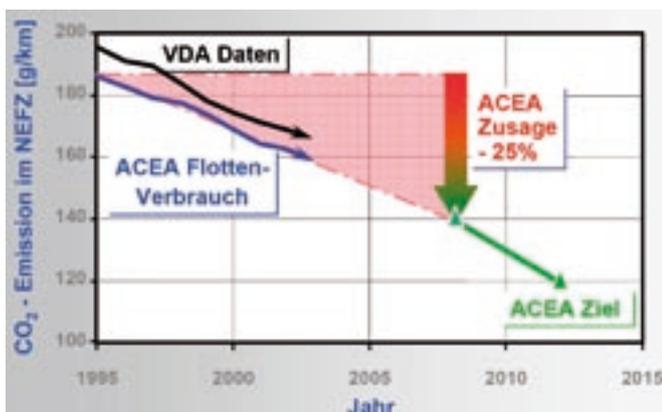


Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Flottendurchschnitt und ACEA-Selbstverpflichtung [2]

Da der CO<sub>2</sub>-Ausstoß auch direkt mit dem Kraftstoffverbrauch korreliert, werden verbrauchsgünstige Fahrzeuge nicht nur aufgrund der genannten Klimaproblematik immer interessanter für die Bevölkerung. Auch die ständig steigenden Kraftstoffpreise sind ein immer wichtiger werdender Faktor, der für verbrauchsgünstige Fahrzeuge spricht.

Zwei alternative Antriebssysteme für Fahrzeuge, die immer öfter diskutiert werden, sind der Hybridantrieb und die Brennstoffzelle. Aber aufgrund der großen Anzahl von Vorteilen der Verbrennungsmotoren gegenüber den sogenannten alternativen Antriebskonzepten wird der Marktanteil der Verbrennungsmotoren in den nächsten Jahren trotzdem nur geringfügig abnehmen, was auch in Abbildung 2 dargestellt ist.

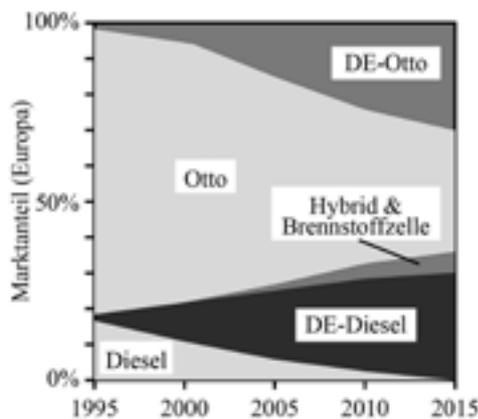


Abbildung 2: Marktanteil der verschiedenen Antriebssysteme [3]

Die oben beschriebene Problematik stellt deshalb große Anforderungen an die Automobilindustrie und insbesondere die Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Im Fokus der Entwicklungen steht somit die Verbindung von neuen Technologien mit den bereits bestehenden Systemen, um die steigenden Anforderungen in Bezug auf den Klimaschutz und die abgasgesetzlichen Vorgaben zu erfüllen.

Im Hinblick auf die neuen Herausforderungen bei der ottomotorischen Weiterentwicklung im Sinne der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und der damit verbundenen Verbrauchsreduzierung wurde im Frühjahr 2007 im Rahmen der im Masterstudiengang „Mechanical Engineering“ durchgeführten Entwicklungs- und Projektarbeit das Projekt „Niedrig-CO<sub>2</sub>-Emissions-Konzept für Ottomotoren: Kombination von 2-stufiger Abgasturboaufladung mit Ethanol-(E85)-Direkteinspritzung“ an der Hochschule Regensburg gestartet.

Im Zentrum der Arbeit steht hierbei das „Downsizing“ des Motors in Verbindung mit Abgasturboaufladung und Direkteinspritzung. Ziel ist es, dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Motorbetriebspunktverlagerung in Bereiche eines

niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauchs zu senken, ohne dabei die Leistung gegenüber einem normalen Saugmotor zu mindern.

Um jedoch die geforderten CO<sub>2</sub>-Grenzwerte zu erreichen, wird es notwendig, das Aufladekonzept in ein Hochaufladekonzept mittels 2-stufiger Abgasturboaufladung weiter zu entwickeln. Zusätzlich soll der biogene Kraftstoff Ethanol, beziehungsweise E85 (85% Ethanol, 15% Benzin), der durch seine höhere Klopfestigkeit einen wesentlich höheren Aufladegrad zulässt, eingesetzt werden.

Dieses System bietet ein Potential der CO<sub>2</sub>-Ausstoß-Reduzierung von bis zu 40%. [4]

### 1.2 Gesetzliche Grundlagen

Aufgrund der Problematik des Klimawandels und der dadurch entstandenen Diskussionen in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Kraftfahrzeuge, hat die EU-Kommission mehrere Gesetze verabschiedet, die die Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen beschränken. Aktuell werden auch Gesetzesvorlagen diskutiert, die insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen beschränken sollen.

Als zukünftige Abgasnorm wurden die Euro5-Grenzwerte festgelegt, die im September 2009 in Kraft treten werden. Diese limitieren besonders stark die NO<sub>x</sub>-Emissionen.

	CO [mg/km]	HC [mg/km]	NO <sub>x</sub> [mg/km]		
<b>Euro 4</b> 1.01.2005	1000	100	80		
		THC [mg/km]	NMHC [mg/km]	NO <sub>x</sub> [mg/km]	PM [mg/km]
<b>Euro 5</b> 01.09.2009	1000	100	68	60	5,0

Abbildung 3: Benzin-Abgasnorm Euro4 und Euro5 [5]

Da die Automobilhersteller die freiwillige ACEA-Verpflichtung bis 2008 nicht erfüllt haben, soll zusätzlich zu dieser Abgasnorm ein eigener Grenzwert für die CO<sub>2</sub>-Emissionen eingeführt werden. Dieser soll ab 2012 den CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf maximal 130 g CO<sub>2</sub>/km über den Flottendurchschnitt begrenzen. Da die Nichteinhaltung dieses Grenzwerts mit Bußgeldern belegt sein könnte, steigt nun auch das Interesse der Automobilhersteller diese Vorgaben zu erfüllen. [6]

## 2 GRUNDLAGEN DER ABGASTURBOAUFLADUNG

### 2.1 Downsizing – Grundlagen und Vorteile

Unter „Downsizing“ werden Verfahren zusammengefasst, durch die bei einer Verringerung des Hubraums gleiche Werte bezüglich des Fahrverhaltens wie beim Ausgangsmotor erreicht werden. Dadurch wird der Motor bei höherer Last und somit „entdrosselter“ betrieben. Dies führt zur Verlagerung des Betriebspunktes hin zu Betriebspunkten mit geringerem spezifischen Kraftstoffverbrauch.

Die einzelnen Maßnahmen, und die damit erzielbaren Erfolge im Vergleich zu leistungsgleichen Motoren mit großem Hubraum sind in Abbildung 4 zusammengefasst.

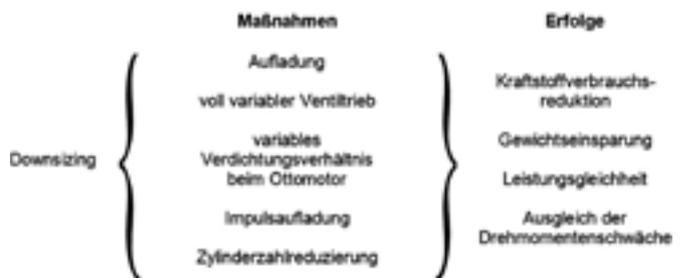


Abbildung 4: Downsizing – Maßnahmen - Erfolge [7]

Eine weitere sehr Erfolg versprechende Maßnahme zur Kraftstoffreduzierung in Zusammenhang mit der Turboaufladung ist der Betrieb des Motors im Schichtladebetrieb. Hier entfernt man sich von der Qualitätsregelung des Ottomotors und einem stöchiometrischen Motorbetrieb ( $\lambda \approx 1$ ). Die angesaugte Luft wird im Schichtladebetrieb nicht mehr durch die Drosselklappe gedrosselt, wobei Drosselverluste stark reduziert werden. Der Kraftstoff wird nun – wie bei einem Dieselmotor – in die, im Verbrennungsraum komprimierte Luft, gespritzt. So betreibt man den Motor mit einer Quantitätsregelung, wobei abhängig von der Belastung des Motors die Einspritzmenge geregelt wird.

### 2.2 Einstufige Abgasturboaufladung

Bei der Abgasturboaufladung ist die Verdrängungsmaschine „Motor“ mit der Strömungsmaschine „Abgasturbolader“ thermodynamisch gekoppelt. Die Turbine des Abgasturboladers wird durch den Abgasmassenstrom angetrieben, was dazu führt, dass die Luft im Ansaugtrakt durch das Verdichterrad, das mit dem Turbinenrad durch eine gemeinsame Welle ver-

bunden ist, komprimiert wird. Durch den Ladeluftkühler wird die durch die Kompression erwärmte Luft wieder gekühlt, um die Leistungsdichte zu erhöhen und die Spitzentemperaturen im Verbrennungsraum zu senken, wodurch eine Reduktion der Emissionen erreicht wird.

Bei der einstufigen Turboaufladung wird das Turbinenrad des Abgasturboladers bewusst für Massenströme ausgelegt, die nicht den ganzen Drehzahlbereich des Motors abdecken, um das Massenträgheitsmoment des Läufers, zu dem das Turbinenrad aus einer Stahl-Nickel-Legierung einen erheblichen Beitrag leistet, zu reduzieren. Ein zu hohes Massenträgheitsmoment führt zu einem schlechten Ansprechverhalten des Turboladers, was unter dem Begriff Turboloch bekannt ist.

Aus diesem Grund wird der Turbolader bei Ottomotoren so ausgelegt, dass der maximale Ladedruck bereits bei etwa 40 % der Motornendrehzahl erreicht wird. [8]

Der restliche Abgasstrom wird über einen Bypasskanal (sog. „Wastegate“) ungenutzt an der Turbine vorbei in den Abgaskanal geleitet.

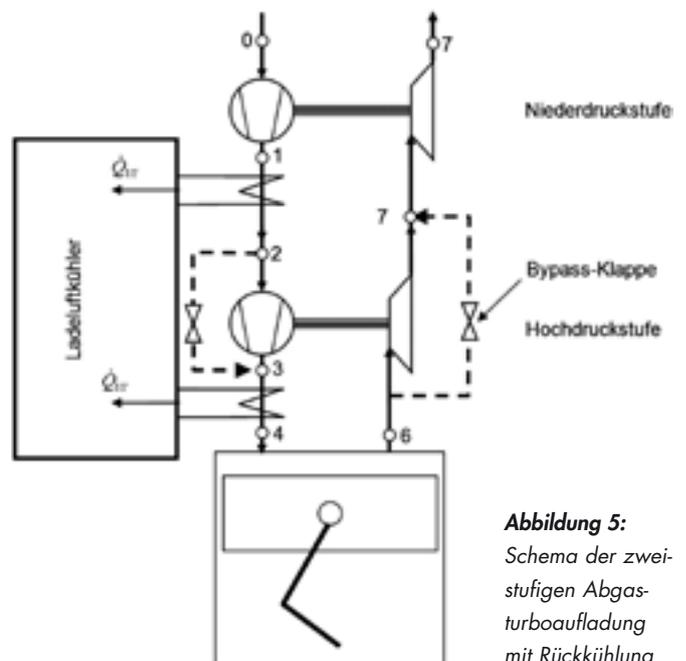
Um dies zu umgehen, geht der Trend bei Motoren im größeren Hubraumbereich zu einer zweistufigen Aufladung.

### 2.3 Zweistufige Abgasturboaufladung

Um eine bessere Nutzung der Abgasenergie und hohe Ladedrücke bei niedrigen Motordrehzahlen zu erreichen, wird bei einem zweistufigen Aufladungskonzept der Turbolader mit zwei Läufern, d.h. jeweils zwei Verdichter- und Turbinenrädern, ausgestattet.

Bei der klassischen zweistufig geregelten Aufladung werden zwei Turbolader in Serie angeordnet: ein „großer“ Niederdruck-Abgasturbolader und ein „kleinerer“ Hochdruck-Abgasturbolader sind in Reihe angeordnet (Abbildung 5).

Bei geringen Motordrehzahlen wird der komplette Abgasstrom über die Hochdruckstufe geleitet, wobei die Bypass-Klappe geschlossen ist. Die Turbine der Niederdruckstufe dreht sich dabei nur mit geringer Drehzahl und trägt nicht zum Ladedruckaufbau bei. Mit steigender Motordrehzahl öffnet sich Schritt für Schritt die Bypass-Klappe und der Abgasstrom wird an der Hochdruckstufe vorbei direkt an die Niederdruckstufe geleitet, bis bei Vollast der gesamte Ladedruck von der Niederdruckstufe bereitgestellt wird. Mit dieser Strategie kann der kleine Turbolader für kleinste Massenströme ausgelegt werden, der volle Ladedruck steht bereits im unteren Drehzahlbereich des Motors zur Verfügung und der gesamte Abgasstrom des Motors wird für die Aufladung des Motors genutzt.



**Abbildung 5:**  
Schema der zweistufigen Abgasturboaufladung mit Rückkühlung

## 3 DIREKTEINSPRITZUNG MIT BENZIN- UND ETHANOLBETRIEB

### 3.1 Direkteinspritzung – Grundlagen

Bei Verbrennungsmotoren gibt es zwei Möglichkeiten, den Kraftstoff in den Zylinder einzuspritzen:

- Saugrohreinspritzung
- Direkteinspritzung

Da der im Projekt verwendete Motor mit Benzin-Direkteinspritzung arbeitet, wird hier nur auf diese genauer eingegangen. Bei der Direkteinspritzung wird der Kraftstoff unter hohem Druck direkt in den Brennraum eingespritzt. Diese Methode hat gegenüber der Saugrohreinspritzung zwei wesentliche Vorteile:

- Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im Schichtladebetrieb
- Reduzierung der Klopfneigung bei Vollast

Bei der Direkteinspritzung können zwei unterschiedliche Brennverfahren realisiert werden: Homogene Gemischbildung oder Schichtladebetrieb. Im Homogenbetrieb erfolgt die Einspritzung während des Saughubs und die Gemischbildung wird durch gezielte Ladungsbewegung unterstützt, so dass über den gesamten Brennraum nur geringe Lambdaunterschiede auftreten. Im Gegensatz dazu wird im Schichtladebetrieb der Kraftstoff während des Kompressions-

hubs eingespritzt und dadurch eine sogenannte Ladungsschichtung im Brennraum erzielt. Dies bedeutet, dass global das Gemisch sehr mager ist, und nur in der Nähe der Zündkerze lokal ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch ( $\lambda \approx 1$ ) erreicht wird. Direkteinspritzung mit Schichtladung ermöglicht eine Kraftstoffverbrauchsreduzierung im Teillastbetrieb des Motors um bis zu 20 %. [9]

### 3.1 Unterschiede im Benzin- und Ethanolbetrieb

Neben der 2-stufigen Abgasturboaufladung soll in diesem Projekt der Betrieb eines Ottomotors mit Direkteinspritzung mit Ethanol (E85) realisiert werden.

Da Ethanol andere physikalische Eigenschaften als Benzin hat, muss die Motorsteuerung für den Betrieb mit Ethanol angepasst werden. So hat Ethanol z.B. einen höheren Sauerstoffanteil als Super-Benzin, was zu einem geringeren Heizwert führt. Der geringere Heizwert von Ethanol resultiert in einem höheren volumetrischen Kraftstoffverbrauch, was durch eine höhere Einspritzmenge berücksichtigt werden muss. Die physikalischen Eigenschaften von Ethanol und Super-Benzin sind in Abbildung 6 dargestellt.

Ein weiterer kritischer Punkt bei der Verwendung von Ethanol als Kraftstoff ist die Tatsache, dass Ethanol wesentlich aggressiver ist als Benzin und deshalb die Kraftstoff führenden Teile am Motor so ausgelegt werden müssen, dass sie beim Betrieb mit Ethanol keinen Schaden nehmen.

Die Vorteile von Ethanol gegenüber Benzin liegen in der höheren Klopfestigkeit, wodurch höhere Drücke im Brennraum realisiert werden können, was sich vor allem für den aufgeladenen Betrieb des Motors positiv auswirkt. Die Oktanzahl von reinem Ethanol (E100) liegt bei etwa 111, was verglichen mit Super Benzin (ROZ = 95) sehr hoch ist.

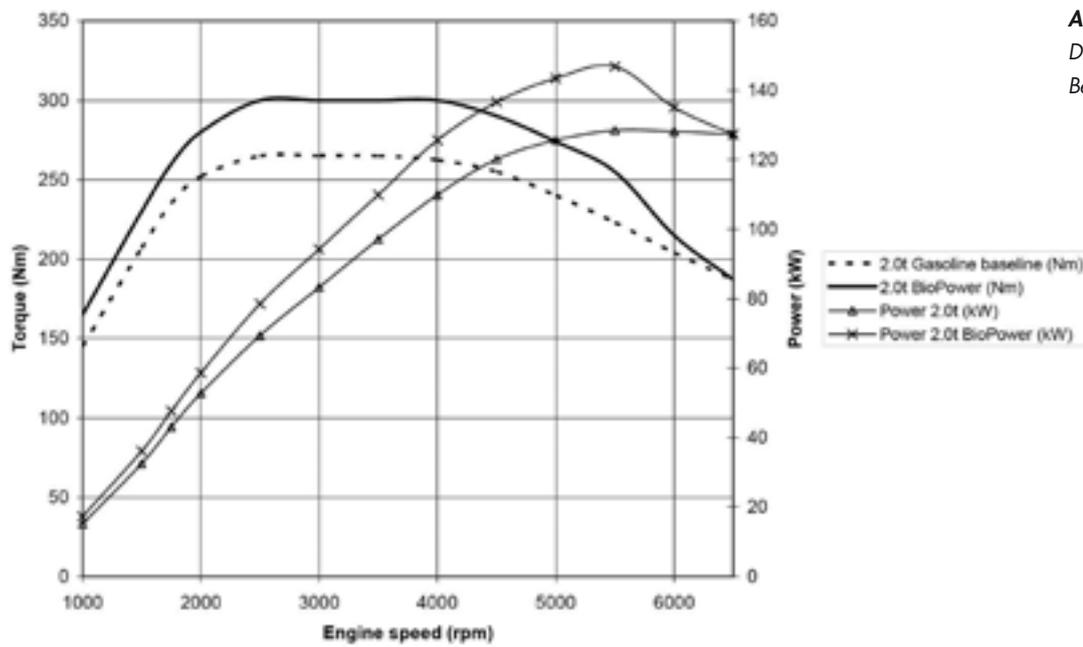
Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Ethanol als Kraftstoff ist die höhere Verdampfungswärme von Ethanol, die sich in einem Anstieg bei Drehmoment und Leistung mit einem steigenden Ethanolgehalt im Kraftstoff bemerkbar macht.

Abbildung 7 zeigt das Drehmoment und die Leistung des neuen Saab Ecotec BioPower 2.0t Motors jeweils für Benzin- und Ethanolbetrieb. Diese und andere Messungen zeigen, dass sowohl Leistung als auch Drehmoment eines Motors um über 10 % gesteigert werden können, wenn als Kraftstoff E85 statt Super-Benzin verwendet wird.

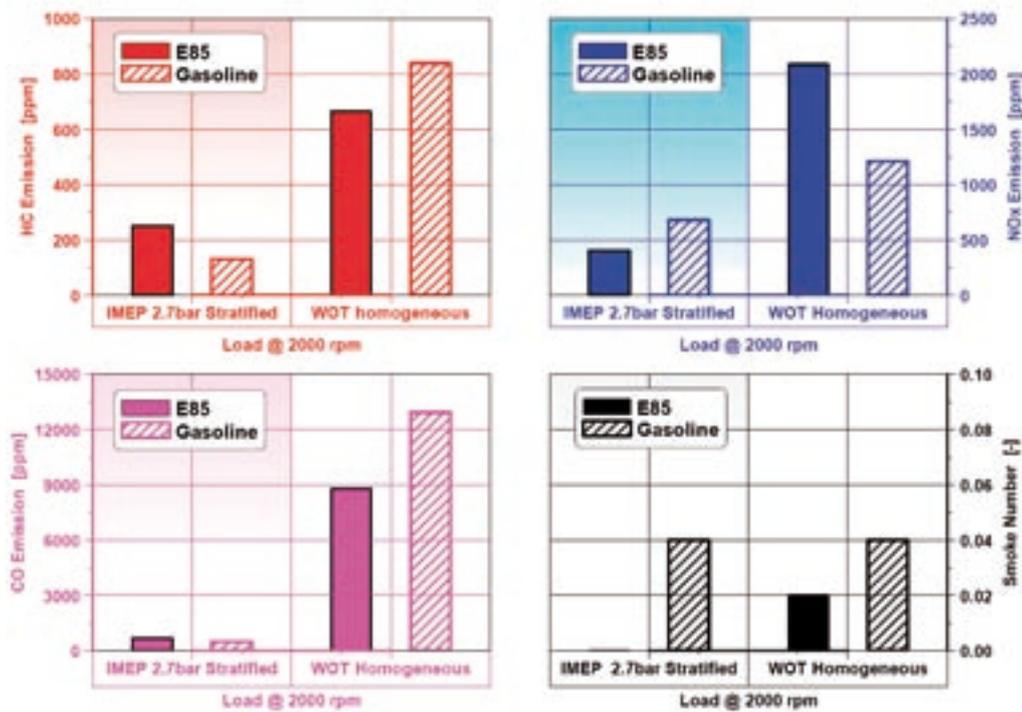
Außer auf die Drehzahl und Leistung wirkt sich der Einsatz von Ethanol zusätzlich positiv auf die Emissionen aus. So können die CO-, CO<sub>2</sub>- und die NO<sub>x</sub>-Emissionen stark reduziert werden. Abbildung 8 zeigt die entstehenden Emissionen für Normalbenzin und E85 im geschichteten Teillastbetrieb (IMEP 2,7 bar) und im Homogenbetrieb bei Vollast (WOT = Wide Open Throttle). Daraus wird ersichtlich, dass sich sowohl durch den Schichtladebetrieb als auch durch den Einsatz von E85 enorme Emissionsvorteile ergeben.

Eigenschaft	Einheit	Ethanol	Super-Benzin
Chemische Formel		C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	
C/H/O-Zusammensetzung	Mass.-%	52,2/13,0/34,8	84/14/2
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	798,4	725...780
Heizwert	MJ/m <sup>3</sup>	21,2	31,7
Stöch. Luftbedarf	kg Luft/kg Kraftstoff	9,0	14,7
Siedetemperatur	°C	78,5	25...215
Dampfdruck	hPa	16	60-90 (Winter) 45-60 (Sommer)
Verdampfungswärme	kJ/kg	904	380...500
Oktanzahl	ROZ	111	95
$\lambda$ - Zündgrenze	-	0,3...2,1	0,4...1,4

**Abbildung 6:**  
Physikalische Eigenschaften von Ethanol und Super-Benzin [10]



**Abbildung 7:**  
Drehmoment und Leistung im Benzin- und Ethanolbetrieb [11]



**Abbildung 8:**  
Abgasemissionen im Benzin- und Ethanolbetrieb [12]

## 4 PRÜFSTAND

Um das Motorbetriebsverhalten und somit den Gütegrad des Downsizing-Konzeptes, Abgasturboaufladung mit Direkteinspritzung für Benzin und Ethanol-E85-Betrieb, im Hinblick auf Leistungs- und Drehmomentenspektrum, Ansprechverhalten und Kraftstoffverbrauch abstimmen und beurteilen zu können, sind Applikationsarbeiten und Messungen am Motorprüfstand notwendig. Des Weiteren dienen solche Messungen zur Validation des parallel in GT-Power erstellten Motorsimulationsmodells, das eine weitere Entwicklung und Optimierung des genannten Motor-Konzeptes unterstützen soll.

Für die Durchführung dieser Mess- und Applikationsaufgaben steht an der Fakultät Maschinenbau im Labor für Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung ein moderner Motorenprüfstand mit hochdynamischer Belastungseinheit und Präzisionskraftstoffmessanlage von der AVL List GmbH zur Verfügung (Abbildung 9). Als Prüflingsmotor wird ein direkteinspritzender, 1,8 Liter Reihenvierzylinder eingesetzt. Durch Modifikationsarbeiten wird, anstelle der serienmäßigen mechanischen Aufladung, das Abgasturboauflade-Konzept realisiert.



Abbildung 9: Motorprüfstand mit Prüfzelle und Leitstand

### 4.1 Messtechnik am Prüfstand

#### 4.1.1 Standard-, Applikations- und motorspezifische Messtechnik

Für eine genaue Bilanzierung der Motorbetriebspunkte und den möglichst exakten Abgleich der Motorprozesssimulation, müssen neben den generell vom Prüfstandssystem erfassten Messgrößen, wie Drehzahl, Drehmoment und Kraftstoffverbrauch, weitere Messwerte erfasst werden. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die sog. „Standardmesstechnik am Motorprüfstand“, zu der im Wesentlichen die Temperatur- und Drucksensoren gehört. Mit Hilfe von aktuell 26 Temperatur- und 8 Drucksensoren, werden wichtige Temperaturen und Drücke im Ansaug- und Abgastrakt des Prüflings erfasst und stehen somit zur Datenaufzeichnung und anschließender Auswertung am Prüfstandssystem bereit.

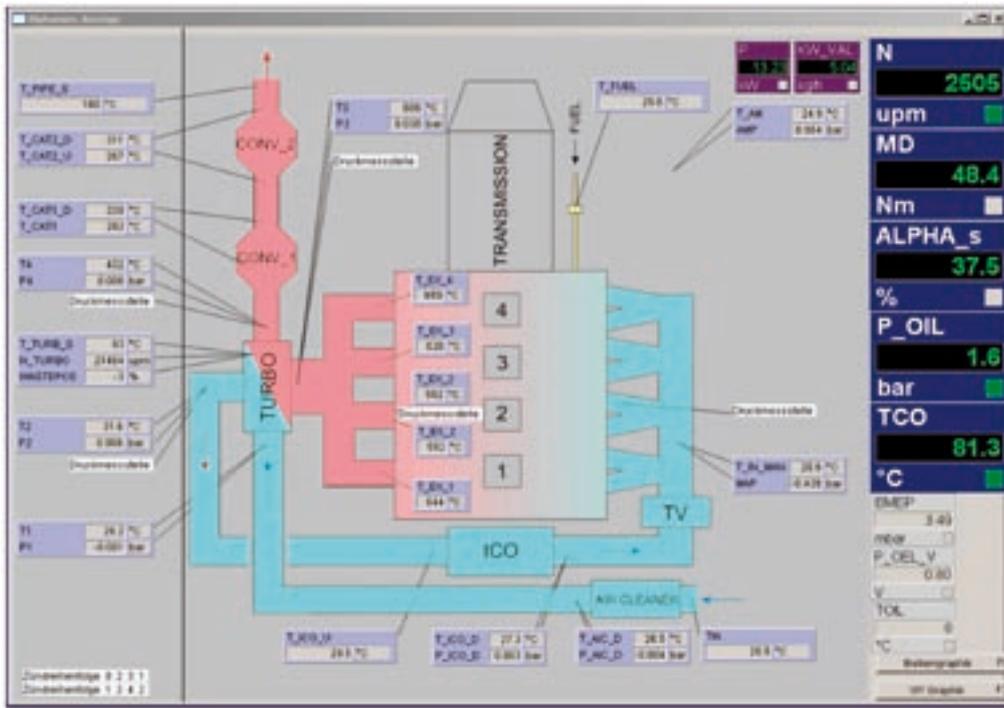
Im Hinblick auf das Motor-Konzept, ergibt sich ein weiterer Bedarf an motorspezifischer Messtechnik. Hierzu zählen vor allem die Aufnehmer zur Messung der Turboladerdrehzahl und der Wastegate-Stellung.

Abbildung 10 zeigt die Messoberfläche des Prüfstandssystems, anhand der die Positionen der genannten Sensoren entnommen werden können.

Als weiteres wichtiges Instrument am Motorprüfstand wird das Applikationssystem GREDI der Kleinknecht Automotive GmbH eingesetzt. Dadurch wird es ermöglicht auf das Motorsteuergerät zuzugreifen und Parameter sowie Kennfelder zu verändern und neu zu bedaten. Diese Möglichkeit ist im Hinblick auf die Turboladerapplikation in der Motorsteuerung von größter Bedeutung, wofür die Spezifikation der Steuergerätesoftware als Grundlage dient. Im Weiteren können mit Hilfe des Applikationssystems wichtige motorsteuerungsinterne Messwerte und Rechengrößen (z.B. Luftmasse, Zündwinkel, Drosselklappenstellung, ...) an das Prüfstandsystem übergeben und aufgezeichnet werden.

#### 4.2.2 Indiziermesstechnik

Für die Beurteilung der thermodynamischen Güte des Verbrennungsprozesses sowie zur Abstimmung von Motorkennfeldern ist in der modernen Motorentwicklung eine Hoch- und Niederdruckindizierung des Prüflings nicht mehr wegzudenken. Auch liefern die Indiziermessungen nennenswerte Informationen im Hinblick auf den Zylinderdruckverlauf und die vorhandenen Druckschwingungen im Ein- und Auslasstrakt des Verbrennungsmotors, um diese im Simulationsmodell bestmöglich nachbilden zu können.



**Abbildung 10:**  
Messoberfläche des  
Prüfstandsystems

Aus Abbildung 11 können die Positionen der Hoch- und Niederdruckindizierung des Prüfmotors entnommen werden.

Art	Messtellenbezeichnung
Hochdruck	Zylinderdruck 1
Hochdruck	Zylinderdruck 2
Hochdruck	Zylinderdruck 3
Hochdruck	Zylinderdruck 4
Niederdruck	Ansaugdruck vor Zylinder 2
Niederdruck	Auslassdruck nach Zylinder 2
Niederdruck	Druck vor Turbine
Niederdruck	Druck nach Turbine

**Abbildung 11:**  
Übersicht  
Indizier-  
messstellen

### 4.3 Datenauswertung

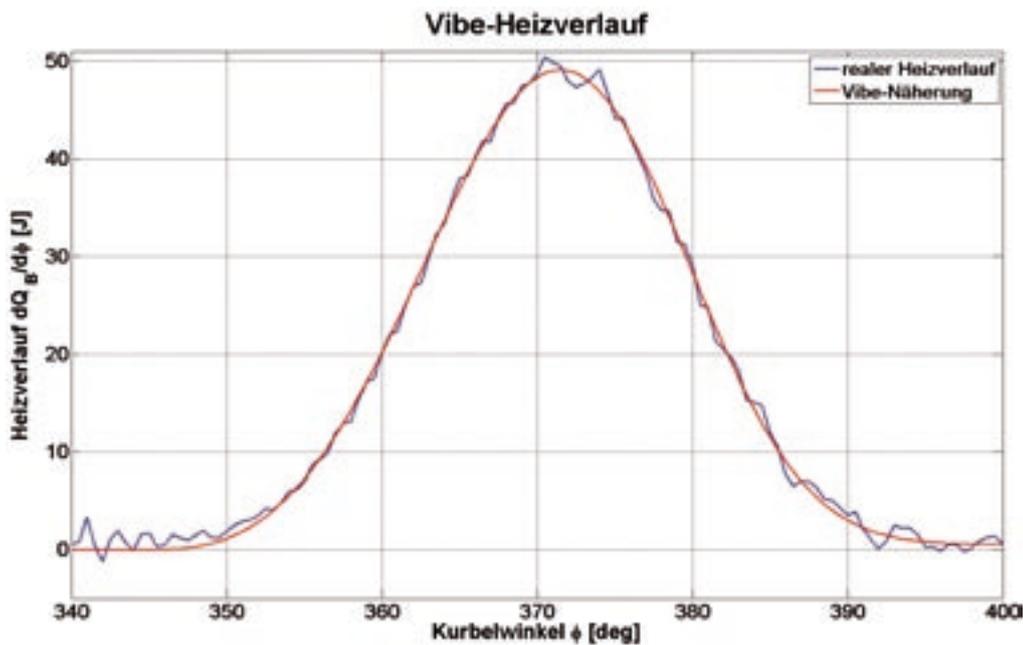
Der Einsatz dieser umfangreichen Messtechnik am Motorenprüfstand erlaubt eine aussagekräftige Beurteilung des Motorverhaltens sowohl im stationären als auch im instationären Betrieb. Im Zuge des Downsizing-Konzeptes kommt der Auswertung der erfassten Daten hinsichtlich thermo-

dynamischer Größen als auch darauf basierender Motor- kenndaten eine besondere Bedeutung zu. Ziel muss dabei eine übersichtliche und schnelle graphische sowie tabella- rische Darstellung der notwendigen Größen, wie z.B. Zyl- nderdruckverlauf, Heizverlauf und p,V-Diagramm sein, die anschließend als Grundlage für die Motorprozesssimulation in GTPower dienen.

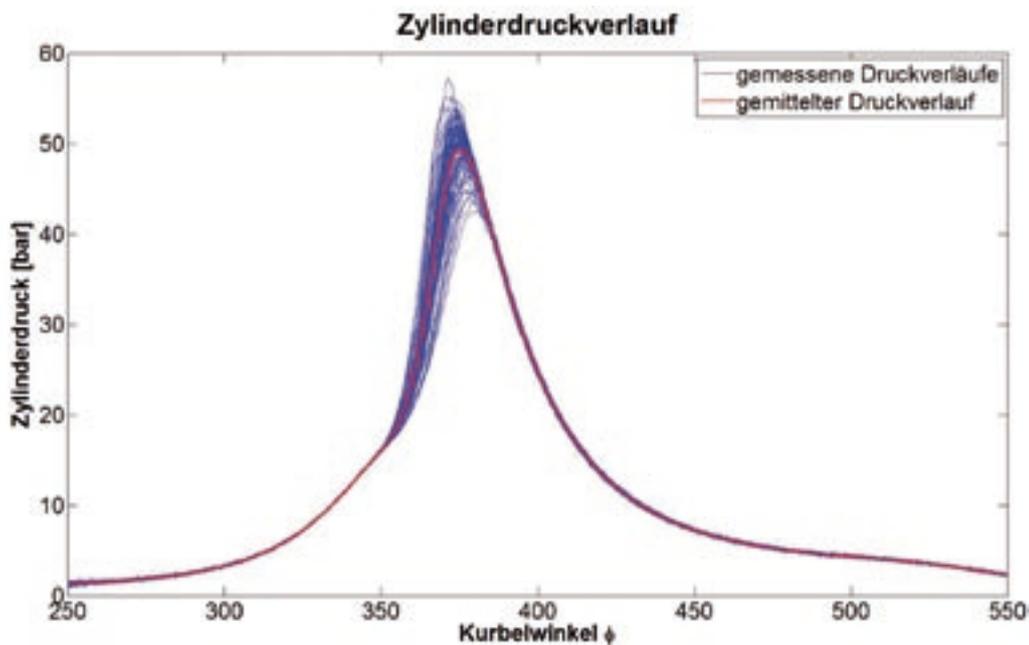
Um aussagekräftige Simulationsergebnisse jenseits der mes- stechnisch erfassten Lastpunkte zu erhalten, ist eine Extrapolation von Motorgrößen innerhalb der Simulation erforderlich. Dazu muss der Heizverlauf der gemessenen Lastpunkte über einen Ersatzheizverlauf nach Vibe nachgebildet werden. Die einfache Beschreibung alleine über 3 Parameter stellt eine große Vereinfachung dar. Der Vibe-Heizverlauf berech- net sich nach

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = \frac{Q_{B,ges}}{\Delta\varphi_{VD}} 6,908(m+1) \left( \frac{\varphi - \varphi_{VB}}{\varphi_{VD}} \right)^m \exp \left[ -6,908 \left( \frac{\varphi - \varphi_{VB}}{\varphi_{VD}} \right)^{m+1} \right] \quad [13]$$

wobei  $Q_B$  die umgesetzte Brennstoffenergie je Grad Kurbel- winkel  $\varphi$  beschreibt. Die drei variablen Parameter Verbren- nungsbeginn  $\varphi_{VB}$ , Verbrennungsdauer  $\Delta\varphi_{VB}$  und Formfaktor  $m$  dienen zur Annäherung an den realen Heizverlauf. Diese werden anschließend an das Simulationsprogramm überge-



**Abbildung 12:**  
Vergleich realer Heizverlauf  
mit Vibe-Näherung



**Abbildung 13:**  
Zylinderdruckverläufe über  
100 Lastspiele und gemittelter  
Druckverlauf

ben. In Abbildung 12 ist das Ergebnis der Angleichung an den realen Heizverlauf durch Bildung der kleinsten Fehlerquadrate bei einem gemessenen Lastpunkt dargestellt.

Neben der Berechnung der Vibe-Parameter können mit Hilfe des in Matlab erstellten Auswertetools sowohl die direkt

gemessenen Druckverläufe des Indiziersystems als auch die gewünschten Größen dargestellt werden. Dazu zählt z.B. der gemittelte Druckverlauf, (siehe Abbildung 13) womit eine Schnittstelle zwischen dem Motorenprüfstand und der Simulation geschaffen wird. Für die Auslegung der 2-stufigen

Aufladung muss basierend auf der gemessenen Motorperformance mit einstufiger Turboaufladung das Verbesserungspotential abgeschätzt, und die Turboladerabmessungen über das Programmtool „Thermodynamische Auslegung des Turboladers“ ermittelt werden.

## 5 AUSLEGUNG UND SIMULATION

### 5.1 Thermodynamische Auslegung des Turboladers

Um bereits in der Entwicklung grundsätzliche Aussagen über das Zusammenspiel zwischen Motor und Turbolader treffen zu können, wurde ein Auslegungstool entwickelt, das über thermodynamische Gleichungen, gemessene Turboladerkennfelder und Motor-Erfahrungswerte, dieses Zusammenspiel widerspiegelt.

Ausgangspunkt ist eine geforderte Drehmoment- bzw. Leistungskurve in Abhängigkeit von der Drehzahl des Motors  $P_e(n)$ . Der für die jeweilige Leistung nötige Kraftstoffmassenstrom  $\dot{m}_{Kr}$  kann durch folgende Gleichung bestimmt werden, wobei der spezifische Kraftstoffverbrauch  $b_e$  aus gemessenen Motor-Kennfeldern entnommen bzw. geschätzt werden kann:

$$\dot{m}_{Kr} = P_e \cdot b_e$$

Für diesen Kraftstoffmassenstrom muss für eine saubere Verbrennung in Abhängigkeit vom stöchiometrischen Luftbedarf  $L_{min}$  und dem Lambda-Wert  $\lambda$  ein gewisser Luftmassenstrom  $\dot{m}_L$  zur Verfügung gestellt werden:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{Kr} \cdot L_{min} \cdot \lambda$$

Der Turbolader muss hierzu die angesaugte Luft auf eine gewisse Dichte  $\rho_{Luft}$  komprimieren:

$$\rho_{Luft} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{V}}$$

wobei sich der Volumenstrom  $\dot{V}$  durch das Hubvolumen  $V_H$  des Motors, die Drehzahl  $n$  und den Liefergrad  $\lambda_l$  (experimentell bestimmbar bzw. Erfahrungswerte) bestimmen lässt:

$$\dot{V} = V_H \cdot \lambda_l \cdot \frac{n \cdot i}{60}$$

wobei  $i$  bei 4 Takt-Motoren gleich 0,5 ist.

Um die gewünschte Luftdichte vor dem Zylindereinlass bereitstellen zu können, muss der Turbolader die angesaugte Luft verdichten. Das notwendige Druckverhältnis ist von den

Umgebungsbedingungen und der Temperatur nach Ladeluftkühler abhängig:

$$\pi_{Verdichter} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{\rho_{Luft} \cdot R \cdot T_{Nach\_LLK}}{p_{Umgebung}}$$

Wobei  $\pi_{Verdichter}$  : Druckverhältnis über Verdichter  
 $p_2$  : Druck nach Verdichter  
 $p_1$  : Druck vor Verdichter  
 $R$  : allgemeine Gaskonstante  
 $T_{Nach\_LLK}$  : Temperatur nach Ladeluftkühler  
 $p_{Umgebung}$  : Umgebungsdruck

Im Programm werden zusätzlich Ansaugverluste über den kompletten Ansaugpfad für die Berechnung des Druckverhältnisses berücksichtigt.

Aus dem benötigten Druckverhältnis und dem benötigten Luftmassenstrom kann die für die Verdichtung notwendige Antriebsleistung  $\Delta H_{Verdichter}$  mit den Daten aus dem Verdichterkennfeld des Turboladers berechnet werden.

Diese Leistung muss dem Turbolader unter Berücksichtigung des mechanischen und des Turbinen-Wirkungsgrades durch die Turbine zur Verfügung gestellt werden:

$$\Delta H_{Turbine} = \frac{\Delta H_{Verdichter}}{\eta_{mechanisch}}$$

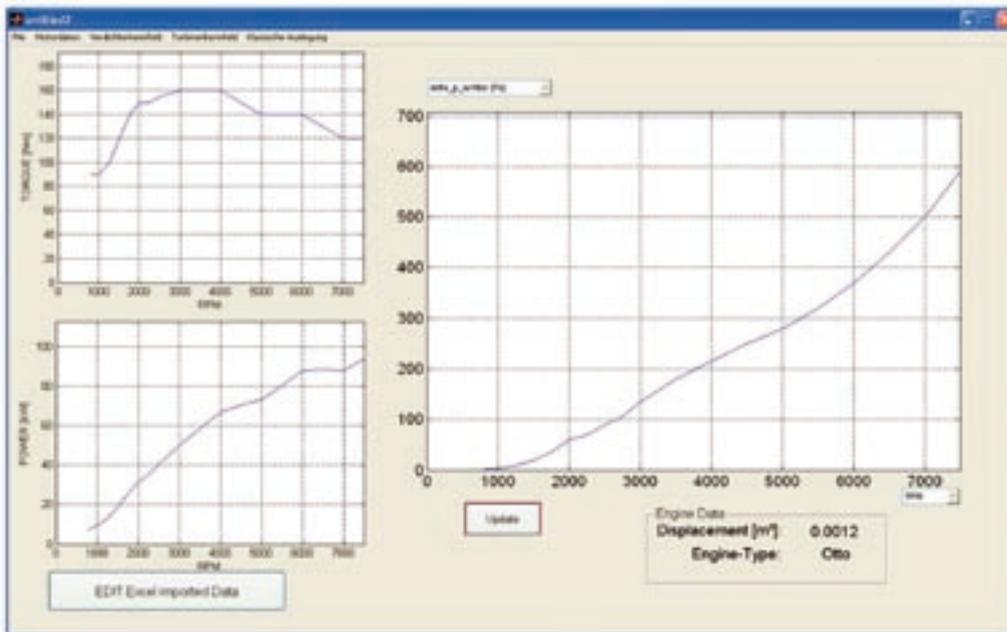
Ob die geforderte Leistung für die Kompression durch die Turbine zur Verfügung gestellt werden kann, muss mit den Daten aus den Turbinenkennfeldern ermittelt werden.

Der große Vorteil dieses Tools liegt im digitalen Zugriff auf die Turboladerkennfelder, mit denen numerisch die Turboladerdrehzahl und die einzelnen Wirkungsgrade von Turbine und Verdichter bestimmt werden können.

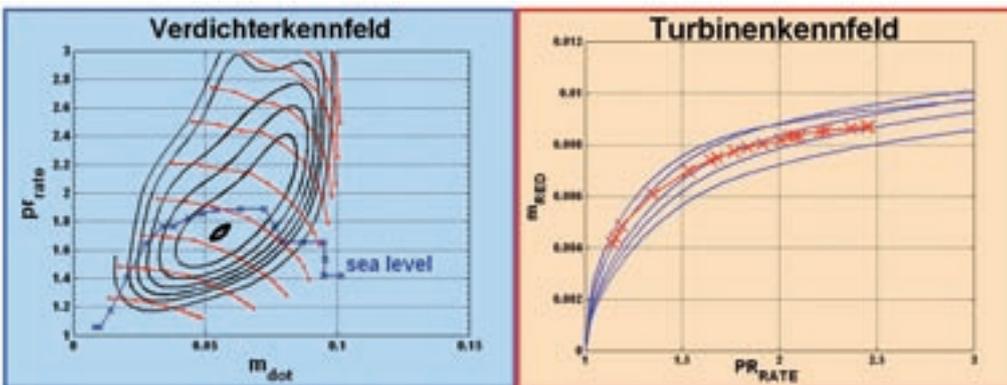
Somit kann mit dem Tool eine Abschätzung des erreichbaren Drehmomentverlaufs des Motors in Abhängigkeit vom Turbolader getroffen werden. Außerdem kann untersucht werden, welcher Abgasvolumenstrom in Abhängigkeit von der Drehzahl an der Turbine vorbei – durch das Wastegate (Bypasskanal über die Turbine) – geleitet werden muss, um den Turbolader bzw. den Motor nicht zu überlasten.

Mit dem Tool kann folglich eine sehr gute Abschätzung durchgeführt werden, wie das Zusammenspiel von Motor und Abgasturbolader funktioniert.

Dies ist für die Auslegung der zweistufigen Abgasturboaufladung sehr hilfreich. So kann leicht analysiert werden, ob ein gewünschter Betriebspunkt mit einem Turbolader erreicht werden kann. Es kann außerdem der Drehzahlbereich ermittelt werden, bei dem vom kleinen auf den großen Lader



**Abbildung 14:**  
Grafische Übersicht über die Motordaten



**Abbildung 15:**  
Auswertung des Verdichter- und Turbinenkennfelds

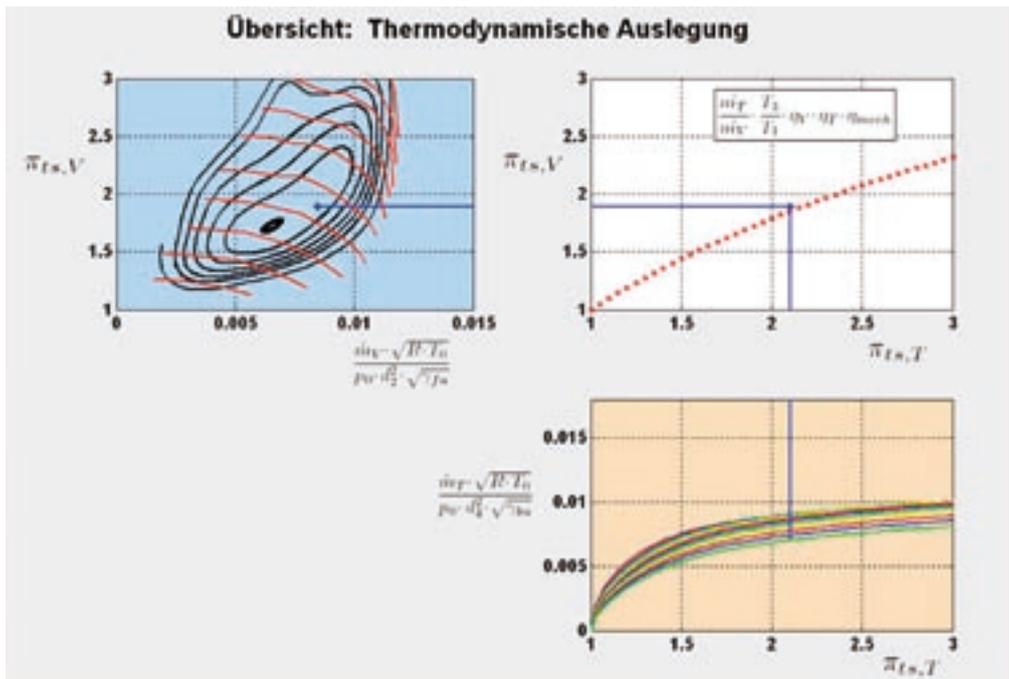
umgeschaltet werden muss. Basierend auf dem Berechnungsprogramm wurde eine benutzfreundliche Oberfläche kreiert, die in der Grafik (vgl. Abbildung 14) zu sehen ist.

Nach Eingabe der Motordaten können unterschiedliche Turbolader mittels der hinterlegten Kennfelder ausgewählt werden. Auf der Benutzeroberfläche können die berechneten Daten sowohl grafisch (vgl. Abbildung 15), als auch in tabellarischer Form abgerufen werden.

Um einen Überblick über die komplette Auslegung des Turboladers zu erhalten, wurde zusätzlich das in Abbildung 16 gezeigte „Programm-Sheet“ erstellt.

Mit dem Auslegungstool wird erreicht, die komplexen thermodynamischen Zusammenhänge so aufzubereiten, dass sie benutzerfreundlich bearbeitet werden können. Für die grobe Auslegung eines Turboladers ist das Programm-Tool hinreichend genau. Die Feinabstimmung auf einen Motor wird teilweise mittels Strömungssimulation, größtenteils aber noch empirisch am Motorprüfstand durchgeführt.

Ein Grund dafür ist die Vermessung eines Turboladers am dauerbeaufschlagten Heißgasprüfstand, bei der die Abgaspulsation des Motors – entstehend durch seine Verdrängercharakteristik – nicht berücksichtigt wird.



**Abbildung 16:**  
Gesamtübersicht über die thermodynamische Auslegung

5.2 Motorsimulation mit GT-Power

5.2.1 Grundlagen zur Ladungswechselsimulation

GT-Power von Gamma Technologies stellt eines der leistungsfähigsten und ausgereiftesten Simulationsprogramme im Sektor der Verbrennungsmotorberechnung dar und wird deshalb weltweit von fast allen Automobilherstellern und deren Zulieferern in der Entwicklung und Forschung eingesetzt.

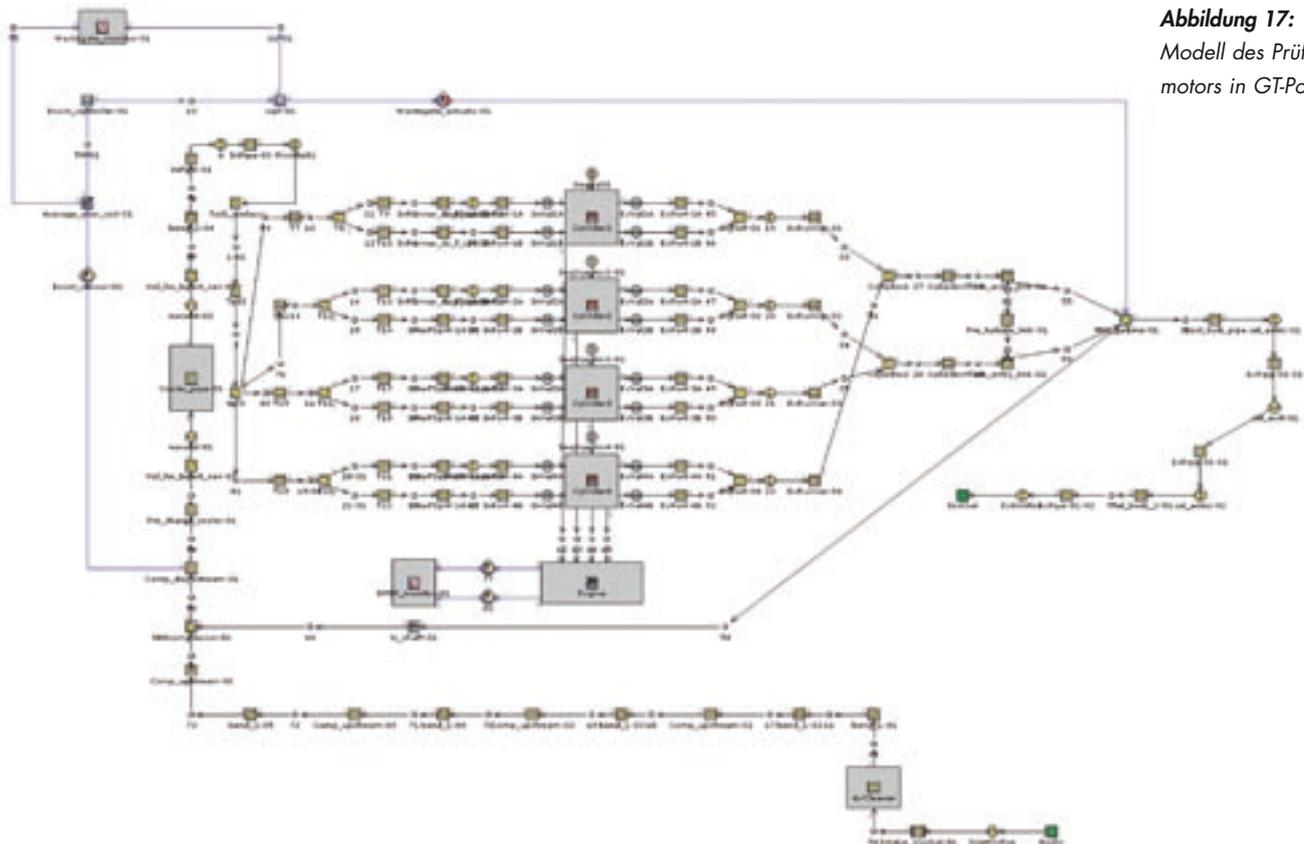
GT-Power basiert grundsätzlich auf einer 1-dimensionalen Gasdynamik und bietet dem Benutzer eine grafisch interaktive Oberfläche zur Modellerstellung. Mittels dieser Oberfläche kann der Benutzer ein Motormodell nach seinen Anforderungen und Wünschen erstellen und findet somit einen raschen Einstieg in das Gebiet der Motorprozesssimulation. GT-Power eignet sich generell für die Untersuchung von folgenden Themen und wurde daher für dieses Projekt ausgewählt:

- Abgasturboladerauslegung
- Gestaltung und Optimierung von Einlass- und Auslasstrakt
- Optimierung von Ventilerhebungskurven und Steuerzeiten
- Auswirkungen von Abgasrückführung
- Thermische Untersuchungen an Motorkomponenten, sowie strömungsführenden Bauteilen
- Verbrennungsverlauf- und Druckanalysen
- Gestaltung von aktiven und passiven Regelungsmöglichkeiten
- Geräuschanalysen

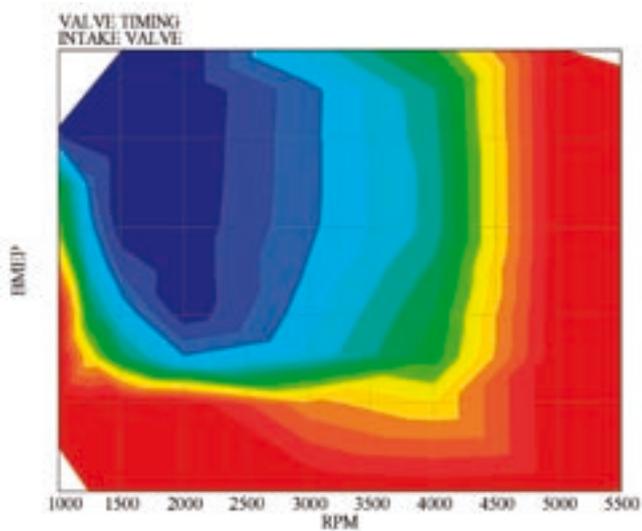
5.2.2 Aufbau und Validation des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell des Verbrennungsmotors wird in GT-Power grundsätzlich modulweise nach dem Baukastenprinzip aufgebaut. Dazu wird für jede Motorkomponente eine entsprechende Vorlage im Programm bereitgestellt, in welcher die Grundinformationen zum jeweiligen Bauteil hinterlegt werden können. Neben den strömungsführenden Bauteilen, mit denen der gesamte Ein- bzw. Auslasstrakt gestaltet wird, weist das Programm noch eine Vielzahl an mechanischen Komponenten auf, womit beispielsweise die Zylinder, die Injektoren, sämtliche Ventile oder der Kurbeltrieb abgebildet werden können. Abbildung 17 zeigt nun den Aufbau des Simulationsmodells in der grafischen Benutzeroberfläche von GT-Power.

Um mit dem Simulationsmodell nicht nur stationäre Betriebspunkte zu berechnen, sondern auch transiente Simulationen durchführen zu können, stützt sich das Modell zum Teil auf lastpunktabhängige Kennfelder, die je nach Betriebspunkt bestimmte Parameter beeinflussen, um somit dem Verhalten des realen Motors so nahe wie möglich zu kommen. Abbildung 18 zeigt exemplarisch das Steuerzeitenkennfeld des Einlassventils in Abhängigkeit von der Motordrehzahl und des effektiven Mitteldrucks, womit der variable Ventiltrieb des realen Motors abgebildet wird.



**Abbildung 17:**  
Modell des Prüfstands-  
motors in GT-Power



**Abbildung 18:** Kennfeld Steuerzeiten Einlassventil

Der Abgleich des Simulationsmodells mit den Messergebnissen des realen Motors ist wohl der wichtigste Schritt bei der Modellerstellung, um später daraus aussagefähige Simulationsergebnisse zu erhalten. Neben den bereits erwähnten Kennfeldabhängigkeiten wurde daher vor allem sehr viel Wert auf die Nachbildung der Gasdynamik im gesamten Ein- und Auslasstrakt des Motors, sowie auf die originalgetreue Wiedergabe des Verbrennungsvorganges gelegt. So wurden zum einen entscheidende Motorkomponenten im Luftpfad mit Hilfe von CAD-Programmen nachgebildet und in das Simulationsmodell integriert (vgl. Abbildung 19), und zum anderen die Daten der Heizrate aus dem Prüfstand über das Matlab-Auswertetool direkt in das Simulationsmodell eingelesen.

Abbildung 20 verdeutlicht dabei die gute Annäherung an die realen Verhältnisse, welche beispielsweise beim Vergleich der gemessenen Druckschwingungen und der berechneten Druckschwingungen im Einlasstrakt an der identischen Messstelle erreicht wird.



Abbildung 19: CAD-Modell der Ansaugbrücke

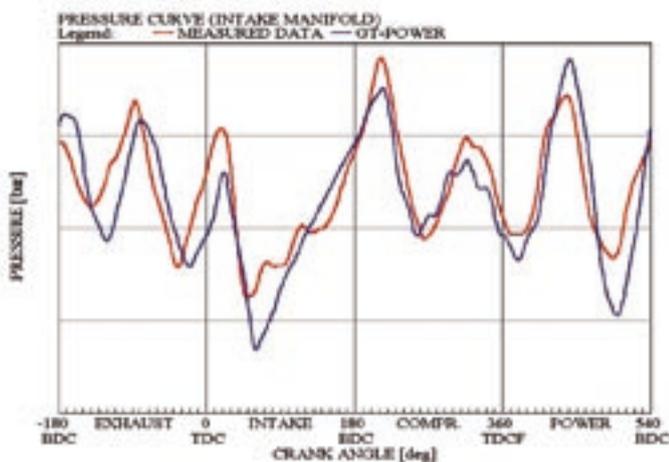


Abbildung 20: Vergleich der Druckschwingungen im Einlasstrakt

5.2.3 Motivation für die Motorprozesssimulation

Die Motivation für die Modellbildung liegt darin begründet, dass mit dem vollständig validierten Modell eines Saugmotors sehr präzise Vorhersagen in Bezug auf die Aufladung dieses Motors getroffen werden können. Dies bedeutet, dass es möglich wird, das Betriebsverhalten des Motors und speziell seine Drehmoment- und Leistungsentfaltung im aufgeladenen Betrieb zu prognostizieren. Die Variationsmöglichkeiten bei der Aufladung, d.h. ob ein- oder zweistufige Aufladung und welcher Abgasturbolader verwendet wird, bezogen auf die unterschiedlichen Hersteller und verschiedenen Turboladertypen, sind dabei nahezu unbegrenzt. Somit können

sowohl zeit- wie auch kostenaufwändige Prüfstandsversuche drastisch reduziert und die richtige Aufladestrategie für den jeweiligen Motor schon vorab simuliert werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Nach dem Start des Projekts „Niedrig-CO<sub>2</sub>-Emissions-Konzept für Ottomotoren: Kombination von 2-stufiger Abgasturboaufladung mit Ethanol(E85)-Direkteinspritzung“ im Frühjahr 2007 lag der Schwerpunkt der Tätigkeiten im Aufbau des dynamischen Prüfstands und im Aufbau des GT-Power Modells, um eine Arbeitsgrundlage für weitere Untersuchungen zu schaffen. Mit dem Start des Masterstudiengangs „Mechanical Engineering“ an der HS Regensburg im Oktober 2007 und dem damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsprojekt, wurde das Thema zu einem Arbeitsschwerpunkt und wird ab Juli 2008 in mehreren Masterarbeiten weitergeführt. In diesem Rahmen entstanden für diesen Zweck geeignete Schnittstellen zwischen den ermittelten Messwerten und der Simulation sowie zur Turboladerauswahl.

Die aktuelle Diskussion über die Beimengung von Bioethanol zu Normal- und Superbenzin und die damit verbundenen Anforderungen an die Automobilhersteller zeigt die Aktualität des Projekts. Die gezielte Anpassung der Motor-komponenten und der Motorsteuerung an E85, kombiniert mit zweistufiger Abgasturboaufladung, lässt auf ein hohes Potential hinsichtlich einer bulligen Drehmomentenkennlinie des Prüflings bei gleichzeitiger Verbesserung des Schadstoffausstoßes und der Verbrauchswerte schließen. Da andere alternative Antriebskonzepte in naher Zukunft den Verbrennungsmotor nicht ablösen werden, wird das Interesse an kleinen aufgeladenen Motoren, vor allem hinsichtlich der geforderten CO<sub>2</sub>-Reduktion stark steigen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [2] Geringer, B.: Herausforderungen an zukünftige Fahrzeugantriebe und -treibstoffe – Können Alternativen eine nachhaltige Mobilität sicherstellen?, Herbsttagung OEGEW, 2006.
- [3] Franck, M.: Auswirkungen von Verkehrssystemen, Mensch und Technik auf den Verbrauch, VDI Sonderheft Fahrzeugtechnik, ISBN 3-18-401638-2, S. 344-

**Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl**

Tel.: 0941 943-5164

Fax: 0941 943-1428

hans-peter.rabl@maschinenbau.fh-regensburg.de

- 367, 1999.
- [4] Prevedel, K., Kapus, P.: Hochaufladung beim Ottomotor – ein lohnender Ansatz für die Serie, 11. Aufladetechnische Konferenz. Dresden, 2006
  - [5] N.N.: Worldwide Emission Standards and Related Regulations; Interne Veröffentlichung Siemens VDO Automotive AG, 2007.
  - [6] N.N.: Homepage der Bundesregierung, Bearbeitungsstand: 15. April 2008. [<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Magazine/MagazinEuropapolitik/051/themen-2-co2-emmissionen.html>]
  - [7] v. Basshuysen R.; Schäfer F.: Motorenlexikon.de - Artikel Downsizing, Bearbeitungsstand: 15. April 2008. [<http://www.motorlexikon.de/?l=1181&R=D>]
  - [8] Rüden, K.: Beitrag zum Downsizing von Fahrzeug-Ottomotoren; Dissertation; Berlin 2004
  - [9] N.N.: Grundlagen Motorentechnik; Interne Veröffentlichung BMW AG, 2007. [<http://www.pinoe-hl.ac.at/arge/ahsph/>]
  - [10] Kapus, P.E.; Fierhapter A.; Fuchs, H.; Fraidl, G.K.: Ethanol Direct Injection on Turbocharged SI Engines – Potential and Challenges, SAE paper 2007-01-1408, 2007.
  - [11] Bergström, K.; Melin, S.-A.; Jones, C.: Der neue Ecotec Turbo BioPower Motor von GM Powertrain – Nutzen der Energieressourcen der Natur, 2007.
  - [12] Baecker, H.; Tichy, B.; Achleitner, E.: Untersuchung des Ethanolmischkraftstoffs E85 im geschichteten und homogenen Magerbetrieb mit piezoaktiver A-Düse, 2007.
  - [13] Pischinger R., Klell M. Sams T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine; Springer Wien 2002

# VERGLEICH VON INTEGRATIONSVERFAHREN AN EINEM BEISPIEL AUS DER FAHRZEUGDYNAMIK

## 1 MODELLBESCHREIBUNG

### 1.1 Bewegungsgleichungen

Das ebene Fahrzeugmodell in Abb.1 verfügt über  $f = 8$  Freiheitsgrade.

Die Bewegungsgleichungen können durch eine Matrizen-Differentialgleichung 2. Ordnung dargestellt werden

$$M(y)\ddot{y} + k(y, \dot{y}) = q(y, \dot{y}, t), \tag{1}$$

wobei die Lagegrößen  $z_K, \beta_K, z_V, \beta_V, z_F, x_M, z_M, \beta_M$  im  $f \times 1$ -Lagevektor  $y$  zusammengefasst wurden,  $M$  die  $f \times f$  Massenmatrix angibt, der  $f \times 1$  Vektor  $k$  die verallgemeinerten Kreisel- und Zentrifugalkräfte beschreibt und  $q$  den  $f \times 1$  Vektor der verallgemeinerten eingepprägten Kräfte und Momente bezeichnet.

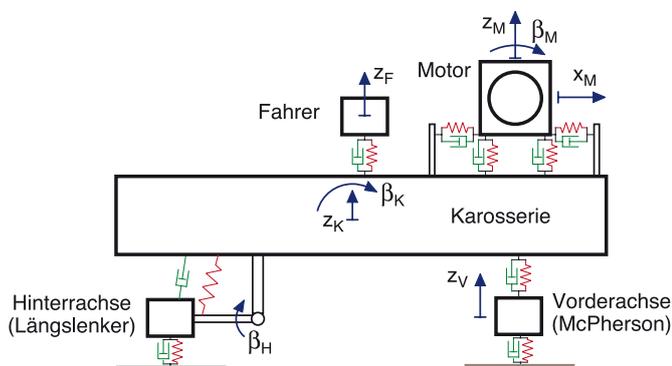


Figure 1: Ebenes Fahrzeugmodell mit 8 Freiheitsgraden

Die Bewegungen der Teilkörper werden komplett nichtlinear beschrieben. Nichtlineare Federkennlinien werden in der Aufbaufederung und in der Motorlagerung verwendet. Die Ungleichungen  $F_V \geq 0$  und  $F_H \geq 0$  für die Achslasten vorne und hinten, die das Abheben der Räder berücksichtigen, stellen eine weitere nichtdifferenzierbare Nichtlinearität dar. Schließlich wird die Wirkung der Aufbaudämpfer durch degressive Kennlinien modelliert.

### 1.2 Zustandsgleichungen

Mit der Substitution  $\dot{y} = v$  kann (1) in eine Matrizen-Differentialgleichung 1. Ordnung umgeschrieben werden

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{v} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ -M(y)^{-1} (q(y, v, t) - k(y, v)) \\ f(x, t) \end{bmatrix}, \tag{2}$$

wobei  $x$  den  $2f \times 1$  Zustandsvektor bezeichnet.

### 1.3 Systemparameter

Ein frontgetriebenes Mittelklassefahrzeug wird durch folgende Fahrzeugparameter beschrieben.

```
%
%   Daten fuer ein ebenes Fahrzeugmodell mit 8 Freiheitsgraden
%
%   vdat=zeros(200,1);           % Vorbelegung und Dimensionierung
%
%   Massegeometrie (11...20)
vdat(11) = 1150.0D0 ;           % Masse Karosserie [kg]
vdat(12) = 1500.0D0 ;           % Traegheit Karosserie [kgm^2]
vdat(13) = 90.0D0 ;             % Masse Vorderachse [kg]
vdat(14) = 80.0D0 ;             % Masse Hinterachse [kg]
vdat(15) = 1.5D0 ;              % Traegheit Hinterachse [kgm^2]
vdat(16) = 60.0D0 ;            % Masse Fahrer [kg]
vdat(17) = 200.0D0 ;           % Masse Motor/Getriebe-Block [kg]
vdat(18) = 8.0D0 ;             % Traegheit Motor/Getriebe [kgm^2]
%
%   Abstaende laengs (21...40) [m]
vdat(21) = 1.30D0 ;            % Schwerg. Kaross. --> VA Mitte
vdat(22) = 1.30D0 ;            % Schwerg. Kaross. --> HA Mitte
vdat(23) = 0.80D0 ;            % Schwerg. Kaross. --> Drehpunkt HA-Schwinge
vdat(24) = 0.45D0 ;            % Drehpunkt HA-Schwinge --> Schwergpunkt HA
vdat(25) = 0.05D0 ;            % Schwerg. Kaross. --> Schwerg. Fahrer
vdat(26) = 1.70D0 ;            % Schwerg. Kaross. --> Schwerg. Motor
vdat(27) = 0.15D0 ;            % Schwerg. Motor --> Motorlager vorne
vdat(28) = 0.15D0 ;            % Schwerg. Motor --> Motorlager hinten
%
%   Abstaende vertikal (41...60) [m]
vdat(41) = 0.315 ;             % unverformter Reifenradius
vdat(42) = 0.200 ;             % Schwerg. Kaross. --> Radmitten
vdat(43) = 0.350 ;             % Schwerg. Kaross. --> Schwerg. Fahrer
vdat(44) = 0.050 ;             % Schwerg. Kaross. --> Schwerg. Motor
vdat(45) = 0.10D0 ;            % Schwerg. Motor --> Motorlager vorne
vdat(46) = 0.10D0 ;            % Schwerg. Motor --> Motorlager hinten
%
%   Reifen (61...70) [m]
vdat(61) = 220000.D0;          % Reifensteifigkeit VA [N/m]
vdat(62) = 200.D0;             % Reifendaempfung vorne [N/(m/s)]
vdat(63) = 200000.D0;          % Reifensteifigkeit hinten [N/m]
vdat(64) = 180.D0;             % Reifendaempfung hinten [N/(m/s)]
%
%   Vorderachs-Federung (Werte fuer ein Element) (71...80) [m]
vdat(71) = 4100.D0;            % Federvorspannung [N]
vdat(72) = 25000.D0;           % Aufbausteifigkeit [N/m]
vdat(73) = -0.080D0;           % Federweg: Zuganschlag setzt ein [m]
vdat(74) = -0.095D0;           % Federweg: Steifigkeit verdoppelt sich [m]
vdat(75) = 0.060D0;           % Federweg: Druckanschlag setzt ein [m]
vdat(76) = 0.100D0;           % Federweg: Steifigkeit verdoppelt sich [m]
vdat(77) = 3000.D0;            % Aufbaudaempfung [N/(m/s)]
vdat(78) = 2.5D0;              % Nichtlinearitaet Druckstufe [1/(m/s)]
vdat(79) = 1.5D0;              % Nichtlinearitaet Zugstufe [1/(m/s)]
%
%   Hinterachs-Federung (Werte fuer ein Element) (81...100) [m]
%   Anlenkpunkte relativ zu Drehgelenk HA-Schwinge (81...90) [m]
vdat(81) = 4400.D0;            % Federvorspannung hinten [N]
vdat(82) = 75000.D0;           % Aufbausteifigkeit hinten [N/m]
vdat(83) = -0.040D0;           % Federweg: Zuganschlag setzt ein [m]
vdat(84) = -0.045D0;           % Federweg: Steifigkeit verdoppelt sich [m]
vdat(85) = 0.030D0;           % Federweg: Druckanschlag setzt ein [m]
vdat(86) = 0.060D0;           % Federweg: Steifigkeit verdoppelt sich [m]
vdat(87) = 0.325D0;           % Federanlenkpunkt hinten unten x
vdat(88) = 0.025D0;           % Federanlenkpunkt hinten unten z
vdat(89) = 0.300D0;           % Federanlenkpunkt hinten oben x
vdat(90) = 0.300D0;           % Federanlenkpunkt hinten oben z
vdat(91) = 0.525D0;           % Daempferanlenkpunkt hinten unten x
vdat(92) = -0.050D0;          % Daempferanlenkpunkt hinten unten z
vdat(93) = 0.500D0;           % Daempferanlenkpunkt hinten oben x
```

```

vdat(94) = 0.400D0; % Daempferanlenkpunkt hinten oben z
vdat(95) = 2750.D0; % Aufbaudaempfung [N/(m/s)]
vdat(96) = 2.5D0; % Nichtlinearitaet Druckstufe [1/(m/s)]
vdat(97) = 1.5D0; % Nichtlinearitaet Zugstufe [1/(m/s)]
%
% Sitz-Federung (101...110)
vdat(101) = 588.6D0; % Federvorspannung [N]
vdat(102) = 6000.D0; % Steifigkeit [N/m]
vdat(103) = 800.D0; % Daempfung [N/(m/s)]
%
% Motor-Lagerung vorne laengs (111...120)
vdat(111) = 80000.D0; % Steifigkeit [N/m]
vdat(112) = 0.018D0; % Federweg+-: Steifigk. verdoppelt sich [m]
vdat(113) = 1200.D0; % Daempfung [N/(m/s)]
%
% Motor-Lagerung vorne vertikal (121...130)
vdat(121) =250000.D0; % Steifigkeit [N/m]
vdat(122) = 0.015D0; % Federweg+-: Steifigk. verdoppelt sich [m]
vdat(123) = 1000.D0; % Daempfung [N/(m/s)]
%
% Motor-Lagerung hinten laengs (131...140)
vdat(131) = 90000.D0; % Steifigkeit [N/m]
vdat(132) = 0.020D0; % Federweg+-: Steifigk. verdoppelt sich [m]
vdat(133) = 1000.D0; % Daempfung [N/(m/s)]
%
% Motor-Lagerung hinten vertikal (141...150)
vdat(141) =200000.D0; % Steifigkeit [N/m]
vdat(142) = 0.018D0; % Federweg+-: Steifigk. verdoppelt sich [m]
vdat(143) = 1500.D0; % Daempfung [N/(m/s)]
    
```

Da nicht alle Elemente im Datenvektor belegt sind, wird er mit der MATLAB-Anweisung `vdat=zeros(200,1)` zunächst mit Nullen vorbelegt. Abb. 2 verdeutlicht die geometrischen Abmessungen.

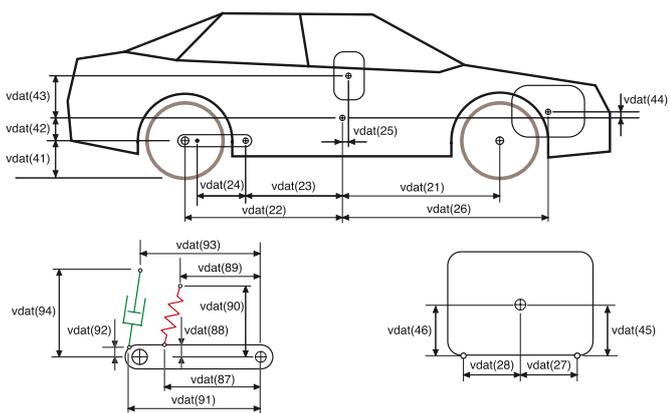


Figure 2: Geometrische Abmessungen

### 1.4 Kraftgesetze

Die vertikale Nachgiebigkeit eines Reifens wird durch ein lineares Feder-/Dämpfermodell mit der Steifigkeit  $c_R$  und der Dämpfung  $d_R$  nachgebildet

$$F_R = c_R u + d_R \dot{u} \quad (3)$$

wobei  $u$  die Reifeneinfederung beschreibt und mit der nichtlinearen Begrenzung  $F_R \geq 0$  das Abheben des Reifens berücksichtigt wird.

Die Vertikalverschiebung des Fahrers wird von der Gleichgewichtslage ausgemessen. Die lineare Sitzfederung wird deshalb durch die Federvorspannung `vdat(101)` und die Federrate `vdat(102)` festgelegt. Der Parameter `vdat(103)` beschreibt die Sitzdämpfung.

Die Federn in den Achsaufhängungen sowie bei der Motorlagerung werden progressiv nichtlinear beschrieben. Dazu wird eine lineare Kennlinie im Zug- und Druckbereich durch quadratische Funktionen überlagert, Abb.3. Die Konstante  $c$  beschreibt die Grundfederrate,  $x_{a\_m}$  und  $x_{a\_p}$  geben die Federwege im Druck- ( $x < 0$ ) und Zugbereich ( $x > 0$ ) an, bei denen die Progression einsetzt. Mit den Parametern  $x_{d\_m}$  und  $x_{d\_p}$  wird die Stärke der progressiven Nichtlinearität festgelegt. An den Stellen  $x=x_{d\_m}$  und  $x=x_{d\_p}$  beträgt die Steigung der nichtlinearen Kennlinie genau das Doppelte der Grundfederrate.

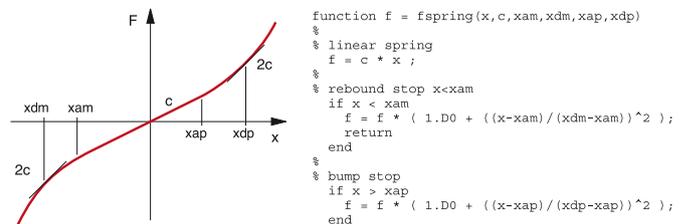


Figure 3: Nichtlineare Federkennlinie: Prinzip und Matlab-Funktion

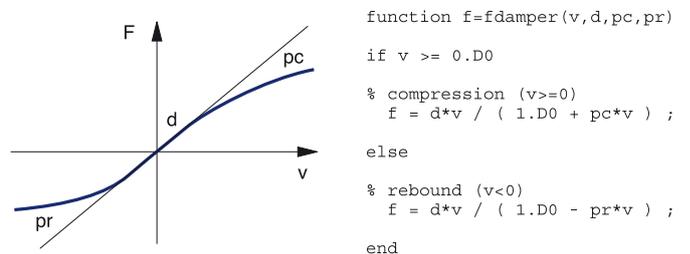


Figure 4: Nichtlineare Dämpferkennlinie: Prinzip und Matlab-Funktion

Die Dämpferkennlinien an der Vorder- und Hinterachse werden degressiv nichtlinear beschrieben. Dazu wird eine abschnittsweise definierte gebrochen rationale Funktion verwendet, Abb.4. Die Konstante  $d$  beschreibt die Dämpfungskonstante bei kleinen Dämpfergeschwindigkeiten,  $v \rightarrow 0$ . Mit den Parametern  $pc$  und  $pr$  wird die Degression im Druck- und Zugbereich festgelegt.

Die nichtlinearen Feder- und Dämpferkennlinien der Aufbaulagerung sowie die nichtlinearen Federkennlinien der Motorlagerung sind in Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7 zusammengestellt. Die Federkennlinien sind bezüglich der Konfigurationslage definiert. Deshalb müssen mit `vdat` (71) und `vdat` (81) noch zusätzlich die Federvorspannkraften angegeben werden.

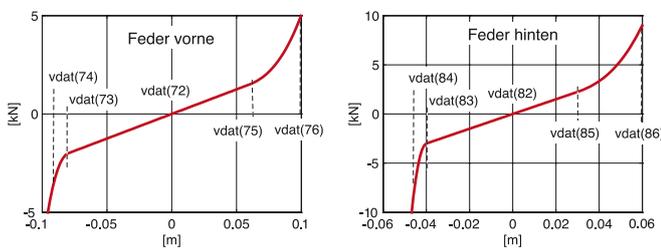


Figure 5: Federkennlinien in der Aufbaulagerung

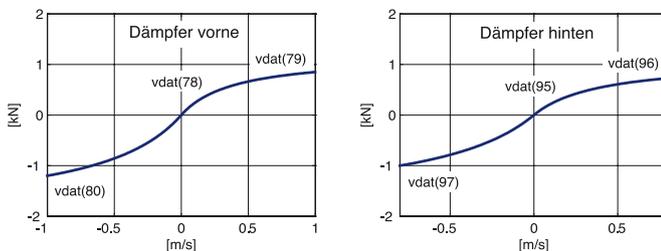


Figure 6: Dämpferkennlinien in der Aufbaulagerung

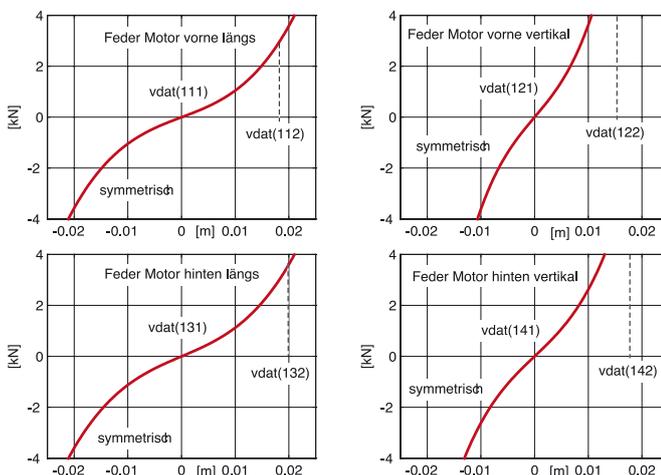


Figure 7: Federkennlinien in der Motorlagerung

Bei den Federkennlinien der Motorlagerung wurde angenommen, dass die Progression sofort einsetzt,  $x_{a\_m}=0$  und  $x_{a\_p}=0$ . Ferner wurde Punktsymmetrie vorausgesetzt,  $x_{a\_m}=-x_{a\_p}$ . Dann genügt die Angabe von je zwei Parametern,  $c$  und  $x_{a\_p}$ . Auf die Angabe von Federvorspannkraften wurde hier verzichtet.

Die Dämpfung in den Motorlagern wurde stark vereinfacht durch lineare Dämpferelemente modelliert. Die Dämpfungskonstanten werden durch die Datenelemente `vdat` (113), `vdat` (123), `vdat` (133) und `vdat` (143) angegeben.

## 2 INTEGRATIONSVERFAHREN

### 2.1 TeilimplizitesEulerverfahren

Die spezielle Struktur der Zustandsgleichungen (2) kann bei der numerischen Lösung genutzt werden, [1]. Mit dem expliziten Euler-Schritt

$$v(t+h) = v(t) + h M(y(t))^{-1} (q(y(t), v(t), t) - k(y(t), v(t))) \quad (4)$$

erhält man den neuen Geschwindigkeitszustand  $v(t+h)$ , wobei  $h$  die Schrittweite bezeichnet. Ein weiterer impliziter Schritt liefert dann die neue Lage

$$y(t+h) = y(t) + h v(t+h). \quad (5)$$

Dieses teilimplizite Eulerverfahren wird im folgenden mit `ode1m` bezeichnet. Die mit einer Rechenschrittweite von  $h = 1ms$  erzeugten Ergebnisse werden für den Vergleich der MATLAB ODEs als Referenzlösung verwendet.

### 2.2 MATLAB-Integrationsverfahren

Zur Lösung von gewöhnlichen Differentialgleichungen (ODE) der Form  $\dot{x} = f(x,t)$  stellt MATLAB eine Reihe von Verfahren zur Verfügung, die in der Dokumentation [2] wie folgt beschrieben werden:

**ode23** is a one-step solver. Based on an explicit Runge-Kutta (2,3) pair of Bogacki and Shampine. It may be more efficient than `ode45` at crude tolerances and in the presence of mild stiffness.

**ode45** is a one-step solver. Based on an explicit Runge-Kutta (4,5) formula, the Dormand-Princepair. It is a one-step solver - in computing, it needs only the solution at the immediately preceding time point. In general, `ode45` is the best function to apply as a "first try" for most problems.

**ode113** Variable order Adams-Bashforth-Moulton PECE solver. It may be more efficient than ode45 at stringent tolerances and when the ODE function is particularly expensive to evaluate. ode113 is a multistep solver - it normally needs the solutions at several preceding timepoints to compute the current solution.

**ode15s** Variable-order solver based on the numerical differentiation formulas (NDFs). Optionally it uses the backward differentiation formulas, BDFs, (also known as Gear's method). Like ode113, ode15s is a multistep solver. If you suspect that a problem is stiff or if ode45 failed or was very inefficient, try ode15s.

**ode23s** Based on a modified Rosenbrock formula of order 2. Because it is a one-step solver, it may be more efficient than ode15s at crude tolerances. It can solve some kinds of stiff problems for which ode15s is not effective.

**ode23t** An implementation of the trapezoidal rule using a "free" interpolant. Use this solver if the problem is only moderately stiff and you need a solution without numerical damping.

**ode23tb** An implementation of TR-BDF2, an implicit Runge-Kutta formula with a first stage that is a trapezoidal rule step and a second stage that is a backward differentiation formula of order 2. Like ode23s, this solver may be more efficient than ode15s at crude tolerances.

### 3 SIMULATIONSERGEBNISSE

#### 3.1 Eigendynamik

Zur Berechnung der Eigendynamik wurde das Modell bezüglich der Gleichgewichtslage, die durch den Lagevektor

$$y_0^T = [-0.0182, 0.0024, 0.0006, -0.0017, 0.0, -0.0003, -0.0042, -0.0031] \quad (6)$$

gegeben ist, linearisiert. Die Federvorspannungen in den Aufbaufedern entsprechen nicht genau der Gleichgewichtslage. Was hier mit  $z_V^0 = 0.0006 \text{ m}$  und  $\beta_H^0 = -0.0017 \text{ rad}$  zum Ausdruck kommt. Dies und vor allem die Reifeneinfederung führen dann auch zu Verschiebungen  $z_K^0 = -0.0182 \text{ m}$  und Verdrehungen  $\beta_K^0 = 0.0024 \text{ rad}$  des Aufbaus. Die Federvorspannung der Fahrersitzlagerung entspricht exakt der Gleichgewichtslage,  $z_F^0 = 0.0 \text{ m}$ . Bei der Motorlagerung wurden keinerlei Vorspannungen angegeben. Deshalb kommt es hier mit  $x_M^0 = -0.0003 \text{ m}$ ,  $z_M^0 = -0.0042 \text{ m}$  und  $\beta_M^0 = -0.0031 \text{ rad}$  zu Verschiebungen und einer Verdrehung.

Die Beträge der Eigenvektoren, die Eigenfrequenzen in [Hz] sowie die Lehrschen Dämpfungsmaße sind in der Tabelle

1 aufgelistet. Berücksichtigt man alle Komponenten mit Beträgen größer 0.2, dann ergibt sich das in der Tabelle 2 dargestellte Schwingungsbild.

Bis auf die Bewegungen des Motors, dem die Frequenzen  $f_3$  bis  $f_5$  zugeordnet werden können, ist das Fahrzeug sehr gut gedämpft.

	1	2	3	4	5	6	7	8
$z_K$	0.0287	0.0722	0.1126	0.0056	0.0056	0.6029	0.2284	0.0837
$\beta_K$	0.0345	0.0708	0.1506	0.0025	0.0043	0.3650	0.2472	0.0313
$z_V$	0.0698	1.0000	0.0993	0.0067	0.0010	1.0000	0.0911	0.0701
$\beta_H$	1.0000	0.3034	0.0574	0.0053	0.0185	0.2524	1.0000	0.2088
$z_F$	0.0301	0.0840	0.1239	0.0061	0.0059	0.6893	0.5134	1.0000
$x_M$	0.0012	0.0033	0.0171	0.1014	0.4676	0.0003	0.0035	0.0006
$z_M$	0.0353	0.2435	1.0000	0.0365	0.0226	0.0276	0.0083	0.0032
$\beta_M$	0.0361	0.1075	0.7216	1.0000	1.0000	0.0052	0.0164	0.0037
$f_i$ [Hz]	9.54	9.36	10.3	6.72	4.06	1.11	1.51	1.25
$D_L^i$	0.61	0.55	0.14	0.17	0.13	0.41	0.45	0.67

Table 1: Eigenvektoren, Eigenfrequenzen und Lehrsche Dämpfungsmaße

Schwingungsform	dominierende Bewegungen
1	Hinterachse $\beta_H$
2	Vorderachse $z_V$ , Hinterachse $\beta_H$ , Motor $z_M$
3	Motor $z_M$ , $\beta_M$
4	Motor $\beta_M$
5	Motor $\beta_M$ , $x_M$
6	Vorderachse $z_V$ , Fahrer $z_F$ , Aufbau $z_K$ , $\beta_K$ , Motor $z_M$
7	Hinterachse $\beta_H$ , Fahrer $z_F$ , Aufbau $z_K$ , $\beta_K$
8	Fahrer $z_F$ , Hinterachse $\beta_H$

Table 2: Schwingungsformen

#### 3.2 Fahrt über eine Bodenwelle

Eine sinusförmige Bodenwelle der Höhe  $h = 0.2 \text{ m}$  und der Länge  $l = 10 \text{ m}$  wird mit der Geschwindigkeit von  $v = 60 \text{ km/h}$  überfahren.

Während der Simulation  $0 \leq t \leq 3 \text{ s}$  kommt es zum Abheben der Vorder- und Hinterachse, Abb. 8. Da im Kontaktpunkt nur vertikale Kräfte berechnet werden, bildet die Simulation einen Versuch auf einem Hydropuls-Prüfstand nach.

#### 3.3 Fahrbahnerregung

In dieser Simulation werden die Hydropulszylinder entsprechend den regellosen Unebenheiten einer Fahrbahn auf- und abbewegt. In den ersten und letzten  $2.5 \text{ s}$  wird die Erregung über ein Cosinus-Fenster ruckfrei hoch- bzw. runtergefahren.

Die Erregung sowie die Achslasten und die Beschleunigung des Fahrers sind in Abb. 9 zusammengestellt. Auch hier kommt es zeitweise zum Abheben der Räder.

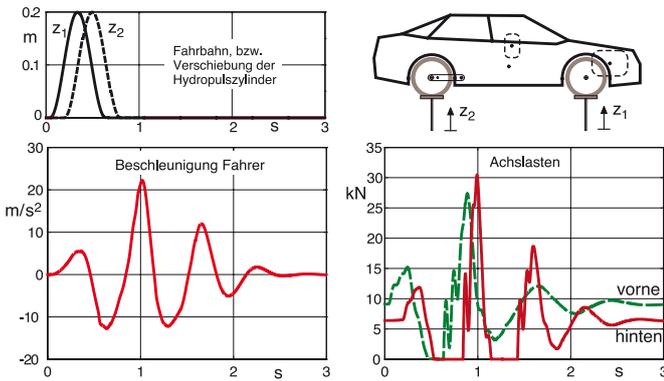


Figure 8: Simulationsergebnisse bei Fahrt über Bodenwelle

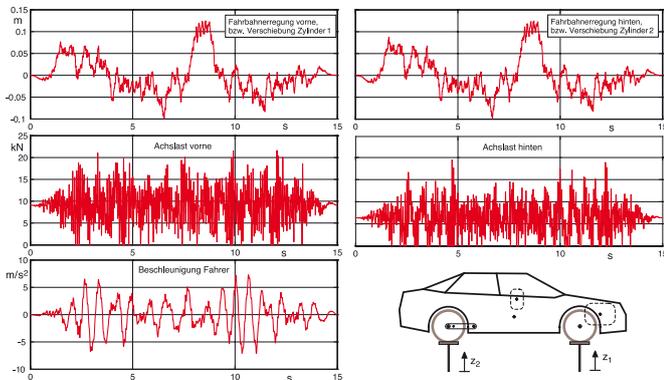


Figure 9: Erregung durch Fahrbahnunebenheiten

## 4 VERGLEICH DER INTEGRATIONSVERFAHREN

### 4.1 Effektivwerte

Da die MATLAB-Integratoren mit automatischer Schrittweitensteuerung arbeiten, werden die Simulationsergebnisse zu unterschiedlichen Zeitintervallen berechnet. Deshalb wurde die Rechen-Genauigkeit an Hand von integralen Kriterien überprüft. In der Fahrdynamik ist es üblich, Fahrkomfort und Fahrsicherheit durch Effektivwerte der Fahrer-Beschleunigung und der dynamischen Radlasten zu beurteilen. Effektivwerte sind durch

$$w^{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T w^2(t) dt} \tag{7}$$

definiert. Die Berechnung des Zeitintegrals wurde über den jeweiligen Integrator durchgeführt. Der Effektivwert der Vertikalbeschleunigung des Fahrers  $\ddot{z}_F^{eff}$  wurde auf die Erdbeschleunigung  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  und die Effektivwerte der Achslasten auf die statischen Achslasten  $F_V^{st} = 9111 \text{ N}$  und  $F_H^{st} = 6390 \text{ N}$  normiert.

### 4.2 Toleranzen

Bei den MATLAB-Integrationsverfahren kann über die Parameter `RelTol` und `AbsTol` die relative und absolute Genauigkeit der numerischen Lösung vorgegeben werden. In der Standard-Einstellung arbeiten die MATLAB-Solver mit `RelTol=1.E-3` und `AbsTol=1.E-6`. Im Folgenden wurde die relative und absolute Genauigkeit in Zehnerpotenzen variiert.

### 4.3 Fahrt über Bodenwelle

In Abb. 10 und Abb. 11 ist der Rechenaufwand der verschiedenen MATLAB-Solver in Abhängigkeit von der relativen (`RelTol`) und absoluten (`AbsTol`) Genauigkeit dargestellt. Die absoluten Rechenzeiten wurden dabei auf die Rechenzeit der Euler-Integration `ode1m` bei einer Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  normiert.

Die Differentialgleichungen des Fahrzeugs sind nicht steif. Mit Ausnahme des Radabhebens ist der Lösungsverlauf sehr glatt. Deshalb schneiden die impliziten Solver niedriger Ordnung `ode23s`, `ode23t` und `ode23tb` hier nicht gut ab. Nahezu gleich schnelle Lösungen liefern hier das explizite Runge-Kutta-Verfahren hoher Ordnung (`ode45`) und das explizite Mehrschrittverfahren (`ode113`). Das explizite Runge-Kutta-Verfahren niedriger Ordnung (`ode23`) und das implizite Mehrschrittverfahren (`ode15s`) landen im Mittelfeld.

In Abb. 12 sind der Rechenaufwand und die erzielte Genauigkeit bei der Berechnung der Effektivwerte für verschiedene Paarungen von relativer (`RelTol`) und absoluter (`AbsTol`) Genauigkeit gegenübergestellt. Rechenzeiten und Effektivwerte wurden auf die Ergebnisse der Euler-Integration normiert.

Alle Verfahren mit Schrittweitensteuerung erzielen bei entsprechenden Genauigkeitanforderungen, z.B. bei `RelTol=1.E-5` und `AbsTol=1.E-7` gleich gute Resultate bezüglich der Effektivwerte. Mittlere und hohe Genauigkeitsanforderungen erfordern im Vergleich zur Euler-Integration `ode1m` mit der Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  ein Mehrfaches an Rechenzeiten. Bei `RelTol=1.E-4` und `AbsTol=1.E-6`

z.B. benötigt hier `ode45` die 2.3-fache und `ode113` die 2.7-fache Rechenzeit. Allerdings liefert `ode1m` mit der Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  nur eine geringe Genauigkeit.

und  $\text{AbsTol} = 1 \cdot 10^{-5}$  mit deutlich geringeren Rechenzeiten übertreffen.

Die Abweichungen bei den Effektivwerten der Radlast vorne und hinten sind insgesamt geringer.

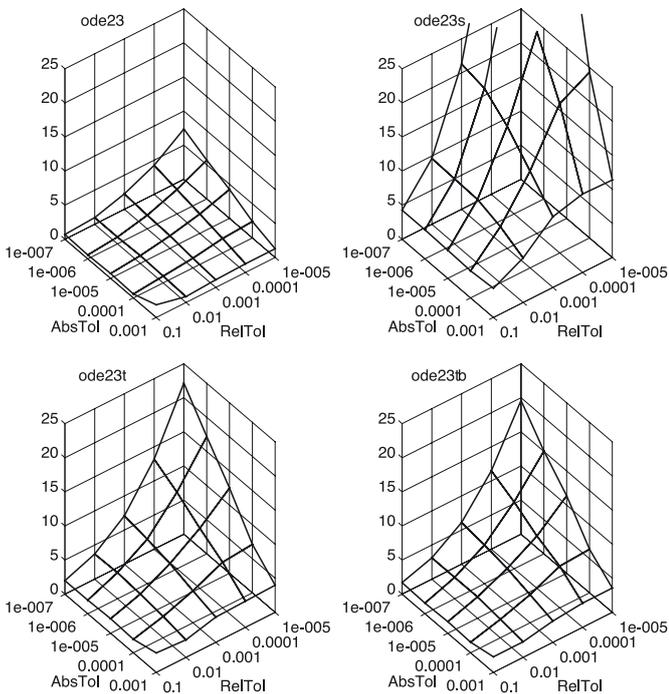


Figure 10: Rechenaufwand bei Verfahren niedriger Ordnung

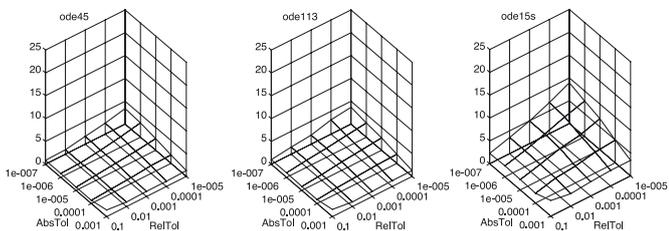


Figure 11: Rechenaufwand bei Verfahren hoher Ordnung

Die bezogenen Effektivwerte der Beschleunigung konvergieren hier auf den Wert 0.9968; d.h. die Euler-Lösung `ode1m` mit einer Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  liefert einen um 0.32% zu großen Wert. Setzt man die Schrittweite von `ode1m` auf  $h = 0,1 \text{ ms}$  herab, dann erreicht man bei 10-facher Rechenzeit in den Effektivwerten der Beschleunigung eine Genauigkeit, die Verfahren mit Schrittweitensteuerung bereits bei mittlerer Genauigkeit, z.B. bei  $\text{RelTol} = 1 \cdot 10^{-3}$

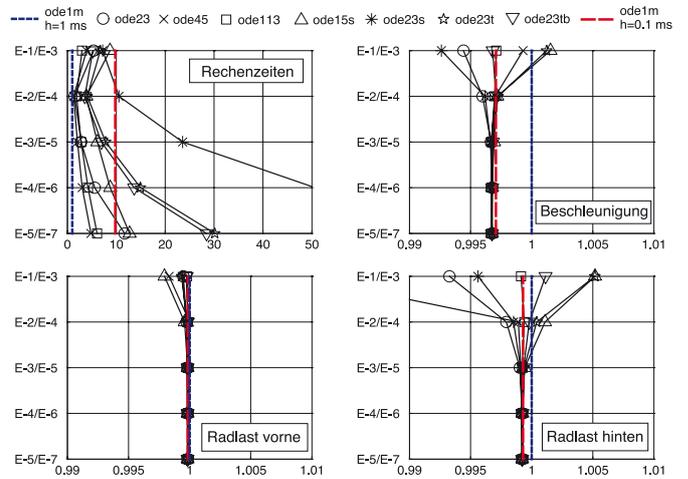


Figure 12: Vergleich der Integrationsverfahren bei Fahrt über Bodenwelle

#### 4.4 Erregung durch regellose Fahrbahnunebenheiten

In Abb. 13 und Abb. 14 ist der Rechenaufwand der verschiedenen MATLAB-Solver in Abhängigkeit von der relativen ( $\text{RelTol}$ ) und absoluten ( $\text{AbsTol}$ ) Genauigkeit dargestellt. Die absoluten Rechenzeiten wurden dabei wieder auf die Rechenzeit der Euler-Integration `ode1m` bei einer Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  normiert.

Das implizite Verfahren niedriger Ordnung `ode23s` schneidet hier besonders schlecht ab. Am besten geeignet sind wieder das explizite Runge-Kutta-Verfahren hoher Ordnung (`ode45`) und das explizite Mehrschrittverfahren (`ode113`). Wobei `ode45` im gesamten Genauigkeitsbereich den geringsten Rechenaufwand erfordert.

In Abb. 15 sind der Rechenaufwand und die erzielte Genauigkeit bei der Berechnung der Effektivwerte für verschiedene Paarungen von relativer ( $\text{RelTol}$ ) und absoluter ( $\text{AbsTol}$ ) Genauigkeit gegenübergestellt. Rechenzeiten und Effektivwerte wurden auf die Ergebnisse der Euler-Integration `ode1m` mit einer Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  normiert.

Im unteren und mittleren Genauigkeitsbereich benötigt `ode45` im Vergleich zur Euler-Lösung `ode1m` mit einer Schrittweite von  $h = 1 \text{ ms}$  zum Teil weniger oder nur geringfügig mehr Rechenaufwand. Höhere Genauigkeiten, z.B.  $\text{RelTol} = 1 \cdot 10^{-4}$  und

**Prof. Dr.-Ing. Georg Rill**  
 Tel.: 0941 943-5191  
 Fax: 0941 943-1428  
 georg.rill@maschinenbau.fh-regensburg.de

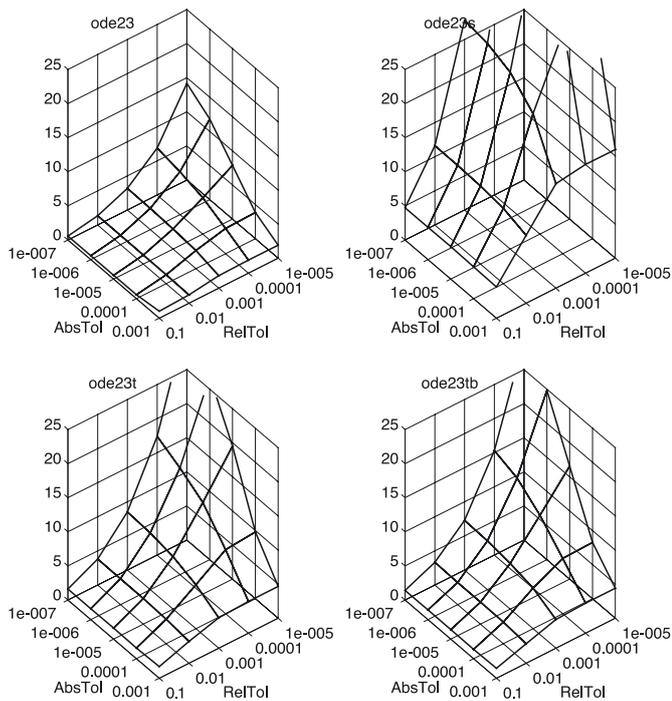


Figure 13: Rechenaufwand bei Verfahren niedriger Ordnung

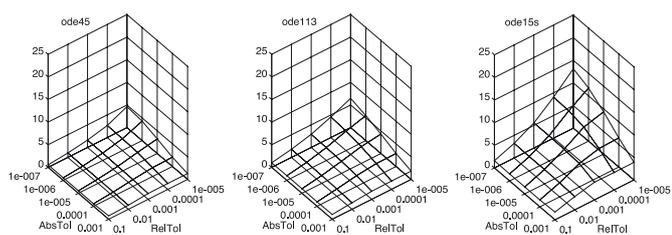


Figure 14: Rechenaufwand bei Verfahren hoher Ordnung

$AbsTol=1.E-6$  erfordern allerdings bei `ode45` die 2.5-fache und bei `ode113` die 4.2-fache Rechenzeit. Alle Verfahren mit Schrittweitensteuerung erzielen bei entsprechenden Genauigkeitanforderungen, z.B. bei  $RelTol=1.E-5$  und  $AbsTol=1.E-7$  wieder gleich gute Resultate bezüglich der Effektivwerte. Die bezogenen Effektivwerte der Beschleunigung konvergieren hier auf den Wert 0.9965; d.h. die Euler-Lösung `ode1m` mit einer konstanten Schrittweite von  $h = 1\text{ ms}$  ist auf 0.35 % genau. Auch hier liefert `ode1m` selbst bei kleiner Rechenschrittweite ( $h = 0,1\text{ ms}$ ) und großem Rechenaufwand nur eine Genauigkeit, die Verfahren mit Schrittweitensteuerung mit deutlich geringerem Rechenaufwand übertreffen.

Die Abweichungen bei den Effektivwerten der Radlast vorne und hinten sind insgesamt wieder geringer.

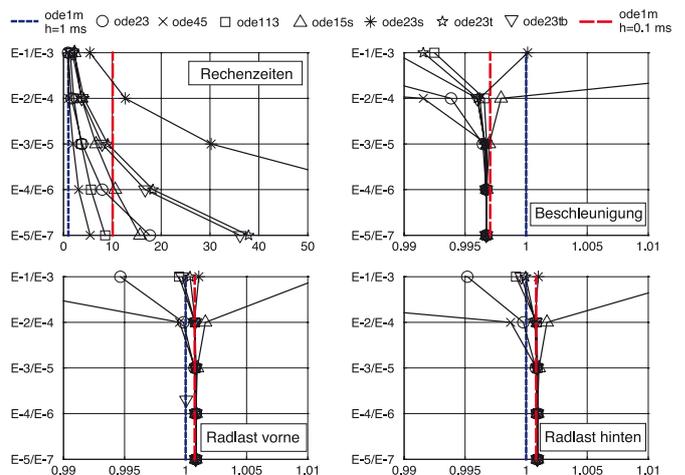


Figure 15: Vergleich der Integrationsverfahren bei Fahrbahnerregung

### 4.5 Zusammenfassung

Im Vergleich der schrittweitengesteuerten Verfahren schneidet `ode45` sowohl bei der Erregung durch ein Einzelhindernis als auch bei der Erregung durch regellose Fahrbahnebenheiten am Besten ab. Dies deckt sich auch mit der MATLAB-Empfehlung: *In general, ode45 is the best function to apply as a „firsttry“ for most problems.*

Die impliziten Verfahren `ode15s`, `ode23s`, `ode23t` und `ode23tb` benötigen hier zum Teil extrem große Rechenzeiten. Trotz nichtlinearer Kennlinien und Anschlägen beim Ein- und Ausfedern zählt das vorliegende Fahrzeugmodell also nicht zu den steifen Systemen.

Bei geringen Genauigkeitsanforderungen bietet die modifizierte Euler-Integration `ode1m` bei einer Rechenschrittweite von  $h = 1\text{ ms}$  eine interessante Alternative zu den Verfahren mit Schrittweitensteuerung. Die Euler-Integration `ode1m` eignet sich insbesondere für Echtzeit-Anwendungen.

### REFERENCES

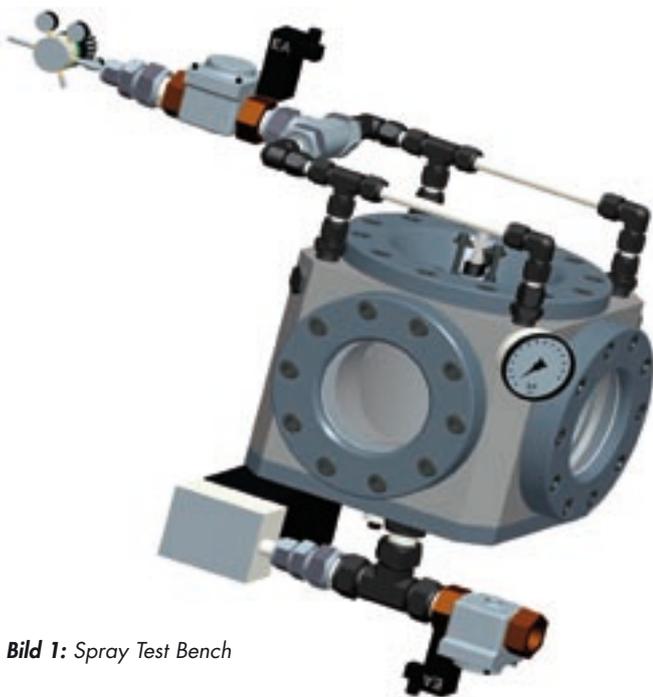
[1] Hahn, G.D., A Modified Euler Method for Dynamic Analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, 943-955 (1991)  
 [2] [www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/ref/ode23.html](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/ref/ode23.html)

## SPRAY TEST BENCH KALTE BOMBE

Die Entwicklung der Verbrennungsmotoren in den letzten Jahren zeigt eine stetige Steigerung der Leistung bei sinkendem Kraftstoffverbrauch und reduzierten Schadstoffemissionen. Um dieses zu ermöglichen, bedarf es der Entwicklung neuer Einspritzsysteme und der stetigen Verbesserung der am Verbrennungsprozess beteiligten Komponenten. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Einspritzdüse. Sie beeinflusst maßgeblich den Verbrennungsprozess und damit sowohl das Laufverhalten des Motors als auch die im Rahmen der Verbrennung entstehenden Emissionen.

Einspritzdüsen werden derzeit in einer Vielzahl von Varianten hergestellt, die in unterschiedlichen Motoren zum Einsatz kommen. Neuerdings haben Einspritzdüsen auch in einem weiteren Feld der Motorentechnik Einzug erhalten: Sie werden in der Abgasnachbehandlung eingesetzt, um Harnstoff in den Abgastrakt einzuspritzen.

Dieses Verfahren wird als selektive katalytische Reaktion (SCR) bezeichnet.



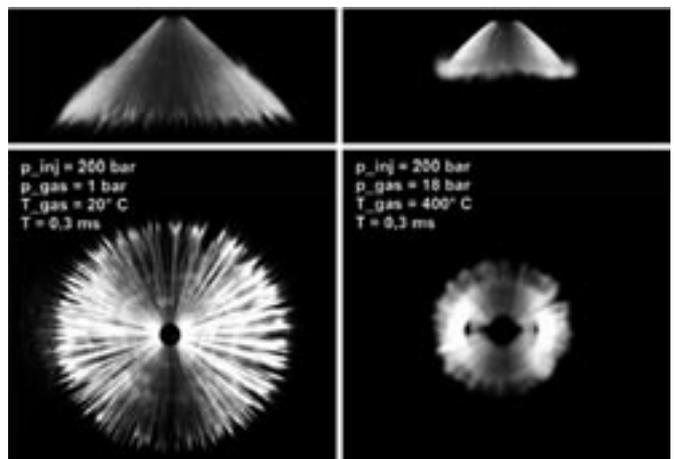
**Bild 1:** Spray Test Bench

In beiden Einsatzbereichen ist das Einspritzbild von entscheidender Bedeutung. Gerade in Verbindung mit neuen flüssigen Brennstoffen, Einspritzdüsen und Abgasnachbehandlungsverfahren ergeben sich daraus in Zukunft vielfältige, neue Forschungsaufgaben.

### EINLEITUNG

Unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Rabl wird in der Fakultät Maschinenbau an der Hochschule Regensburg eine „Kalte Bombe“ entwickelt und aufgebaut.

Eine Kalte Bombe ist kein Sprengkörper, sondern ein im Fachjargon üblicher Begriff für einen Hochdruckkammerprüfstand zur Strahlbilderfassung von Einspritzstrahlen. Die kalte Bombe ist das Pendant zur heißen Bombe. Bei der kalten Bombe wird das Einspritzmedium nicht gezündet, während es bei der „heißen Bombe“ zur Zündung kommt. Um den Brennraum eines Motors möglichst realitätsgetreu nachzubilden, kann der Innendruck bis zu 20 bar Überdruck betragen. Der Innendruck hat maßgeblichen Einfluss auf das Strahlbild, was in Bild 2 erkennbar ist. In der linken Bildhälfte wird das Medium bei 1 bar Innendruck eingespritzt. In der rechten Bildhälfte sieht man eine deutliche Veränderung des Strahlbildes bei 18 bar Innendruck.



**Bild 2:** Einspritzstrahlen bei unterschiedlichem Druckniveau [1]

Der Prüfstand soll vor allem eine möglichst realitätsgetreue und reproduzierbare Erfassung von Strahlbildern ermöglichen. Mittels der Strahlbilder wird ein Vergleich verschiedener Injektoren und Einspritzmedien möglich.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über mögliche Prüfstandsarten zur Untersuchung der Strahlbildprüfung.

Prüfstandart	Vorteile	Nachteile
<b>Druckloser Prüfstand</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preiswerte Ausführung</li> <li>• Leichte Bauweise</li> <li>• Geringer Aufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable Werkstoffwahl (Glas, Makrolon, ...)</li> <li>• Kein Realitätsvergleich möglich</li> <li>• Reine Strahlbilduntersuchung</li> </ul>
<b>Kalte Bombe bis 20 bar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleich mit der Realität möglich</li> <li>• Verwendung von Normteilen in Bezug auf Schaugläser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewicht des Prüfstandes (ca. 100 kg)</li> <li>• Einhaltung der Druckgeräterichtlinie</li> </ul>
<b>Heiße Bombe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realitätsgetreue Abbildung möglich</li> <li>• Untersuchung der Flammenfront möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewicht des Prüfstandes (ca. 200 kg)</li> <li>• Einhaltung der Druckgeräterichtlinie</li> <li>• Entwicklung einer Schauglasfassung</li> <li>• Spezielle Werkstoffwahl in Bezug auf Druck und Temperatur</li> </ul>

Tabelle 1: Überblick über mögliche Prüfstände

**THEORETISCHE GRUNDLAGEN**

Für das Einspritzen von Kraftstoff gibt es, wie eingangs erwähnt, eine große Variantenvielfalt an Einspritzinjektoren. Die verwendete Art des Injektors ist abhängig von den Anforderungen und dem jeweiligen Brennstoff. Nachfolgend werden einige momentan gebräuchliche Injektorarten genannt:

- Saugrohr-Injektor
- Diesel-Injektor
  - Piezo-Injektor
  - Magnetspulen-Injektor
  - Sacklochdüse
  - Sitzlochdüse
- Benzin-Injektor
  - Piezo-Injektor

Der Düsenkörper weist mehrere Spritzlöcher auf. Je nach Motor liegt die Anzahl zwischen 5 (PKW) bis 14 (Großdieselmotor, z. B. für Schiffe oder Kraftwerke). Der Lochdurchmesser variiert zwischen 0,15 mm (Pkw) und 0,4 mm (Lkw). Die Spritzlochanzahl, -größe und der Spritzlochwinkel sowie die Strömungsverhältnisse an den Düsenlöchern beeinflussen den Einspritzstrahl und dessen Zerstäubung (Spritzbild). Das Spritzbild beeinflusst zusammen mit der Einspritzmenge, dem Einspritzdruck, dem Druckverlauf, der Brennraumgeometrie, der Ladungsbewegung, dem Kompressionsdruck und der Temperatur die Verbrennungsqualität bei der Verbrennung des Kraftstoffs. [2]

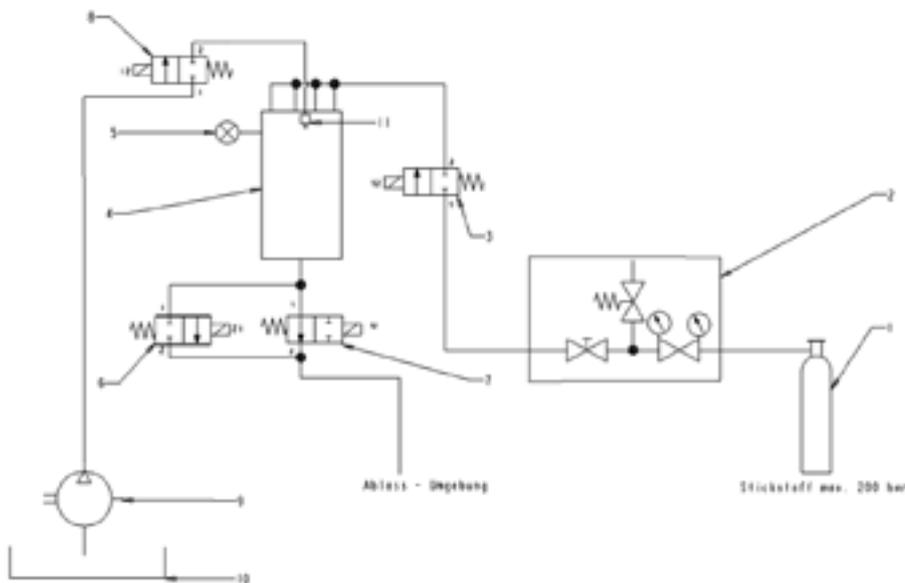
**BETRIEB DES PRÜFSTANDES UND DRUCKREGULIERUNG**

Für den Betrieb des Prüfstandes wurde der in Bild 3 dargestellte Schaltplan entwickelt. Das System wird über eine Stickstoffflasche (1) versorgt. Der Flaschendruckminderer (2) wird auf 20 bar Hinterdruck eingestellt. Durch Öffnen des Einlassventils (3) wird die Kammer bei geschlossenem Ablassventil (7) auf 20 bar gefüllt. Die Ventile (3) und (7) unterscheiden sich in Ihrer Ruhelage. Während Ventil (7) stromlos offen ist, ist Ventil (3) stromlos geschlossen. Diese Anordnung und Verschaltung wurde aus sicherheitstechnischen Gründen so gewählt, um eine drucklose Kammer bei Ausfall des Versorgungsstromes zu erhalten. Nach der Befüllung ist die Versuchsanlage bereit für Injektionen zur Strahlbilduntersuchung.

Nach einigen Injektionen wird das Ablassventil (7) geöffnet und der Druck auf Umgebungsdruck abgebaut. Durch diese Beschaltung ist es möglich, den Zellkörper optimal mit Stickstoff zu befüllen und zu spülen. Dieser Spülvorgang ist notwendig, um den Kraftstoffnebel, der nach den Injektionen entsteht, aus der Kammer zu beseitigen.

Die Komponenten (8, 9, 10) stellen die Kraftstoffversorgung der Einspritzdüse (11) dar.

Ein wichtiger Aspekt der Anforderungsliste ist die Drucknivellierung des Prüfstandes. Dies wurde durch ein elektrisch angesteuertes Proportionalventil (6) erreicht. Das Diagramm in Bild 4 zeigt die mögliche Druckregulierung der Kammer. Nach dem Gesetz der isothermen Zustandsänderung nach

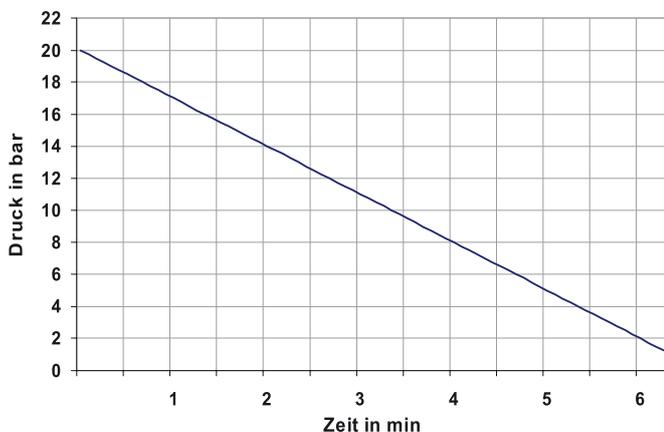


**Bild 3:**  
Schaltplan des Prüfstandes

Gl. (1) ergibt sich bei einem Kammervolumen von 4 l bei 20 bar ein Inhalt von 80 l Stickstoff.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (1)$$

Das Proportionalventil hat eine Nennweite von 2 mm, wodurch sich ein minimaler Durchfluss von 0,2 l/s ergibt. Dies erlaubt eine sehr feine Regulierung des Innendruckes durch kontrolliertes Ablassen des Inertisierungsmediums.



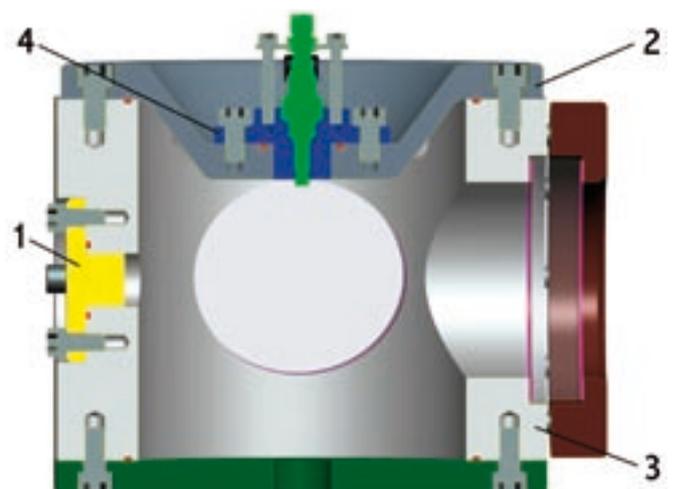
**Bild 4:** Druckregulierung durch das Proportionalventil

Außerdem kann durch das Proportionalventil der Kammerdruck langsam auf Umgebungsdruck entspannt werden. Ein direktes, schlagartiges Ablassen über das Magnetventil (7)

würde zu nicht zulässigen Geräuschemissionen führen. Wie man aus dem Diagramm in Bild 4 entnehmen kann, wird der Druck in ca. sieben Minuten bei minimal geöffnetem Ventil auf Umgebungsdruck abgebaut.

### KONSTRUKTIVE DETAILS

In Bild 5 ist ein Schnitt durch den Prüfstand dargestellt. Eine entscheidende Frage zu Beginn der konstruktiven Tätigkeiten war die richtige Materialwahl für den zentralen Druckkörper (3). Erste überschlägige Berechnungen ließen



**Bild 5:** Schnittdarstellung des Prüfstandes

erwarten, dass sowohl Stahl als auch Aluminium ausreichende Festigkeit haben würden. Da ein Halbzeug aus Stahl gegenüber einem Vollmaterial aus Aluminium fertigungstechnische und preisliche Vorteile aufweist, wurde ein Rundrohr aus S235JR verwendet.

Bei der Konstruktion wurde eine leichte Montierbarkeit angestrebt. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass die Injektoren um 360° drehbar sind und schnell bei geringem Werkzeugeinsatz gewechselt werden können.

Durch gegenseitiges Tauschen der Injektoraufnahme (4) mit dem Blinddeckel (1) kann die Unterseite des Strahles auf dem Bildschirm sichtbar gemacht werden, ohne dabei die Kameraposition zu ändern.

Die austauschbaren Injektoreinheiten sind als einfaches Drehteil ausgeführt, um später schnell und kostengünstig auf geänderte Injektorgeometrien reagieren zu können. Des Weiteren sind die unterschiedlichen Injektoraufnahmen so konstruiert, dass die Position der Injektorspitze immer an der gleichen Position liegt und bei den Untersuchungen gerade noch im Kamerabild sichtbar ist. Die Injektoraufnahmen erfordern im zylindrischen Bereich am Ende der Injektoren eine sehr enge Toleranz von  $\pm 0,01$  mm um die Funktion der Injektordichtung zu gewährleisten. Die konische Form des Deckels wurde gewählt, um die Strömungsverhältnisse bei der Durchspülung der Druckzelle zu verbessern. Die Abdichtung der verschraubten Bauteile erfolgt einfach und preisgünstig mittels O-Ringen.

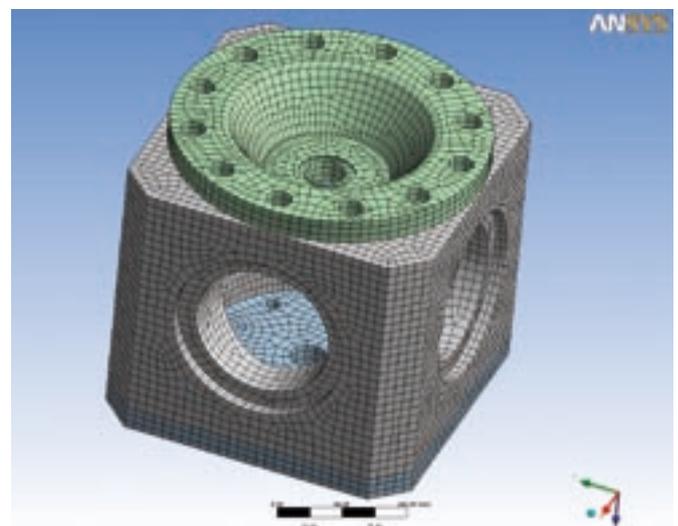
Einzig die Abdichtung der Schaugläser erfolgt nicht über O-Ringe, sondern über Flachdichtungen aus Aramidfasern. Die Norm für Druckbehälterschaugläser sieht eine Abdichtung in dieser Form vor. Aramidfaserdichtungen benötigen eine hohe Flächenpressung von  $30 \text{ N/mm}^2$ . Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von sehr starken Schraubenverbindungen für die Schauglasbefestigung. Im vorliegenden Fall wurden 12 Zylinderkopfschrauben M12 verwendet.

Für die Druckleitungen und deren Anschlüsse wurde auf das System der Firma Swagelok zurückgegriffen. Deren Komponenten garantieren eine zuverlässige Funktion für Drücke bis 100 bar und eine einfache Montage.

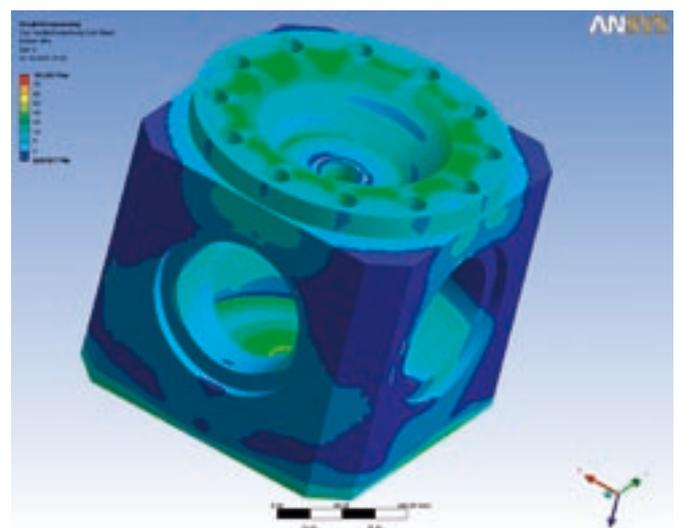
**BERECHNUNGEN**

Für einen Druckbereich bis 25 bar sieht der Hersteller, für Schaugläser mit einem Durchmesser von 135 mm eine Schauglasdicke von 25 mm bei Verwendung von Borosilicatglas vor. Weitere Berechnungen wurden nicht durchgeführt, da es sich um Normgläser handelt.

Die Berechnung der hochbelasteten Schraubenverbindungen erfolgte mit dem Berechnungsprogramm Kisssoft. Die Anzahl der Schrauben zur Verschraubung der Dichtflächen, wurde über das Verhältnis  $l_h/d_h$  [5] festgelegt um die Gleichmäßigkeit des Anpressdrucks zu verbessern.



**Bild 6:** Netzqualität



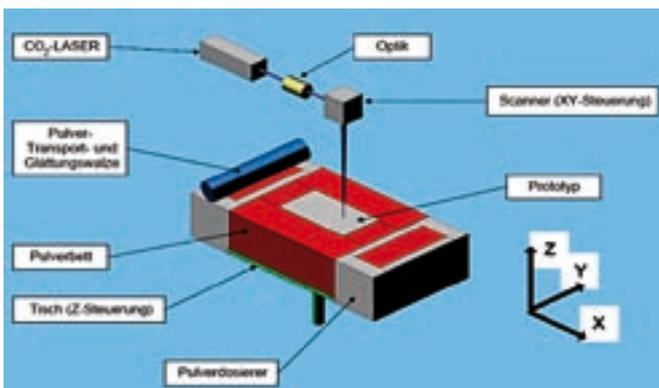
**Bild 7:** Vergleichsspannung v. Mises

Aufgrund des hohen Innendrucks wurde für den Druckkörper ein Festigkeitsnachweis geführt. Da der Körper im Bereich der Schauglasfassungen und des Deckels keinen konstanten Querschnitt besitzt und Spannungsspitzen nur schwer ana-

lytisch zu ermitteln sind, erfolgte die Spannungsberechnung numerisch unter Verwendung der vorhandenen 3D-CAD-Volumenmodelle. Dazu wurde auf den FEM Pre-/Postprozessor Ansys Workbench V11 mit Ansys Solver zurückgegriffen. In Bild 6 ist das vernetzte FE-Modell dargestellt und Bild 7 zeigt als Ergebnis die Vergleichsspannung. Das Modell wurde mit Solid-Hexaeder-Elementen vernetzt. Der Festigkeitsnachweis wurde mittels FKM-Richtlinie und dem Softwaretool Rifest geführt. Hierbei wurde sowohl die Statische Bauteilfestigkeit als auch die Dauerfestigkeit überprüft. Die Simulation zeigt, dass an den kritischen Stellen eine ausreichende Festigkeit zu erwarten ist.

**RAPID PROTOTYPING**

Um einen frühzeitigen Test für die richtige Wahl von Kameraobjektiven und mögliche Beleuchtungsalternativen durchzuführen wurde ein Prototyp mittels selektiven Lasersintern erstellt. Das selektive Lasersintern (SLS) ist eine Methode aus der Gruppe der Rapid Prototyping Verfahren, bei der räumliche Strukturen durch Sintern aus einem pulverförmigen Ausgangsstoff hergestellt werden. Es ist ein generatives Schichtbauverfahren: Schicht um Schicht wird das Werkstück aufgebaut. Ohne Werkzeuge können so beliebige dreidimensionale Geometrien auch mit Hinterscheidungen erzeugt werden, die sich in konventioneller mechanischer oder gießtechnischer Fertigung unter Umständen nicht herstellen lassen. Grundvoraussetzung ist, dass die Geometriedaten des Produktes dreidimensional vorliegen und als Schichtdaten verarbeitet sind. Aus den vorliegenden CAD-Daten des Bauteils (üblicherweise STL-Format) erzeugt man durch sogenanntes „Slicen“ entsprechende Schichten. In Bild 8 sind schematisch die Bestandteile des Verfahrens dargestellt.



**Bild 8:** Selective Laser Sintering

Meist kommt als Laser ein CO<sub>2</sub>-Laser, ein ND:YAG-Laser oder ein Faserlaser zum Einsatz. Der pulverförmige Werkstoff ist beispielsweise Polyamid 12 oder ein anderer Kunststoff, ein kunststoffbeschichteter Formsand, ein Metall- oder Keramikpulver.

Das Pulver wird auf eine Bauplattform mit Hilfe einer Walze vollflächig in Dicken von 0,001 bis 0,2 mm aufgebracht. Die Schichten werden durch eine Ansteuerung des Laserstrahles entsprechend der geslicten Kontur des Bauteils schrittweise in das Pulverbett gesintert oder eingeschmolzen. Die Bauplattform wird nun geringfügig abgesenkt. Das neue Pulver wird direkt von der Walze durch Anheben einer Pulverplattform zur Verfügung gestellt. Die Bearbeitung erfolgt Schicht für Schicht in vertikaler Richtung. Dadurch ist es möglich, auch hinterschnittene Konturen zu erzeugen. Die vom Laser zugeführte Energie wird vom Pulver absorbiert und führt zu einem lokal begrenzten Sintern oder Verschmelzen von Partikeln unter Reduktion der Gesamtoberfläche. [3]

Bild 9 zeigt den gesinterten und montierten Prototypen. Es wurden die Einzelteile des Prüfstandes gesintert, um die Schaugläser montieren zu können. Dadurch sind erste Tests unter realen Bedingungen mit der Kamera und den möglichen Beleuchtungseinrichtungen durchführbar. Mit den Testergebnissen kann somit eine richtige Wahl des Objektivs und der Beleuchtung im Vorfeld getroffen werden.



**Bild 9:** Gesintertes Prototyp aus Polyamid

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer**

Tel.: 0941 943-5179

Fax: 0941 943-1428

thomas.schaeffer@maschinenbau.fh-regensburg.de

106

## ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Konstruktion des Prüfstandes wurde eine kalte Bombe entwickelt, die den geforderten Anforderungen entspricht. Durch die einfache Konstruktion und die Verwendung von Anschlussarmaturen konnte ein Prüfstand gebaut werden, der preiswert ist und möglichst gut auf zukünftige Injektoren und Forschungsaufgaben erweiterbar ist. Untersuchungen an neuen Einspritzdüsen und Flüssigbrennstoffen sind ohne größere Umbauten möglich. Die Konstruktion des Deckels erlaubt eine einfache Anpassung an beliebige Injektortypen. Dies wird durch ein Wechseln von separaten Aufnahmen möglich. Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass alle zu fertigenden Teile in der Werkstatt der Fakultät Maschinenbau gefertigt werden können und die nötigen Halbzeuge bei lokalen Lieferanten bezogen werden können.

## SCHRIFTUM

- [1] Langen, Melcher, Missy, Schwarz, Schünemann: Neue BMW 6- und 4-Zylinder Ottomotoren mit High Precision Injection und Schichtbrennverfahren. Fortschritt-Berichte VDI „28. Internationales Wiener Motorensymposium 2007“, Reihe Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Nr. 639. Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH 2008, S. 92 ff.
- [2] [http://de.wikipedia.org/wiki/Einspritzd%C3%BCse\\_%28Dieselmotor%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Einspritzd%C3%BCse_%28Dieselmotor%29); Stand: 09.11.2007
- [3] <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Lasersintern&printable=yes>; Stand: 09.11.2007
- [4] Villmer: Rapid Prototyping-Technologien und Anwendungen. Präsentation Transferveranstaltung Innovation in der Konstruktion, Bielefeld, 2003
- [5] Muhs, Wittel, Jannesch, Becker, Voßiek: Maschinenelemente. Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2003

## PARAMETRISCHE CHASSISENTWICKLUNG FÜR DIE FORMULA STUDENT UNTER VERWENDUNG DER FINITEN ELEMENTE METHODE

### 1. EINLEITUNG

Für die Formula Student 2008 wird vom Team Dynamics der FH Regensburg ein Fahrzeug entwickelt. Zu dessen Unterstützung wurde ein Gitterrohrrahmen konstruiert und dazu begleitend Simulationsrechnungen für verschiedene Bauvarianten durchgeführt. Es wird eine Lösung erarbeitet, die es ermöglicht, den Rahmen steifigkeitsoptimiert aufzubauen und im Zuge späterer Änderungen bei der Synthese der einzelnen Fahrzeugmodule den Erfordernissen anzupassen.

Es ist zu berücksichtigen, dass das Chassis alle Funktionseinheiten aufzunehmen hat und einen maßgeblichen Einfluss auf die Einstellbarkeit des Fahrwerks nimmt. Die Ergebnisse der Simulation sind richtungsweisende Grundlagen bis erste Versuche an einem realen Chassis durchgeführt werden können.

### 2. MODELLAUFBAU

Um akzeptable Ergebnisse zu erhalten, werden dem Modell folgende Eigenschaften zugewiesen:

- Hohe Flexibilität bzgl. Änderungen.
- Kurze Berechnungszeit.
- Kleine Datensätze.
- Aufnahme aller wirkenden Kräfte und Momente.

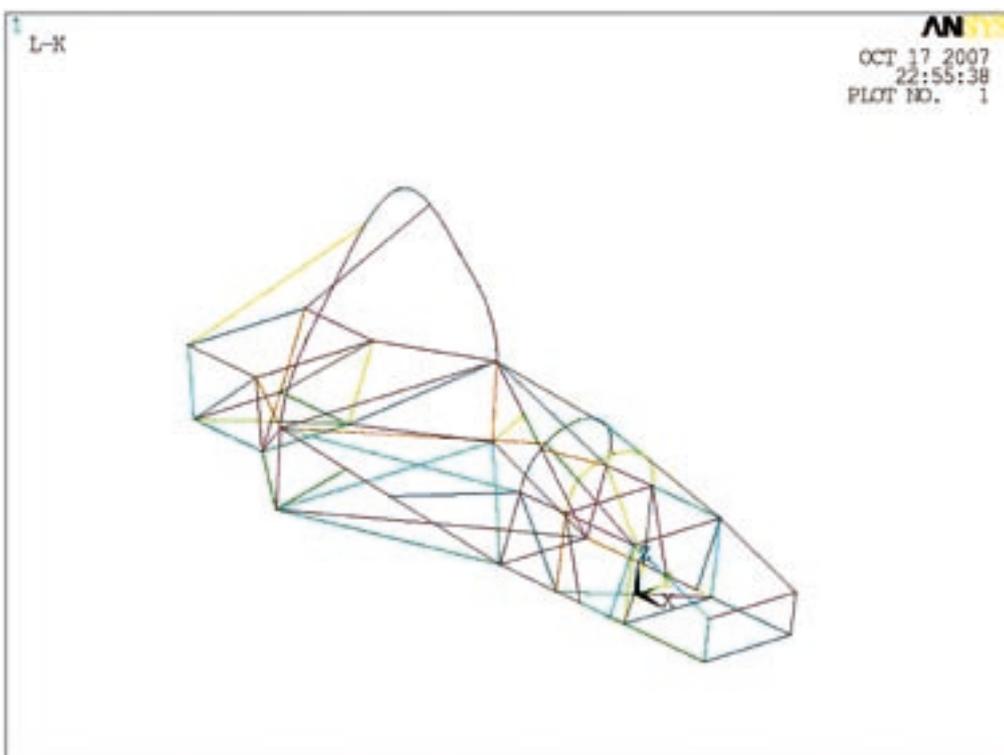
- Aussagekräftigkeit bzgl. der Steifigkeit.
- Erkennbarkeit des Verformungsverhaltens.

Für die erste Berechnung wurde ein Balkenmodell verwendet (Abb. 1).

Der Aufbau erfolgt direkt in Ansys Classic 10.0 unter Verwendung des „APDL – Codes“. Dies hat den Vorteil, dass ein ständiger Wechsel zwischen CAD und Berechnungssoftware vermieden werden kann. Des Weiteren wird eine Parametrisierung durchgeführt, die eine schnelle Veränderung und Anpassung an die Forderungen ermöglicht. Durch den Einsatz eines Balkenmodells sind Volumenmodellierungen nicht notwendig, was sich reduzierend auf die Datenmenge auswirkt. Definierte Randbedingungen in Form von Belastungen und Verformungen ermöglichen eine Berechnung der Reaktion des Rahmens.

### 3. VERNETZUNG

Auf der Basis eines geometrischen Linienmodells entsteht durch Diskretisierung mit FE-Balkenelementen, die das linear elastische Verhalten der Struktur beschreiben, das Simulationsmodell. Da hier keine Volumenelemente verwendet



**Abb. 1:** Simulationsmodell mit Balkenelementen

werden, erleichtert sich die Erstellung und die qualitative Bewertung der Vernetzung enorm. Für die Berechnung des gesamten Modells werden folgende Elemente verwendet:

Bezeichnung in Ansys	Elementeigenschaft und Funktionalität	Verwendung der Elemente
BEAM 189	quadratisches Balkenelement	Simulation des Rohrrahmens
LINK 180	Stabelement	Simulation von Querlenkern
COMBIN 14	Feder – Dämpfer Element	Erstellung der Fahrzeugfederung
MASS 21	Punktmassenelement	Einbringung von definierten Massen
CONTAC 52	Kontaktelement	Kontaktsimulation Reifen – Straße

Tabelle 1: Verwendete Elemente

Besonderer Aufmerksamkeit gilt dem Element „BEAM 189“. Dieses besitzt neben einem quadratischen Lösungsansatz auch die Eigenschaft, einen allgemeinen Querschnitt gemäß individueller Definition zu beschreiben. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, bei einem Minimum an Elementen aussagekräftige Ergebnisse bei kurzen Rechenzeiten ermitteln zu können. Für die Vorentwicklung sind dies ideale Voraussetzungen.

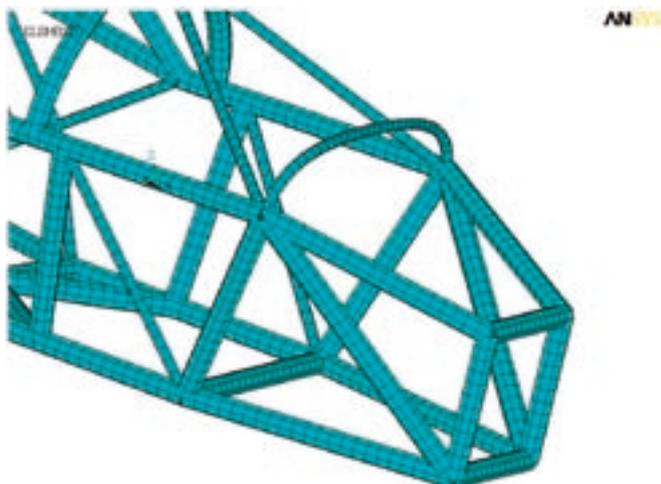


Abb. 2: Rahmen vernetzt mit Beam 189 Elementen

Insgesamt werden für die vollständige Vernetzung 2724 Elemente benötigt. Eine Variation der Größe und Anzahl der Elemente zeigt, dass sich die Ergebnisse bei Erhöhung

dieser Werte nur unwesentlich verändern. Die Rechendauer für die Lösung des gesamten Gleichungssystems unter Verwendung der Kontaktelemente (Reifen – Straße etc.) beträgt auf einer DELL Precision 670 ca. 30 Sekunden.

#### 4. RANDBEDINGUNGEN

Für verlässliche Ergebnisse ist eine möglichst realitätsnahe Lastaufbringung auf das diskretisierte Modell für folgende Fragestellungen notwendig:

- Berechnung der Torsionssteifigkeit
- Verhalten des Rahmens beim Crash (vereinfachte Berechnungsführung)
- Modalanalyse

Bezüglich der Bestimmung der Steifigkeit wird nach vorgegebenen Standards vorgegangen. Bei einer experimentellen Bestimmung wird die „Hinterachse“ festgespannt und die Vorderachse gegenüber einer Längsachse (oder bzgl. einer festgelegten Achse) verdreht [1]. Die Steifigkeit ergibt sich nach der in Abb. 3 dargestellten Beziehungen.

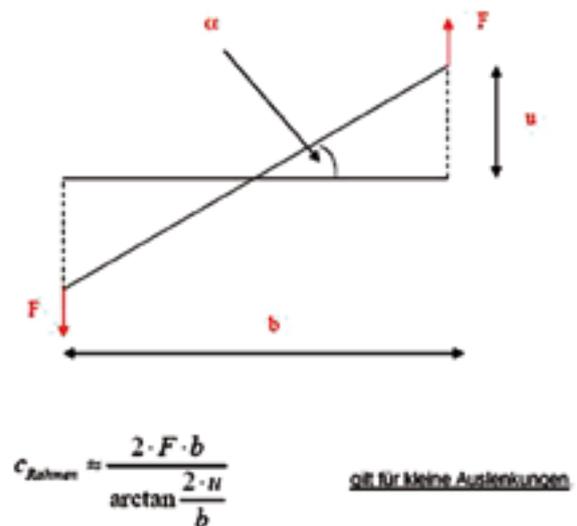


Abb. 3: Berechnung der Torsionssteifigkeit

Bei einer Analyse bezüglich des Crashverhaltens ist mit aufwendigeren Methoden vorzugehen. Dabei gilt der Grundsatz: Je genauer die Realität simuliert werden kann, desto mehr stimmen die Ergebnisse mit der Realität überein. Randbedingungen, die bis zu diesem Stand der Entwicklung bekannt sind, werden gemäß Abb. 4 eingearbeitet.

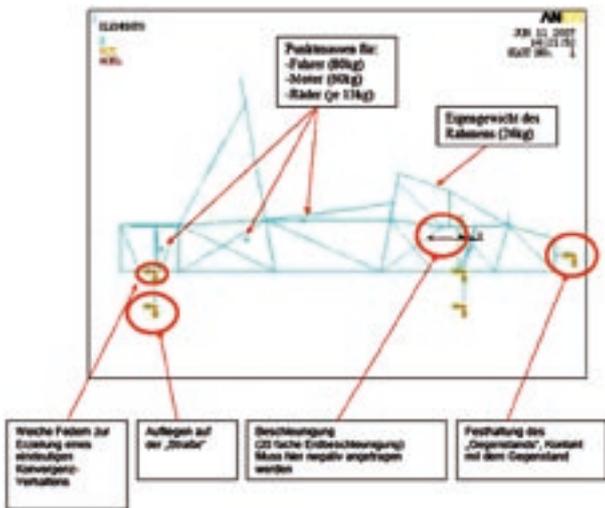


Abb. 4: Verwendete Randbedingungen

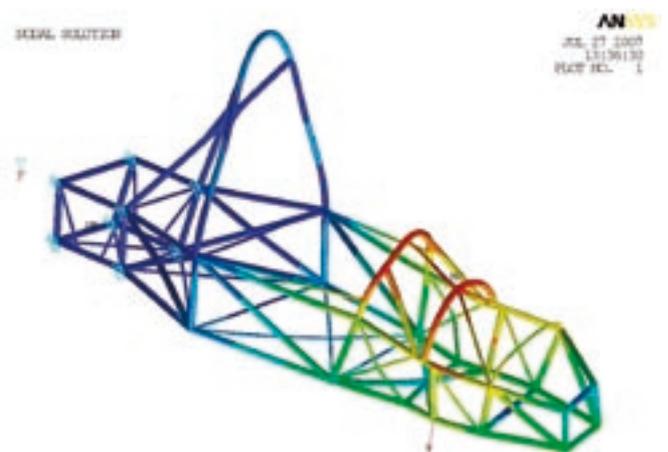


Abb. 5: Verformung des Rahmens bei Torsion um die Längsachse

Für eine Untersuchung des Rahmens bezüglich der Eigenfrequenzen sind keine weiteren Randbedingungen nötig. Jedoch sind folgende Bereiche bei Problemen mit der Struktur im Auge zu behalten:

- Motordrehzahl und deren Vielfache.
- Drehzahlen der einzelnen Stufen des Getriebes.

## 5. ERGEBNISSE

Ziel dieser Arbeit war der Aufbau eines parametrischen Modells, welches eine einfache und schnelle Optimierung des Chassis auf die angestrebte Steifigkeit von 2000 Nm/Grad[°] erlaubt.

Für die Berechnung wird elastisches Materialverhalten angenommen. Daraus resultiert, dass dauerhaft bleibende Verformungen nicht mit in das Strukturverhalten einbezogen werden. Die Simulation wird so konzipiert, dass die Ergebnisse in später noch durchzuführenden Versuchen überprüft werden können. Eine derartige Aufspannung ist realisierbar, ebenso wie die Messung der im Abb. 5 dargestellten Verformung.

Durch den Einsatz von Punktmassen für die schweren Fahrzeugteile und elastischen Kontaktelemente ist es möglich, eine erste Erkenntnis des Strukturverhaltens bei einem Frontalcrash zu ermitteln. Für diese Berechnungen werden durch das Reglement vorgeschriebene Beanspruchungen auf das Chassis übertragen. Abb. 6 zeigt eine Relativbewegung aufgrund der Feder - Dämpferelemente und die Verformung des Rahmens bei den genannten Randbedingungen.

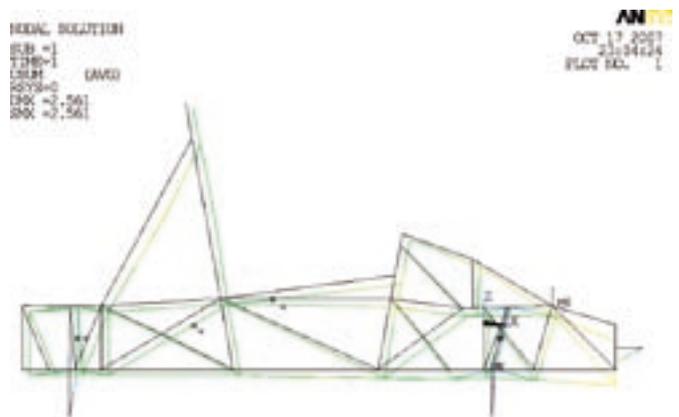
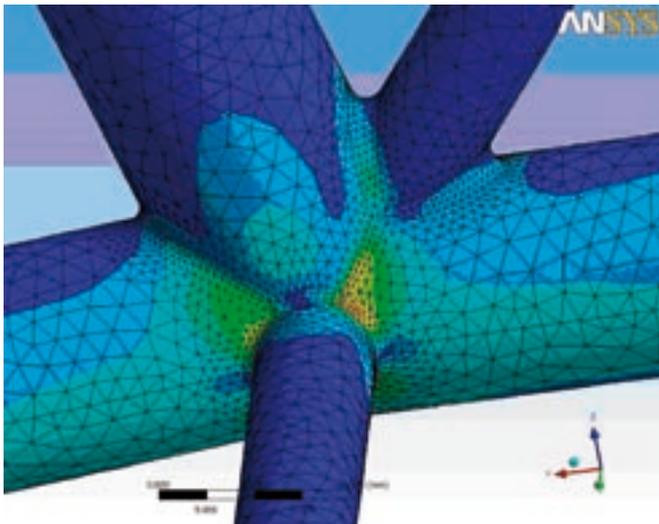


Abb. 6: Verformung des Rahmens bei vereinfachter Crashsimulation

Die Diskretisierung des Rahmens mit Balkenelementen erlaubt keine genaueren Rückschlüsse auf das Verhalten an spannungsüberhöhten Bereichen. Um hier genauere Aussagen zu erhalten ist eine Untersuchung der Struktur mit Shell- oder Solid-Elementen erforderlich. Die Simulation erfolgt hier auf Basis einer 3D-Diskretisierung der festigkeitsrelevanten Stellen mit Solid 187 (siehe Abb. 7). Dabei werden die maßgeblichen Deformationsgrößen an den Modellrändern aus dem Balkenmodell ausgelesen und als Randbedingungen auf das 3D-Modell übertragen.

**Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann**  
 Tel.: 0941 943-5182  
 Fax: 0941 943-1428  
 claus.schliekmann@maschinenbau.fh-regensburg.de



**Abb. 7:** FE-Netz und lokale Beanspruchungsspitzen an einem Rahmenausschnitt

## 6. FAZIT

Die durchgeführten Arbeiten haben die Vorteile eines Modelllaufbaus mit Beam-Elementen für die Erstellung eines Vorentwurfs gezeigt. Im Gegensatz zu dem aus ca. 3000 Elementen bestehenden Balkenmodell, ist für das Solid-Modell das 15-fache an Elementen notwendig.

Aufgrund der ermittelten hohen Spannungen an diskreten Stellen des Chassis sind in Teilbereichen der Struktur plastische Deformationen zu erwarten. Dies erfordert eine experimentelle Überprüfung der Ergebnisse und eine Anpassung des Simulationsmodells unter Einbeziehung elastisch-plastischer Materialbeschreibungen.

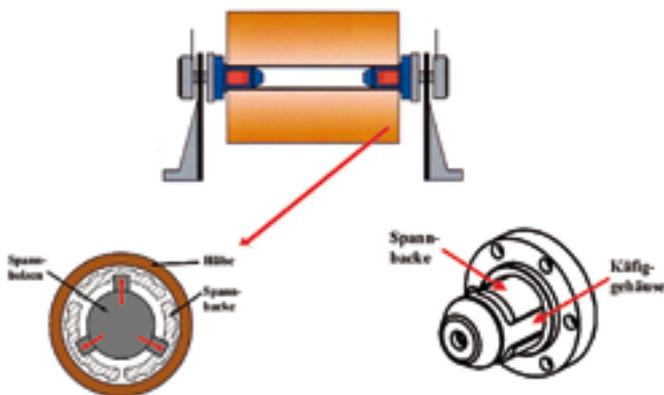
### LITERATUR:

- [1] Pippert, H.. Karosserietechnik 3. Auflage. Vogel-Verlag, (1998). ISBN 3-8023-1725-4.

## UNTERSUCHUNGEN AN PAPIERHÜLSEN UND SPANNKONEN IN DER WELLPAPPENINDUSTRIE – EINSPARMÖGLICHKEITEN DURCH OPTIMIERTE PRODUKTIONSANLAGEN

**Kurzfassung:** In vielen Anlagen zur Produktion von Wellpappe bleibt auf den abgewickelten Abfallrollen ein hoher Anteil Restpapier zurück, dessen effektive Verwendung die Ausgaben für Rohstoffe senken kann. In Zeiten hoher Anstrengungen zur Verbesserung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit ist der Zwang zum Sparen in vielen Unternehmen besonders groß. Neben den großen Kostenanteilen, wie den Personalkosten gibt es aber auch viele kleine Einsparmöglichkeiten. Eine Möglichkeit ist die Verringerung der Restbahnpapiere. Dies kann unter anderen durch eine optimale Abstimmung von Papierhülsen und der Spannbackengeometrie von Spannkonen erreicht werden. In der vorliegenden Arbeit werden Optimierungspotentiale im Bereich des Zusammenwirkens von Maschine und Papier aufgezeigt und Empfehlungen für die Hülsenqualität und zur Gestaltung der Spannkone gegeben.

Bei den Hartpapierhülsen handelt es sich um ein relativ „weiches“ Material, das den zum Teil sehr hohen Belastungen beim Abwickeln nicht immer stand hält (siehe Abb. 2). Das Betriebsverhalten wird dabei stark durch die Qualität der Hülsen beeinflusst. Wird die Hülse beim Abwickeln so stark beschädigt, dass die darauf aufgewickelte Papierbahn ebenfalls beschädigt wird, kann das restliche Papier nicht mehr vollständig verwendet werden und ist damit Abfall.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung eines Abrollständers mit Spannkone

### 1. EINLEITUNG

Das Rohpapier für die Wellpappenherstellung ist üblicherweise auf Hartpapierhülsen aufgewickelt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich durch die Verwendung dieser Hülsen erhebliche Probleme beim Aufnehmen der Rolle und beim Abwickeln des Papiers ergeben. Abb. 1 zeigt die schematische Darstellung eines Papierrollenabwicklers, wie er in einer Wellpappenproduktionsanlage verwendet wird.



**Abb. 2:** Beschädigung der Hülse und der Papierrolle

Ein weiteres Problem stellt das axiale Eindringen der Anlageflächen des Spannkonus in die aufgewickelten Papierbahnen beim Aufnehmen der Rolle dar. Das Papier an den Anlageflächen wird regelrecht aufgefaltet. Das führt zur so genannten Kreppfaltenbildung, die eine weitere Verwendung des Papiers unmöglich macht.

Betrachtet man zum Beispiel die abgewickelten Papierrollen einer typischen Wellpappenproduktion, fällt auf, dass sich auf vielen von ihnen noch ein großer Restpapieranteil befindet, der als Abfall wieder recycelt wird. Untersuchungen an einer laufenden Produktion haben gezeigt, dass die Restpapierdicke auf den Abfallrollen im Durchschnitt ca. 10 mm beträgt. Abhängig von der Grammaturlage ergeben sich so bis zu 30 Laufmetern Papier, das aufgrund verschiedener technischer Einschränkungen nicht mehr verarbeitet werden kann. Bei einer genaueren Betrachtung lässt sich nach Abzug eines Sicherheitsanteils für den Splicevorgang eine durchschnittliche Restpapiermasse pro verarbeiteter Tonne Rohpapier ermitteln. Diese erscheint mit 1,82 kg pro Tonne zwar relativ gering, auf die Jahresproduktion eines Unternehmens hochgerechnet würden sich durch die Verarbeitung dieses Restpapiers aber erhebliche Einsparmöglichkeiten ergeben. Dies ist ein Durchschnittswert und kann je nach Produktionsschwerpunkt und verwendeten Papierqualitäten variieren. Es zeigt jedoch, dass hier Einsparpotenzial vorhanden ist.

<sup>1</sup> Absolvent der FH Regensburg

<sup>2</sup> Leiter der Entwicklung, BHS Corrugated GmbH

<sup>3</sup> FH Regensburg, Fakultät Maschinenbau

Die oben beschriebenen Gründe, die zu Beschädigungen der inneren Papierbahnen und an der Papierhülse führen, können verschiedene Ursachen haben. Häufig sind sie jedoch auf eine unzureichende Hülsenqualität oder auf eine ungeeignete Kombination von Hülse und Spannkonus zurückzuführen.

Zur Beurteilung und Klassifizierung gebräuchlicher Papierhülsen werden eine Vielzahl von Hülsentypen unterschiedlicher Hersteller geometrisch vermessen und im Druckversuch, Zugversuch, Scheitel- und Stirnstauchwiderstandsversuch mechanisch getestet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Auswirkung der Druckbelastung auf die Hülsen bei unterschiedlichen Spannbackengeometrien sowie das Zusammenspiel verschiedener Spannbackenmodelle mit Hülsen unterschiedlich großer Innendurchmesser in FEM-Simulationen untersucht.

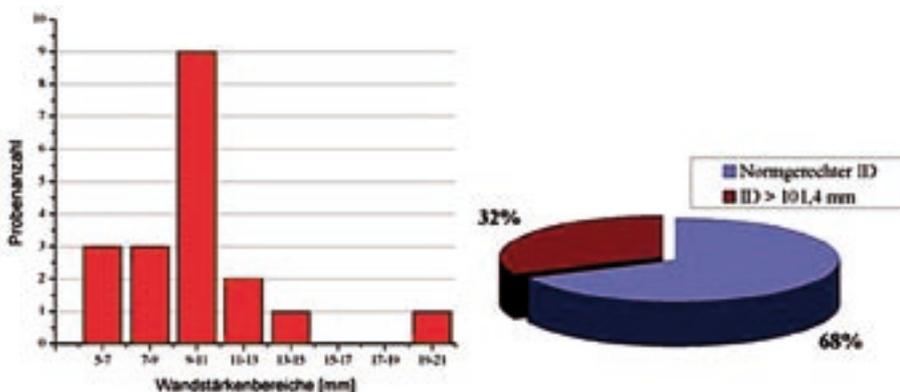
**2. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN**

**2.1 Probenvorbereitung**

Insgesamt wurden 19 verschiedene Hülsentypen von unterschiedlichen Herstellern untersucht. Die Wandstärken variieren von 6 mm bis 20 mm. Ein Drittel der Hülsen liegt außerhalb des genormten Innendurchmesserbereichs (siehe Abb. 3). Neben der geometrischen Unterscheidung weisen die Hülsen hinsichtlich Papierqualität und Anzahl der Papierlagen einen unterschiedlichen Aufbau auf.

Zur Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen werden Proben hergestellt. Die Hülsenringe haben eine Länge von 50 mm, die Hülsenmaße werden nach DIN ISO 11093-4 bestimmt und vor Durchführung der Versuche wer-

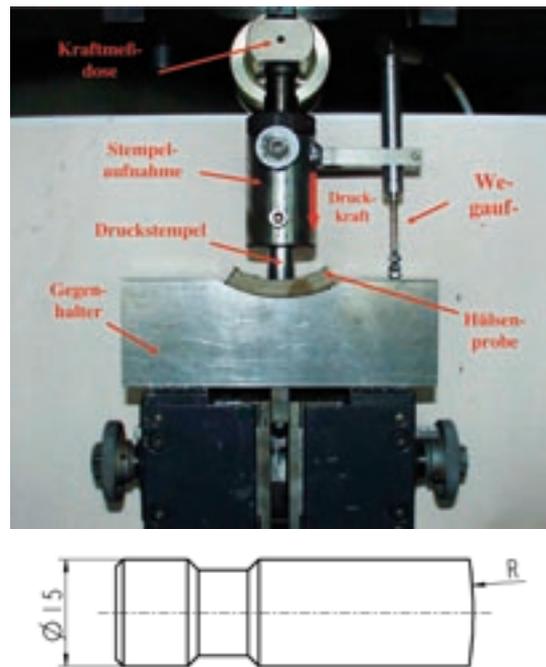
**Abb. 3:** Geometrische Klassifizierung nach dem Hülseninnendurchmesser



den die Proben mindestens eine Woche bei 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % gelagert.

**2.2 Druckversuche**

Durch Eindrücken eines Druckstempels in die Hülseninnenseite soll der Eindrückvorgang einer Spannbacke in die Hülse simuliert werden. Die Probe für den Druckversuch wird als Segment aus dem Hülsenring herausgesägt. Aufgezeichnet wird die Kraft über die Eindrücktiefe. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 gezeigt, ein typischer Messschieb Druckkraft vs. Eindrücktiefe in Abb. 5.



**Abb. 4:** Versuchsaufbau Druckprüfung mit Stempel

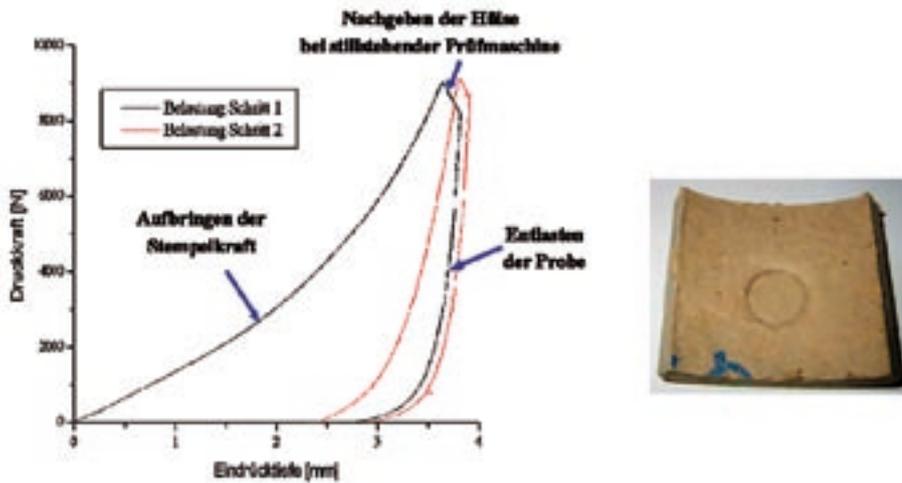


Abb. 5: Druckkraft-Eindrucktiefe-Diagramm mit getesteter Probe

Die Ergebnisse der Druckversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen (siehe Abb. 6):

- Es wurde kein Einfluss der Druckgeschwindigkeit festgestellt.
- Der Hülsenwerkstoff zeigt unter konstanter Belastung ein Fließverhalten.
- Es besteht ein Einfluss der Hüsendicke auf die Eindrucktiefe, d.h.,
  - große Hüsendicke korreliert mit einer hohen Eindrucktiefe,
  - geringe Hüsendicke führt zu einer geringen Eindrucktiefe.
- Es ist aber auch zu erkennen, dass die Eindrucktiefe nicht nur von der Wandstärke der Hülse abhängt, sondern auch von der verwendeten Papierqualität bzw. der Zusammensetzung aus mehreren verschiedenen Papierlagen.
- Mehrlagig aufgebaute Hülsen sind nicht zwangsläufig härter als Hülsen, die nur aus Schrenzpapier bestehen. Die Tendenz, dass Innenlagen aus höherwertigem Papier (z.B. Kraftliner) die Härte steigert ist jedoch erkennbar.
- Es wurden große Unterschiede für Hülsen mit ca. 10 mm Dicke ermittelt.
- Die Eindrucktiefe ist umgekehrt proportional zur Dichte der Hülse.

### 2.2 Zugversuche

Als Versuchsobjekte für den Zugversuch dienen 50 mm lange Hülsenstücke. Ziel des Versuchs ist es, die radiale Dehnung einer Hülse unter der Spannkraft von pneumatischen oder mechanischen Konen zu simulieren. Außerdem soll beurteilt werden welche Festigkeitseigenschaften die Hülse hat, d.h.

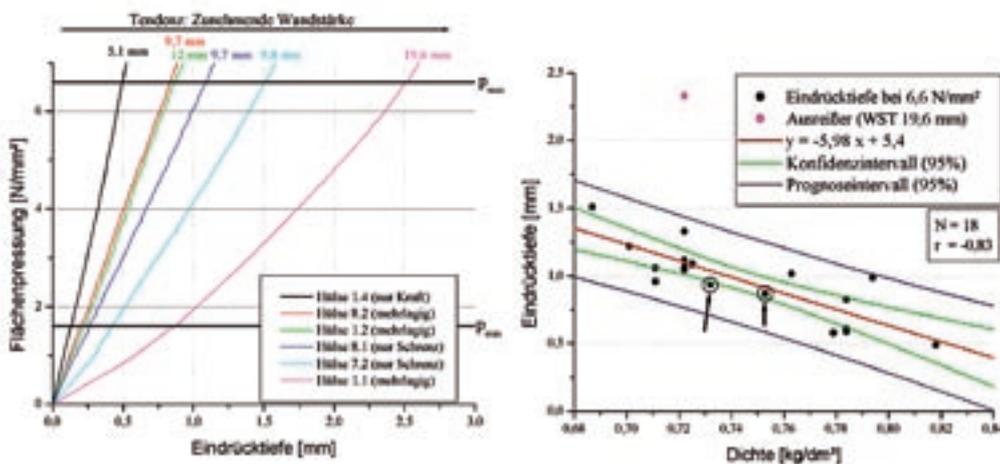


Abb. 6: Ergebnisse der Versuche

wie hoch die Gefahr ist, dass sie in Längsrichtung aufplatzt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 7 dargestellt. Damit die Hülse während des Ziehens nicht einknickt, wird sie durch zwei Halbschalen fixiert.

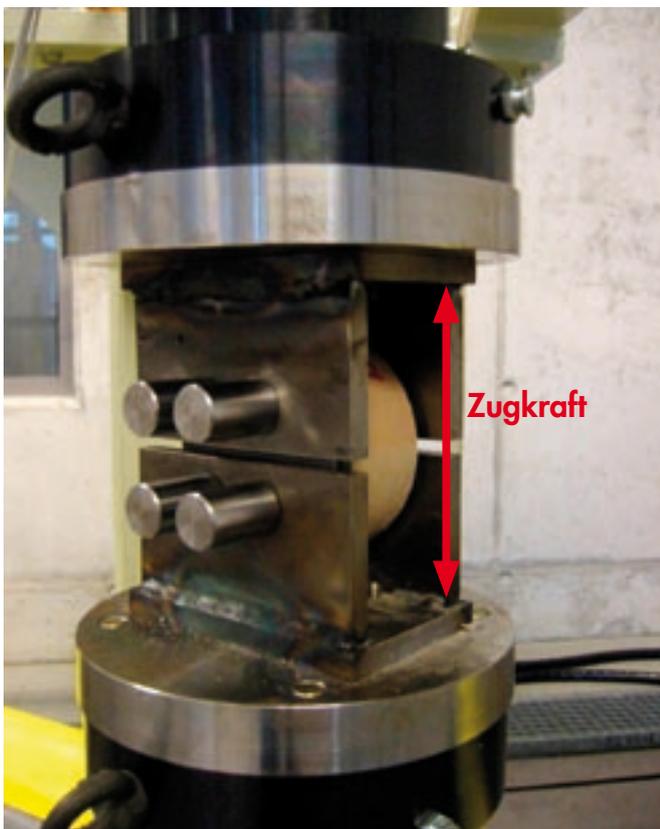


Abb. 7: Versuchsaufbau der Zugprüfung

Die Ergebnisse des Zugversuchs für einige typische Hülsen zeigt Abb. 8. In dieser Übersicht wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten dargestellt. Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen:

- Die Zuggeschwindigkeit hat keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften.
- Die Bruchdehnung der Hülsen liegt mit 3-4 % im Bereich der Bruchdehnung von Papier.
- Hülsen mit sehr kleiner Wandstärke zeigen die höchste Zugfestigkeit. Sie bestehen ausschließlich aus Kraftlinerpapieren.
- Generell ist die Tendenz zu erkennen, dass Hülsen mit größeren Wandstärken auch geringere Zugfestigkeiten haben.
- Der Festigkeitsbereich von mehrlagig aufgebauten Hülsen überlagert sich mit dem Bereich der Hülsen, die nur aus Schrenz bestehen.

- Es existiert kein einheitlicher radialer E-Modul, wie etwa bei Stahl. Der radiale E-Modul nimmt mit zunehmender Wandstärke ab.

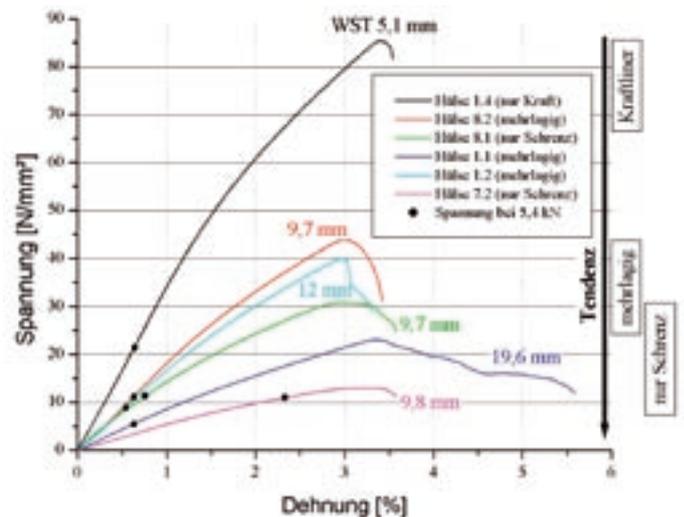


Abb. 8: Ergebnisse des Zugversuchs

### 2.3 Scheitelstauchwiderstand und Stirnstauchwiderstand

Zusätzlich zu den Druck- und Zugversuchen wurde der Scheitelstauchwiderstand von einlagigen Hülsen bestimmt. Die Bestimmung des Scheitelstauchwiderstandes erfolgt nach DIN ISO 11093-9. Die Hülsenprobe wird bei diesem Test so zwischen zwei parallele Platten gelegt, dass ihre Achsen parallel zu den Platten verläuft (siehe Abb. 9). Die Hülse wird dann so lange gestaucht, bis das erste Kraftmaxima, das dem Scheitelstauchwiderstand entspricht, deutlich überschritten ist.

Da sich bei der Untersuchung von Spannkonen gezeigt hat, dass die axiale Kraft, die die Spannarme des Abrollers auf die Hülse ausüben, einen großen Einfluss auf die Auffaltung des Hülsenendes hat, wurde die Hülse ebenfalls auf axiale Stauchung getestet (Abb. 10). Es werden die gleichen Probengeometrien wie beim Scheitelstauchversuch verwendet. Da es für diesen Versuch keine Norm gibt wird das erste Kraftmaximum in Analogie zum Scheitelstauchwiderstand als Stirnstauchwiderstand bezeichnet.

Für das Strukturversagen beim Stirnstauchversuch ergibt sich ein typisches Schadensbild, wie es in Abb. 10 gezeigt wird. Die Papierhülse sollte in axialer Richtung eine Belastung von ca. 40 kN ertragen können. Das entspricht der maximalen Kraft, die der Abroller beim Zusammenführen der Konen gegen die Papierrolle aufbringt.

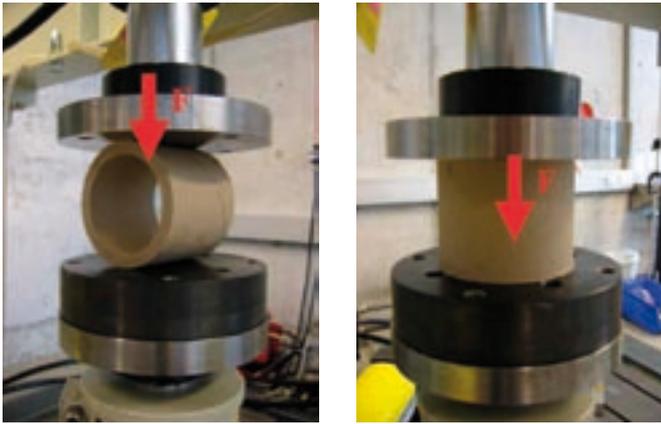


Abb. 9: Versuchsaufbau Scheitel- und Stirnstauchwiderstand

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, dass der Stirnstauchwiderstand sehr gut mit dem Scheitelstauchwiderstand korreliert (siehe Abb. 11). Ferner folgt, dass nur Hülsen mit einem sehr hohen Scheitelstauchwiderstand auch druckbeständig gegen die axiale Kraft der Abrollarme sind.

### 2.4 Zusammenhänge der gemessenen Merkmale

Für eine Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse ist es vorteilhaft, sich einen Überblick über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Messergebnissen mit Hilfe der Korrelation zwischen zwei Merkmalen X und Y einer Messreihe zu verschaffen. Mit der Formel

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2\right)}} \quad (1)$$

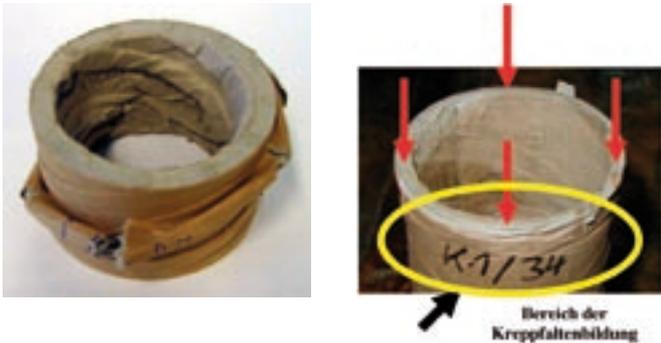


Abb. 10: Schadensbild beim Stirnstauchversuch

lässt sich für die praktische Versuchsauswertung der empirischen Korrelationskoeffizient r berechnen, der immer nur Werte zwischen -1 und 1 annehmen kann. In dieser Gleichung bezeichnen n die Anzahl der Einzelmessungen, x und y die arithmetischen Mittelwerte der Einzelmessungen. Für die Extremfälle  $r = -1$  und  $r = 1$  liegen alle Stichprobenpunkte auf einer Geraden  $y = ax + b$ . Für Werte nahe unterhalb  $|r| = 1$  liegen die Punkte nur noch annähernd auf einer Geraden. Je weiter  $|r|$  gegen Null geht, umso weiter streuen die Stichprobenpunkte um diese Gerade. Für  $r = 0$  existiert keine Korrelation zwischen den Einzelmerkmalen X und Y. Der empirische Korrelationskoeffizient ist daher ein Maß für den Grad einer linearen Abhängigkeit, d.h. er gibt an, wie gut eine Gerade den Zusammenhang zwischen den Merkmalen X und Y beschreibt. Für die in Abb. 12 gezeigte Korrelationskoeffizientenmatrix werden die gemessenen Einzelmerkmale zueinander in Bezug gesetzt. Positive Werte für den Korrelationskoeffizienten r zeigen einen direkten proportionalen Zusammenhang zwischen den Merkmalen auf, negative Werte für r bedeuten einen indirekten proportionalen Zusammenhang. So können zum Beispiel auf die Druckstauchung keine weiteren Merkmale zurückgeführt werden. Die Mindestzugfestigkeit und der radiale E-Modul bzw. der Scheitelstauchwiderstand und der Stirnstauchwiderstand korrelieren dagegen sehr gut miteinander (siehe auch Abb. 13). Das bedeutet, dass bei jeweils einem bekannten Wert des einen Merkmals, der Wert der anderen Größe vorhergesagt werden kann.

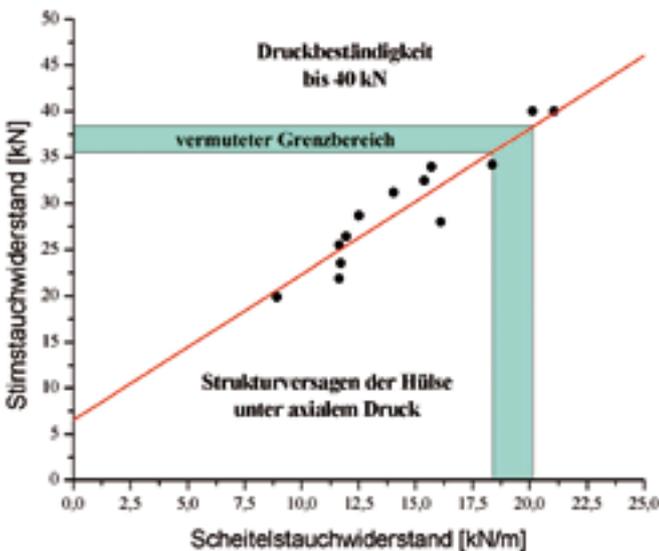


Abb. 11: Gegenüberstellung Stirn- und Scheitelstauchwiderstand

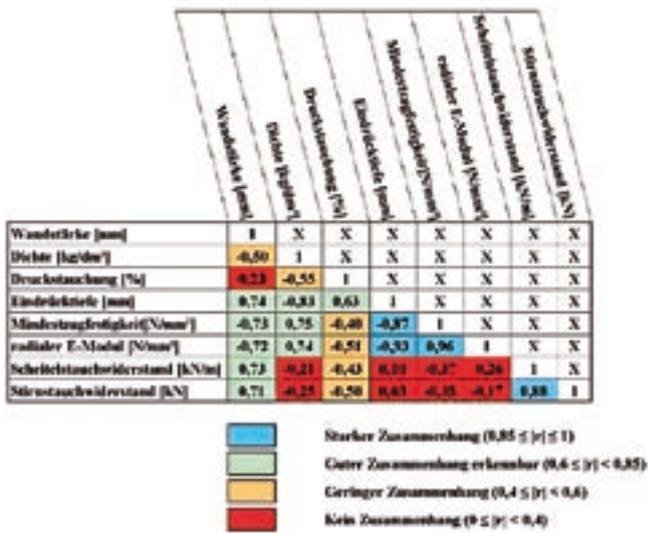


Abb. 12: Korrelationskoeffizientenmatrix der gemessenen Merkmale

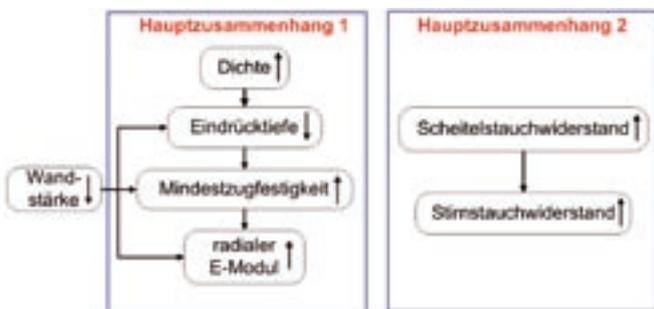


Abb. 13: Hauptzusammenhänge zwischen verschiedenen Hülseigenschaften

Die Mindestzugfestigkeit und der radiale E-Modul lassen sich sehr gut mit der Dichte der Hülse in Verbindung bringen (siehe Abb. 13). Dieser Zusammenhang beruht auf der Tatsache, dass dichteres Papier, also zum Beispiel Kraffliner, auch die Zugfestigkeit erhöht.

### 3. FEM-SIMULATION

#### 3.1 Idealisierung

Mit dem Ziel einer Gestaltoptimierung werden vier verschiedene Spannschalengeometrien betrachtet – wie sie bei kraftgesteuerten Konen zur Anwendung kommen – und in nicht-linearen FEM-Kontaktsimulationen im Zusammenwirken mit der Papierhülse untersucht (Abb. 14). Die Kontaktsimulation

zwischen Spannschale und Hülse wird mit einem dreidimensionalen „surface-to-surface“ - Modell realisiert. Die Wahl der Elementtypen für die Diskretisierung ergibt sich aus der Forderung nach einem dreidimensionalen Solid-Modell. Es wurden die ANSYS-Elemente SOLID186 für die Papierhülse, SOLID187 für die Spannschalen sowie für den „surface-to-surface“ – Kontakt die Elemente TARGE170 und CONTA174 verwendet. Die Vernetzung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Allgemein gilt: Je feiner die Vernetzung, umso genauer die Resultate. Da eine hohe Vernetzungsdichte aber zugleich eine längere Rechenzeit bedeutet, werden zuvor Untersuchungen zur Festlegung einer optimalen Netzdichte durchgeführt.

Weitere Idealisierungen der Simulationsmodelle betreffen die Werkstoffeigenschaften, die Randbedingungen und die wirkenden Kräfte. Die Hülse wird trotz ihres stark anisotropen Aufbaus als isotroper Körper idealisiert. Eine bleibende plastische Verformung wird ebenfalls nicht berücksichtigt.

Aus den oben beschriebenen Modellannahmen lassen sich Erkenntnisse zum Aussagesumfang der Ergebnisse ableiten. So ist festzustellen, dass bezüglich der wahren Zustandsgrößen, wie Spannungen oder Eindrücktiefen der Spanbacken in die Hülsoberfläche keine quantitativen sondern nur qualitative Aussagen zu treffen sind. Damit wird ein Vergleich der Spannschalen untereinander im Hinblick auf die Druckspannungsverteilung in der Kontaktzone ermöglicht

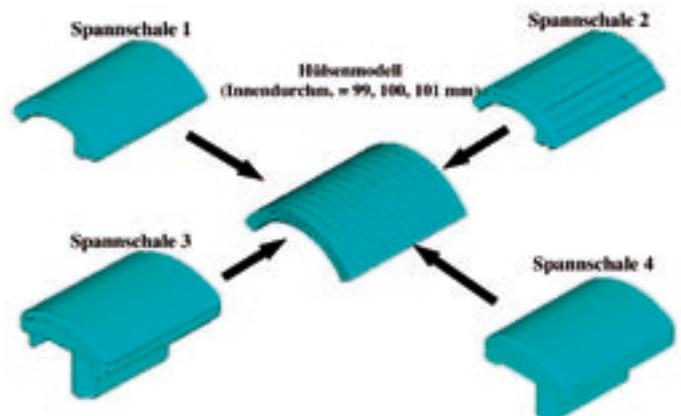
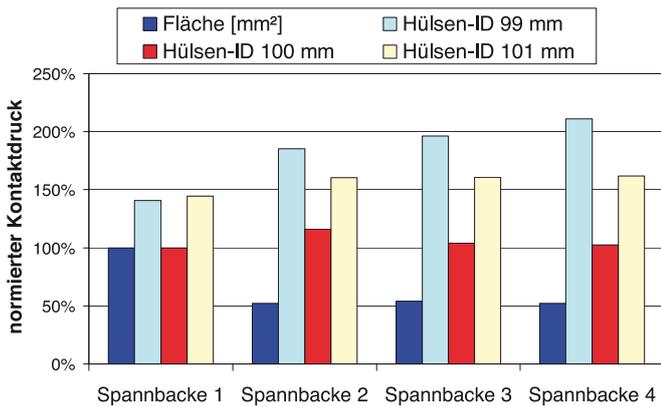


Abb. 14: Untersuchte Spanbackenmodelle für kraftgesteuerte Konen

#### 3.2 Ergebnisse der FEM-Simulation

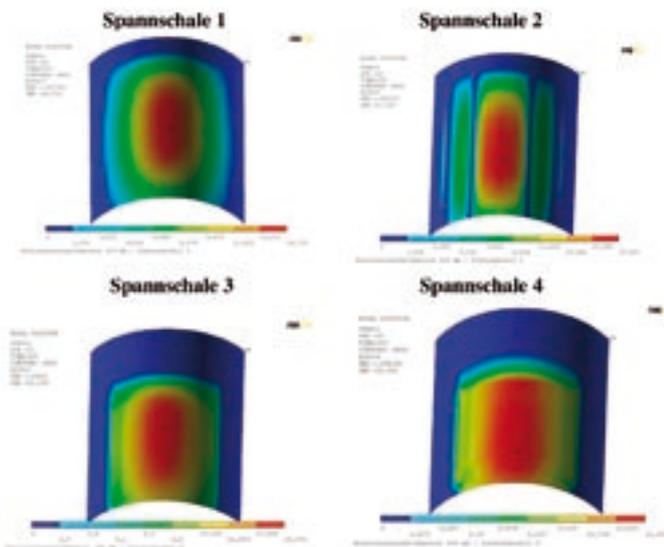
In Abb. 15 sind die Ergebnisse für die Kontaktdrücke in normierter Form zusammengefasst. Die Normierung bezieht sich immer auf das Spannschalenmodell 1 und dem Hül-

**Normierter Kontaktdruck der berechneten Spannbackenmodelle**



**Abb. 15:** Normierte Kontaktdrücke

seninnendurchmesser 100 mm. Zur Veranschaulichung der Beanspruchungsverteilung wird der Kontaktdruck für alle vier Spannbackenmodelle in Abb. 16 gezeigt. In Abb. 17 wird der Einfluss unterschiedlicher Hülseninnendurchmesser durch die Visualisierung der Kontaktreibspannung verdeutlicht. Die Geometrie der Spannbacken hat auf die Belastung der Hülsen einen wesentlichen Einfluss. Die Spannbacken 1 und 2 haben eine Länge von 100 mm und eine Breite von 80 mm, die Spannbacken 3 und 4 weisen eine Länge von 80 mm und eine Breite von 50 mm auf.



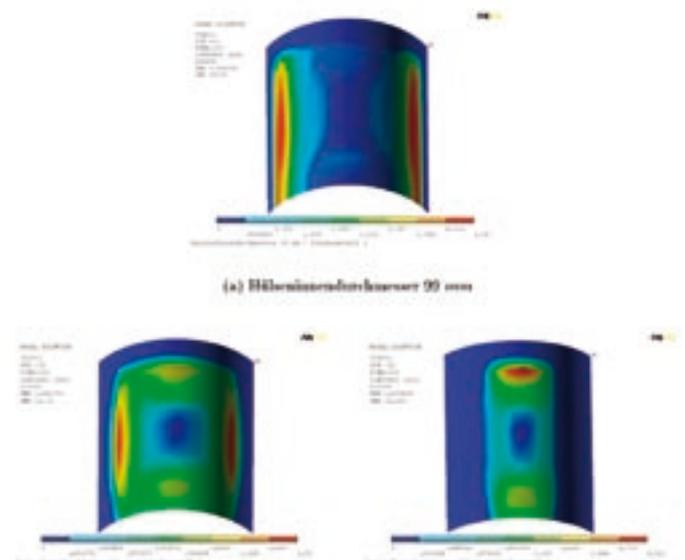
**Abb. 16:** Kontaktdruckverteilung – Hülseninnendurchmesser = 100 mm

*Hülseninnendurchmesser 99 mm*

Bei einer zu kleinen Hülse, d.h. 99 mm Innendurchmesser, im Vergleich zum Radius der Spannbacken, wird der gesamte Druck über die Kanten der Spannbacken übertragen (siehe Abb. 17). Durch den hohen Druck können die Kanten in die Hülse einschneiden und so die Hülse beschädigen. Bei der Untersuchung von Stichproben für auf dem Markt befindliche Hülsen wurden jedoch keine Hülsenproben gefunden, die einen kleineren Durchmesser als 100 mm aufweisen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass in der Praxis dieser Fall kaum auftreten wird und deshalb hier nicht weiter untersucht werden muss.

*Hülseninnendurchmesser 100 mm*

Die Spannbacke 1 hat im Vergleich zu anderen Spannbackenvarianten eine fast doppelt so große Kontaktfläche aufzuweisen. Man könnte nun erwarten, dass diese Spannbacke die geringste Flächenpressung auf die Hülse ausübt. In der Simulation hat sich diese Vermutung aber nicht bestätigt, denn die Maximaldrücke unterscheiden sich kaum von den anderen (siehe Abb. 15 und 16). Der Grund dafür ist, dass die seitlichen Enden der Spannbacke unter der Druckbelastung nachgeben. Wegen der zu geringen Steifigkeit der Schale kann der Druck nicht mehr gleichmäßig über die gesamte Kontaktfläche übertragen werden und konzentriert sich aus diesem Grund auf den sehr steifen Bereich genau über dem Spankeil. Bei der Variante 2 überträgt überwiegend der schmale Steg in der Mitte die Hauptkontaktbelas-



**Abb. 17:** Tragverhalten bei verschiedenen Hülseninnendurchmessern

tung. Auch hier ist die Spannschale wieder zu nachgiebig, um den Druck gleichmäßig zu verteilen. Die Variante 3 weist trotz ihrer nur halb so großen Kontaktfläche in etwa die selben Maximalkontaktspannungen wie die Variante 1 auf. Bezogen auf die Kontaktfläche ergibt sich deshalb für die Variante 3 eine wesentlich bessere Druckverteilung, was im Wesentlichen auf die höhere Steifigkeit zurückzuführen ist. Aufgrund dieser Erkenntnis, dass die Steifigkeit der Spannbacke einen wesentlichen Einfluss auf die Druckverteilung hat, wird mit der Variante 4 eine Optimierung mit dem Ziel angestrebt, eine weitgehend homogene Druckverteilung zu erreichen.

*Hülseninnendurchmesser 101 mm*

Die Hülsen mit einem Innendurchmesser von 101 mm erhöht sich die Flächenpressung erheblich, da die Enden der Spannbacke kaum Kontakt zur Hülse haben und deshalb auch keine Belastung aufnehmen können. Das Tragbild zeigt nur deutliche Spuren im mittleren Bereich über dem Spannkeil (siehe Abb. 17).

Eine Reduzierung der Druckbelastung hängt also primär ab von der Steifigkeit der Spannbacke. Je steifer die Spannbacke, um so homogener auch die Druckverteilung über die gesamte Kontaktfläche. Ebenso wichtig ist die maßgenaue Anpassung der Spannbacke an die Hülse. Nur wenn beide exakt den gleichen Radius aufweisen ist eine optimale Druckverteilung und damit eine Minimierung der Belastungen der Hülse möglich.

Während bei den untersuchten Spannkonenvarianten eine quasi reibschlüssige Verbindung angestrebt wird, gibt es auch Bauvarianten mit prismatischen und stegförmigen Spannelementen, die durch ein lokales Eindringen in die Hülse eine eher formschlüssige Verbindung anstreben. Diese nicht in der FEM-Simulation untersuchten Spannkonen, z.B. nach dem Segura-Prinzip, zeigen im praktischen Einsatz häufig Schadensmerkmale wie in Abb. 2 gezeigt. Eine gleichförmige Spanndruckverteilung ist durch die weitgehend lokale Anpressung nicht erreichbar. Zudem treten an der Stelle der Einpressung singuläre Druckspannungsspitzen auf, die ein Eindringen und Verkrallen der Konusoberfläche in die Hülse durch eine Beschädigung der inneren Papierlagen bewirken. So wird eine weitgehend formschlüssige Verbindung erreicht, die allerdings beim Durchrutschen der Hülse zu irreversiblen Schäden an der Hülse führt.

**4. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE HÜLSENQUALITÄT UND FÜR SPANNKONEN**

Auf der Basis der Laborversuche sowie auf Grund von Erkenntnissen, die durch eine zusätzlich vorgenommene Musternahme von Hartpapierhülsen aus einem Produktionsbetrieb gewonnen wurden, kann gesagt werden, dass die Ursache eines Versagens der Hülse beim Abrollen im nicht optimalen Zusammenwirken von Hülse, Spannkonus und Spannkonzent zu sehen ist. Um eine Empfehlung für die Hülsenqualität abzugeben, ist eine differenzierte Betrachtung notwendig. Man kann nicht generell sagen, dass eine Hülse genau eine bestimmte Eigenschaft erfüllen muss, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Um eine möglichst große Anlagefläche für die Spannkonen zu bieten und um eine Beschädigung des überstehenden Papiers vorzubeugen, sollten die Hülsen aber eine bestimmte Mindestwandstärke von 10 mm nicht unterschreiten. Außerdem muss die Anlagefläche des Konus so gestaltet sein, dass er beim Spannen nur an der Hülse und nicht am Papier abstützt und dieses auch damit nicht beschädigen kann.

Bei **weggesteuerten Spannkonen**, wie zum Beispiel nach dem Segura-Prinzip empfiehlt sich generell die Verwendung von harten bzw. sehr steifen Hülsen, da diese einen gewissen Widerstand gegen das Eindringen der Spannprismen leisten und daher eine gute Zentrierung der Hülse sicherstellen. Hülsen mit diesen Merkmalen haben sehr häufig geringe Wandstärken (< 10 mm). Sollten Hülsen mit größerer Wandstärke verwendet werden, empfehlen sich mehrlagig aufgebaute Hülsen, die auf den Innenbahnen eine dicke Schicht Kraftliner-Papier aufweisen. Damit kann eine gewisse Absicherung gegen das Ausmahlen der Hülse erreicht werden, aber das Problem des axialen Spanndruckes, der bei diesem Konentyp unbedingt notwendig ist, bleibt bestehen. Bei dem weggesteuerten Typ sind also Hülsen mit einer harten Innenbahn und einem sehr hohen Scheitelstauwiderstand zu verwenden.

Wesentlich besser geeignet und schonender für die Hülsen sind **kraftgesteuerten Spannkonen**. Die Spannbackenschaalen von kraftgesteuerten Konen (siehe Abb. 14) weisen deutlich größere Kontaktfläche auf, als die der weggesteuerten Bauarten. Die Übertragung des Bremsmoments erfolgt dabei hauptsächlich über die Reibung zwischen den Spannbacken und der Hülse.

**Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann**

Tel.: 0941 943-5182

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@maschinenbau.fh-regensburg.de

Eine rein kraftschlüssige Momentenübertragung ist aber nicht immer realisierbar, da die Profilierung der Spannschalen und die Oberflächenhärte der Hülsen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Art der Kraftübertragung haben.

Eine gewisse formschlüssige Verbindung ergibt sich durch die Tatsache, dass sich die Spannbacken geringfügig in die Hülse eindrücken. Bei der Verwendung sehr harter Hülsen ist die Verwendung profilierter Spannbacken zu empfehlen. Bei weichen Hülsen drücken sich auch nicht profilierte oder gering profilierte Schalenoberflächen in die Hülsenoberfläche ein.

Es hat sich gezeigt, dass die Festigkeitseigenschaften der Hülsen einen eher untergeordneten Einfluss auf das Betriebsverhalten haben. Jedoch wird empfohlen, Hülsen mit einem hohen Scheitelstauchwiderstand zu verwenden, um Stabilität gegen axiales Auffalten zu erreichen.

Bei den Praxistests und den FEM-Analysen hat sich gezeigt, dass die verkleinerten Spannflächen der Konen in Käfigbauweise eine gute Spannqualität erzielen. Durch die gleichförmige Druckverteilung ergibt sich ein definiertes Eindrückverhalten in die Hülseninnenseite.

Einen guten Kompromiss zwischen kraft- und formschlüssiger Übertragung des Bremsmomentes bietet eine leichte Profilierung der Spannbacken. Diese muss allerdings so gestaltet sein, dass die Papierbahnen und die Hülse nicht wesentlich geschädigt werden.

Bei der Verwendung von glatten Spannschalen kann gesagt werden, dass keine sehr harten bzw. sehr steifen Hülsen eingesetzt werden sollten. Aufgrund der sehr geringen Eindrücktiefe ist eine sichere Übertragung des Bremsmomentes nicht gewährleistet.

Wegen der geringen Verschmutzungsneigung und des zuverlässigen Betriebsverhaltens werden leicht profilierte Spannkone in Käfigbauweise empfohlen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

In vielen Anlagen zur Produktion von Wellpappe bleibt auf den abgewickelten Abfallrollen ein hoher Anteil Restpapier zurück, dessen effektive Verwendung die Ausgaben für Rohstoffe senken kann. In Zeiten hoher Anstrengungen zur Verbesserung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit ist der Zwang zum Sparen in vielen Unternehmen besonders groß. Neben den großen Kostenanteilen gibt es aber auch

viele kleine Einsparmöglichkeiten. Eine Möglichkeit ist die Verringerung der Restbahnpapiere. Dies kann unter anderen durch eine optimale Abstimmung von Papierhülsen und der Spannbackengeometrie von Spannkonen erreicht werden. Im Bereich des Abrollers ist in Hinblick auf eine gute Ausnutzung der Papierrolle noch viel Optimierungspotential vorhanden, dass nur vollständig ausgeschöpft werden kann, wenn sowohl die Hülse, der Spannkonus und der Abroller optimal aufeinander abgestimmt sind.

Empfehlenswert wäre die Schaffung eines Mindeststandards für die Hülsenqualität mit einer einheitlichen Wandstärke. Nur so kann der Spannkonus an die Festigkeit und Geometrie der Hülse optimal angepasst werden und der Restrollenrechner die noch aufgewickelte Papiermenge exakt bestimmen. Um das Ziel einer gesteigerten Qualität beim Abrollen zu erreichen, ist also eine enge Zusammenarbeit aller beteiligten Parteien erforderlich.

In der vorliegenden Arbeit werden Optimierungspotentiale in diesem Bereich des Zusammenwirkens von Maschine und Papier aufgezeigt und aus den bisher erzielten Ergebnissen Empfehlungen für die Hülsenqualität und zur Gestaltung der Spannkone abgeleitet.

## 6. LITERATUR

- [1] Verband der Wellpappen-Industrie e.V., Zahlen und Fakten. Die wichtigsten Zahlen für die Wellpappen-Industrie, Darmstadt (2001)
- [2] Allgemeine Papierrundschau, Heft 29 (2002)
- [3] Gerhardt, T. D., External Pressure Loading of Spiral Paper Tubes: Theory und Experiment. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Band 112, (1990)
- [4] Roisum, David, R., The Mechanics of Winding. Tappi Press, Atlanta (1994)
- [5] Gerhardt, T. D., External Pressure Loading of Spiral Paper Tubes: Theory und Experiment. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Band 112, (1990)
- [6] Schneider, T., Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Hülsen in der Papierindustrie. Diplomarbeit, FH Regensburg (2002)

## BETRIEBSFESTIGKEITSANALYSE VON SCHWEISSNÄHTEN MIT HILFE DER FINITE ELEMENTE METHODE

### 1 EINLEITUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein sogenanntes Traversenkreuz auf seine Dauerfestigkeit hin zu untersuchen. Bei einem solchen Traversenkreuz handelt es sich um eine Schweißbaugruppe, die vorwiegend aus Blechbiegeteilen von 6 mm rostfreiem Stahlblech (X5CrNiMo1810) besteht. Mit einem Teilkreisdurchmesser von 5500 mm liegt die Masse der Baugruppe bei etwa 1300 kg. Abbildung 1 zeigt ein CAD Modell der Baugruppe.



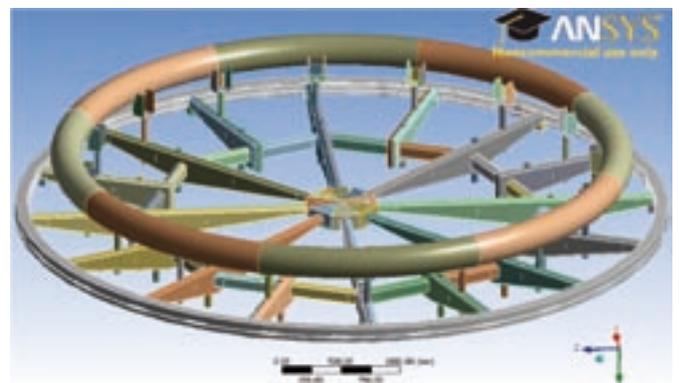
**Abb. 1:**  
*Traversenkreuz*

Diese Baugruppe kommt als tragendes Element in einer Rundläufermaschine zur Abfüllung von PET-Flaschen zum Einsatz. Sie trägt dabei alle rotierenden Teile der Anlage. Neben verschiedenen statischen Lasten wirken auch zyklische Lastanteile auf das Traversenkreuz ein. Insbesondere solche zyklischen Lastanteile können zu frühzeitiger Beschädigung durch Rissbildung am Bauteil führen. Im Zuge dieser Arbeit soll deshalb zunächst eine detaillierte Analyse der vorliegenden Belastungen durchgeführt werden. Mit Hilfe eines FEM-Modells sollen dann die versagenskritischen Stellen am Traversenkreuz ermittelt werden. Um dieses FEM-Modell zu verifizieren wird ein Versuch mit Dehnmessstreifen (DMS) an der realen Maschine durchgeführt. So kann zusätzlich überprüft werden, ob die angenommene Belastungssituation vollständig korrekt erfasst wurde. Gegebenenfalls können dann noch Anpassungen am Berechnungsmodell vorgenommen werden. Weiterhin sollen alle kritischen Stellen auf ihre Dauerfestigkeit hin untersucht werden. Hierzu existieren verschiedene Berechnungsmodelle, die neben analytischen Berechnungen auch den Einsatz der FEM-Methode erfordern. Im Zuge dieser Arbeit sollen drei dieser verschiedenen Berechnungsmodelle miteinander verglichen werden. Sinn des Ganzen ist es, die optimale Vorgehensweise zur Berechnung ähnlicher Baugruppen in der Zukunft aufzuzeigen und festzustellen, welcher Detaillie-

rungsgrad am FEM-Modell erforderlich ist, um gute Ergebnisse zu erzielen. Die Frage nach dem Detaillierungsgrad ist besonders interessant, da der Aufbau eines so großen FEM-Modells ganz erheblichen Modellierungsaufwand bedeutet. Wenn die optimale Methode identifiziert ist, wird diese auf das vorliegende Traversenkreuz angewandt und somit eine detaillierte Dauerfestigkeitsanalyse durchgeführt. So kann dann eine Aussage darüber getroffen werden, ob evtl. konstruktive Änderungen notwendig sind um kostspielige Reparaturen durch Schäden im späteren Betrieb zu vermeiden.

### 2 FEM-MODELL

Um zunächst die kritischen Stellen am Traversenkreuz zu ermitteln ist es nötig ein FEM-Modell zu generieren, welches die reale Situation möglichst gut abbildet. Hier kommt die Software ANSYS WORKBENCH x-64 zum Einsatz. Auf Grund der Größe der Baugruppe wird zunächst das gesamte FE-Modell als Schalenmodell aufgebaut. So kann die Rechenzeit gegenüber einem Volumenmodell auf einen Bruchteil reduziert werden. Als Ausgangsmodell dient eine 3D-CAD Zeichnung des Füllers. Zunächst wird das Modell vereinfacht, indem alle die Geometriedetails entfernt werden, die sich nicht unmittelbar auf die Steifigkeit und Verformung des Traversenkreuzes auswirken. Die Steifigkeit des Traversenkreuzes, und damit die auftretenden Verformungen werden im Wesentlichen durch das Traversenkreuz selbst, den Ringkessel und den Ventilträger beeinflusst. Ein auf diese Komponenten reduziertes Geometriemodell ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abb. 2:** *Reduzierte Geometrie des Traversenkreuzes*

Alle weiteren Komponenten wie Füllventile, Flaschen oder die Füllung des Ringkessels werden durch das Aufbringen äußerer Kräfte auf die in Abbildung 2 dargestellte Struktur

simuliert. Um Vergleiche zum Detaillierungsgrad anstellen zu können, wird zusätzlich ein 45° „Tortenmodell“ erzeugt. Dieses wird dann unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen berechnet. Auch ein Vollmodell inklusive Maschinengestell wird aufgebaut. Ein Vergleich der drei verschiedenen Modelle wird allerdings zeigen, dass das in Abbildung 2 dargestellte Modell optimal ist. Auf diesen Vergleich soll hier aber nicht näher eingegangen werden.

### 3 BELASTUNGEN AUF DAS TRAVERSENKREUZ

Um ein brauchbares FEM-Modell aufzubauen, müssen alle realen Lasten so gut wie möglich erfasst werden. Diese lassen sich in statische und dynamische Lasten einteilen. Der statische Lastenteil besteht im Wesentlichen nur aus der Gewichtskraft des Traversenkreuzes und dessen Anbauteile, das heißt, Ventilträger, Füllventile mit Hubzylinder, Elektroschaltschränke, Verkabelungen, Produktverteiler und Rohrleitungen sowie Ringkessel mit Füllung. Der dynamische Lastenteil setzt sich zusammen aus Zentripetalkräften durch die Anlagenrotation (ca. 5 Umdrehungen/min), der Übergabe von leeren und befüllten Flaschen, dem steigenden Flüssigkeitsspiegel in den einzelnen Flaschen während des Füllvorgangs und dem Befahren der sogenannten Hubzylinderkurve. Das Befahren der Hubzylinderkurve stellt hierbei den größten Lastenteil dar, so dass alle anderen dynamischen Lastenteile vernachlässigt werden können. Wegen seiner zentralen Bedeutung soll dieser Vorgang hier kurz erklärt werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Hubzylinder im Bereich der Hubzylinderkurve.

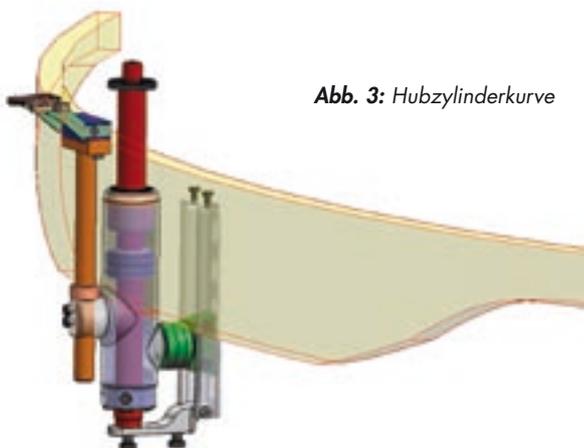


Abb. 3: Hubzylinderkurve

Tatsächlich besitzt jedes der 144 Füllventile einen eigenen Hubzylinder. Dessen Aufgabe ist es, die Flaschen zum Füllvorgang gegen die Füllventile nach oben gegen eine Dichtungsscheibe zu drücken. Dieser Hubzylinder ist praktisch genau anders herum eingebaut, als man es von einem Pneumatikzylinder gewohnt ist. Die Kolbenstange ist fest verschraubt und das Zylindergehäuse mit Flaschenhalterung bewegt sich auf und ab. Die rote Kolbenstange ist oben in den Ventilträger (im Bild nicht dargestellt) geschraubt und somit nicht beweglich. Die braune Stange im Bild ist mit einer Klammer für PET-Flaschen versehen und mit dem Zylindergehäuse fest verschraubt. Hier hängt im Betrieb die zu befüllende Flasche. Dadurch, dass im oberen Kolbenraum des Hubzylinders permanent Druckluft mit ca. 4,5 bar ansteht, drängt der Hubzylinder stets nach oben, um die Flaschen gegen die Füllventile zu drücken. In diesem Zustand wirken praktisch keine äußeren Kräfte auf das Traversenkreuz. Es wird in diesem Zustand also nicht durch die Zylinderkräfte beansprucht. Wenn nun die Flasche an die nächste Maschine im Abfüllprozess übergeben werden soll, muss zunächst der Hubzylinder mit der Flasche nach unten fahren, d.h. vom Füllventil weg. Hier kommt die sogenannte Hubzylinderkurve ins Spiel. Dadurch, dass die grüne Kurvenrolle an der Hubzylinderkurve entlang rollt, wird der Hubzylinder gegen den Zylinderinnendruck nach unten bewegt. Es befinden sich gleichzeitig bis zu 18 Hubzylinder auf der Kurve und verursachen eine Vertikalkraft von 13 kN auf das Traversenkreuz. Die daraus resultierende Verformung ist in Abbildung 4 dargestellt. Diese Verformung läuft praktisch um und verursacht somit eine Art „Walkverformung“, d.h. jeder einzelne Träger wird schwellend belastet.

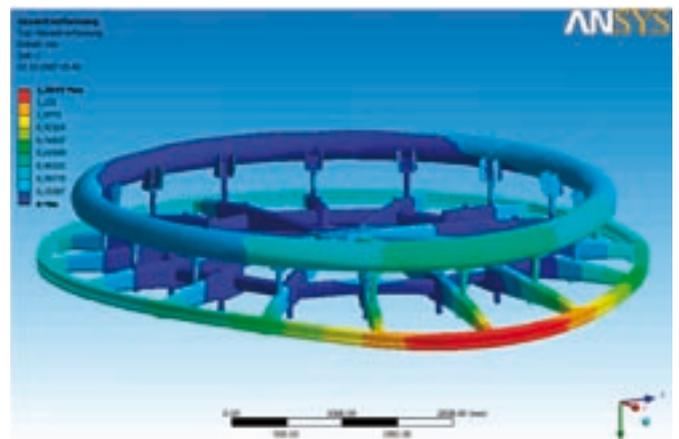
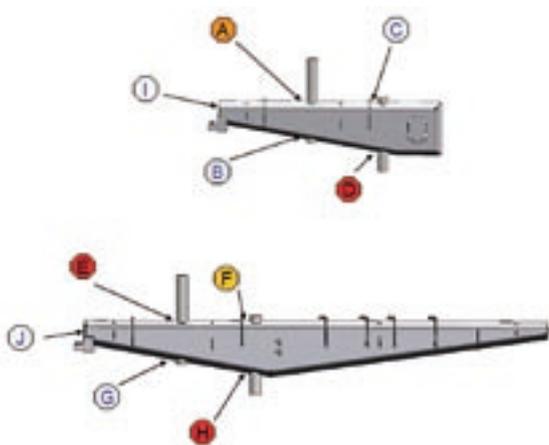


Abb. 4: Gesamtverformung des Traversenkreuzes

Die Kräfte die hier Auftreten sind zum Teil bekannt. Nicht klar ist, ob durch den Effekt des Auffahrens der Hubzylinder auf die Hubzylinderkurve zusätzliche Kraftanteile auftreten. Da bei diesem Vorgang jedoch pro Hubzylinder  $80 \text{ cm}^3$  in nur 0,3 Sekunden durch eine 6 mm Bohrung mit einer Tiefe von 120 mm verdrängt werden, liegt die Vermutung nahe, dass es hier zu einem Druckanstieg auf Grund des Strömungswiderstands kommt und deshalb eine kurze zusätzliche Lastspitze auftritt. Der Versuch wird hier Klarheit schaffen.

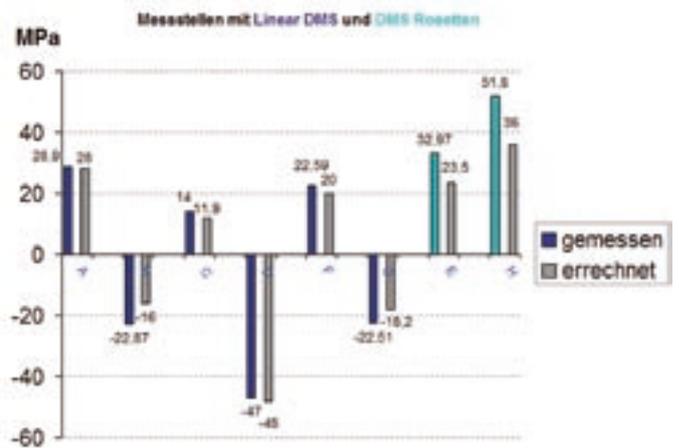
**4 VERSUCH AM REALEN BAUTEIL**

Um nun festzustellen, ob die Vorgehensweise mit dem FEM-Schalenmodell auch bei einer so großen Baugruppe verlässliche Ergebnisse bzgl. der errechneten Verformungen liefert, wird ein Versuch mit Dehnmessstreifen an der realen Anlage durchgeführt. Aufgrund der bisherigen FEM-Ergebnisse konnten die Bereiche A – H (s. Abbildung 5) als geeignete Messstellen identifiziert werden, da hier die höchsten Spannungen zu erwarten sind. Die gelben und roten Ballons kennzeichnen die Bereiche mit den höchsten zu erwartenden Spannungen. Die Dehnmessstreifen wurden in der Nähe der Schweißnähte appliziert.



**Abb. 5:** Applikationsorte der DMS

Zusätzlich wurden an den Stellen I und J Beschleunigungsaufnehmer verbaut. Diese sollen ebenfalls Aufschluss über eventuelle, bisher unbekannte Lastspitzen geben. Der direkte Vergleich der am realen Bauteil gemessenen statischen Spannungen mit denen, die aus dem FEM Schalenmodell gewonnen wurden, liefert die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse.



**Abb. 6:** Vergleich Rechnung / DMS-Messungen

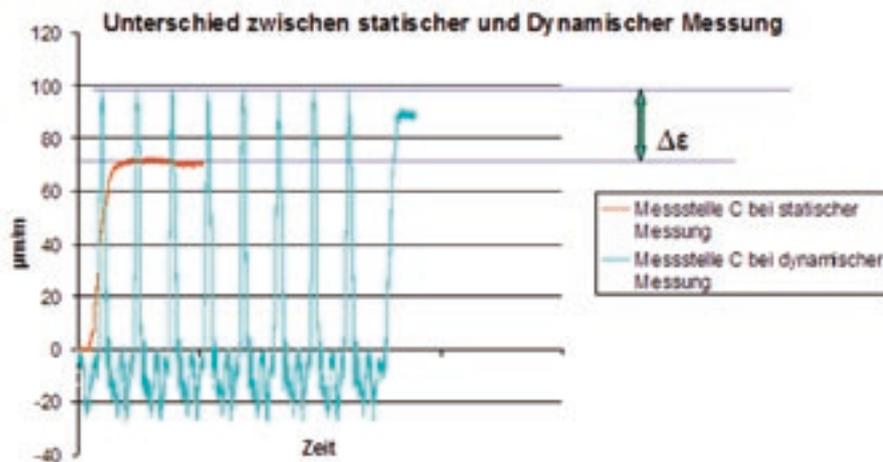
Man erkennt hier deutlich, dass die Ergebnisse des Versuchs mit denen der Berechnung sehr gut übereinstimmen. Die mittlere Abweichung liegt bei 10 %. Da die FEM-Analyse eine Berechnung des dynamischen Lastfalles nicht ohne Weiteres zulässt, muss ein anderer Weg gewählt werden, um zu überprüfen, ob zusätzliche Lastanteile durch dynamische Effekte entstehen. Hierzu wird einmal ein statischer Versuch bei Stillstand und einmal ein dynamischer Versuch bei Rotation mit Nennleistung des Füllers betrieben. Werden diese für eine beliebige Messstelle in einem Graphen (Abbildung 7) gegenüber gestellt, erhält man folgendes Ergebnis:

Der Graph zeigt deutlich, dass bei der dynamischen Messreihe die Dehnungen und damit auch die Verformungen etwa um den Faktor 1,3 höher liegen als bei der statischen Messung. Da dieser Effekt durch das Befahren der Hubzylinderkurve nicht im FEM-Modell erfasst werden kann, wird an dieser Stelle ein Korrekturfaktor  $F_{H_{zyl}} = 1,3$  eingeführt, mit dem alle aus dem FEM Modell ermittelten Spannungen im Bereich der Hubzylinderkurve multipliziert werden, um so diesen Effekt beim späteren Dauerfestigkeitsnachweis zu berücksichtigen.

Der Versuch hat somit gezeigt, dass die Vorgehensweise mit dem FEM-Schalenmodell eine gute Methode ist, um Strukturspannungen im Bauteil zuverlässig festzustellen.

**5 SUBMODELLTECHNIK**

Grundsätzlich gilt beim Schalenmodell: Auch bei relativ grober Vernetzung wird die globale Verformung des Grobmodells relativ gut abgebildet, die lokalen Spannungen jedoch nicht. Deshalb wird hier die Submodelltechnik angewandt.



**Abb. 7:**  
Gegenüberstellung  
statischer und dynamischer  
Messergebnisse

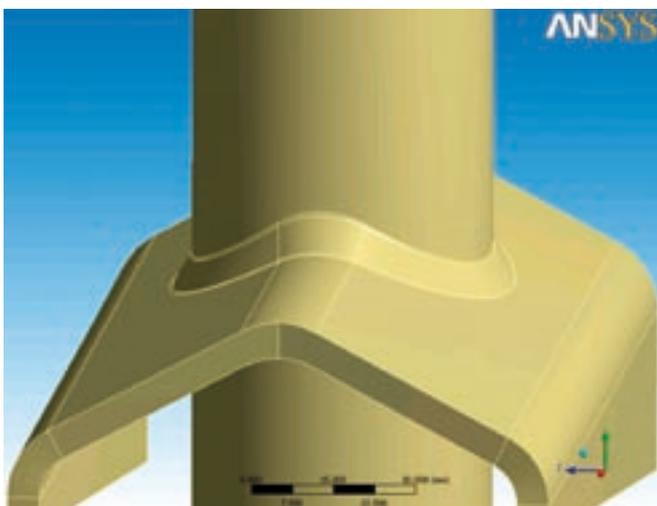
Beim weiteren Vorgehen ist es notwendig, die lokalen Kerbspannungen in den Schweißnahtübergängen zu errechnen. Dies ist an Schalenmodellen jedoch nicht möglich, da hier die Schweißnähte überhaupt nicht abgebildet sind. Bei der Submodelltechnik wird der im Vergleich zum Gesamtmodell sehr kleine Bereich der jeweils zu untersuchenden Schweißnaht herausgeschnitten und je nach Berechnungsmodell als detailliertes Volumenmodell modelliert. Anschließend werden die Knotenverschiebungen an den Schnittkanten des bereits berechneten Grobmodells auf die Schnittkanten des Submodells als äußere Randbedingungen aufgebracht. So kann mit sehr geringem Rechenaufwand ein Geometriedetail in einer sehr großen Baugruppe sehr genau und mit einer sehr feinen Vernetzung berechnet werden. Abbildung 8 zeigt beispielhaft das Submodell einer Schweißnaht nach dem RIMS-Modell.

Diese Submodelltechnik wird im weiteren Verlauf häufig angewandt. Die hierzu nötigen komplexen Operationen werden durch die Software in Form spezieller, relativ einfacher Befehlssätze zur Verfügung gestellt. Für jede zu untersuchende Schweißnaht muss also zunächst das Schalengrobmodell jeweils mit und ohne Einfluss der Hubzylinderkurve berechnet werden um die Nennschwingbreite zu ermitteln. Diese Ergebnisse dienen dann als Grundlage für die Berechnung der lokalen Spannungen mit Hilfe von Submodellen nach dem jeweiligen Berechnungsmodell.

## 6 BERECHNUNGSMODELLE ZUM NACHWEIS DER DAUERFESTIGKEIT

Im Zuge dieser Arbeit werden drei verschiedene Berechnungsmodelle bzgl. ihrer Auswirkung auf die errechnete Lebensdauer des Traversenkreuzes untersucht. Das grundsätzlich favorisierte RIMS-Modell<sup>[3]</sup> nach IIW-Richtlinie (IIW: International Institute of Welding) gilt dabei als Referenzmodell. Dieses Modell wird bevorzugt angewandt und verspricht die bestmöglichen Ergebnisse. Es handelt sich dabei um ein Kerbspannungsmodell. Bei diesem Modell ist es nötig ein Submodell zu generieren, bei dem alle Radien an Schweißnähten durch einen Radius von 1 mm abgebildet werden. Abbildung 9 zeigt diese Vorschrift an einem Beispiel.

Auch das Submodell in Abbildung 8 wurde nach dieser Vorschrift modelliert. Mittels FEM werden dann aus dem Submodell die beiden größten Normalspannungen und die größte Schubspannung im Schweißnahtübergang für die Lastfälle mit und ohne Einfluss der Hubzylinderkurve bestimmt. Mit diesen Spannungswerten und der FKM-Richtlinie (Forschungskuratorium Maschinenbau) kann dann



**Abb. 8:** Submodell einer Schweißnaht nach der RIMS-Methode

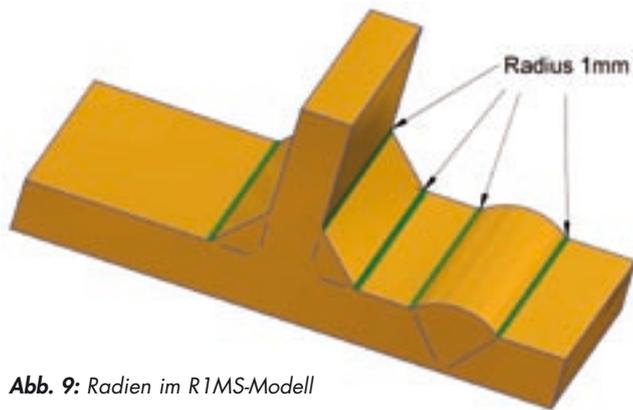


Abb. 9: Radien im RIMS-Modell

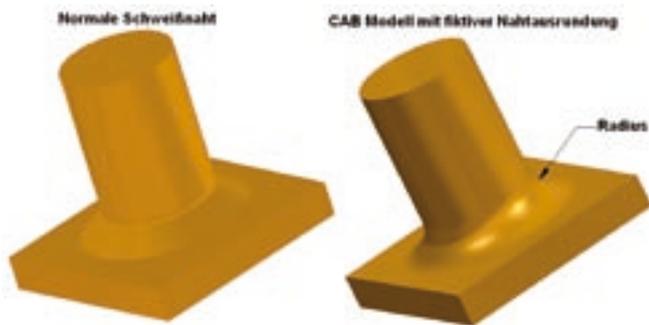


Abb. 10: Berechnungsmodell nach der CAB-Methode

ein Dauerfestigkeitsnachweis durchgeführt werden. Da die FKM-Richtlinie eine sehr umfangreiche Vorschrift darstellt ist der Berechnungsaufwand relativ hoch.

Als zweites Berechnungsmodell kommt die sogenannte CAB-Methode<sup>[5]</sup> zum Einsatz. Diese Strukturspannungsmethode stammt aus dem Chemieapparatebau und dient eigentlich als Vorauslegungsmethode. Daher gelten deren Ergebnisse als eher konservativ. Auch diese Methode erfordert ein Submodell, das nach einer definierten Vorgehensweise modelliert wird. Dabei wird die Schweißnaht im Gegensatz zu RIMS-Methode komplett durch einen fiktiven Radius ersetzt wie Abbildung 10 zeigt.

Großer Vorteil dieser Methode ist die sehr einfache Berechnung, die ohne FKM-Richtlinie auskommt. Einziger Nachteil ist der konservative Charakter der Methode.

Die dritte Methode ist die Hot-Spot-Methode, die wie die RIMS-Methode ebenfalls aus der IIV-Richtlinie<sup>[3]</sup> stammt. Dieses Strukturspannungskonzept ist wie die CAB-Methode auch als Vorauslegungsmethode anzusehen. Sie gilt allgemein als die konservativste Methode mit dem geringsten Berechnungsaufwand. Abbildung 11 soll das Prinzip der Methode erläutern.

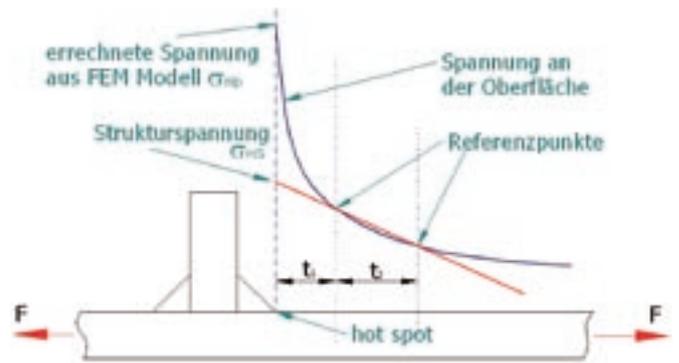


Abb. 11: Hot-Spot-Strukturspannungskonzept

Auf ein Submodell wird bei dieser Methode generell verzichtet. Das bereits vorliegende Schalenmodell des Traversenkreuzes ist für eine Dauerfestigkeitsanalyse ausreichend. Mit Hilfe der Strukturspannungen aus dem FEM-Schalenmodell an den beiden Stützstellen  $t_1$  und  $t_2$  kann eine Hot-Spot-Spannung  $\sigma_{HS}$  im Schweißnahtübergang extrapoliert werden, ohne dass diese Schweißnaht explizit modelliert werden muss. Wiederum muss dies für beide Lastfälle, d.h. mit und ohne Einfluss der Hubzylinderkurve durchgeführt werden. Mit diesen Strukturspannungen kann wiederum mittels einer einfachen Gleichung eine Dauerfestigkeitsbetrachtung durchgeführt werden.

Die sogenannten FAT<sup>[3]</sup>-Klassen berücksichtigen den Formeinfluss des Schweißnahtüberganges. Es werden viele verschiedene FAT-Klassen definiert. Die FAT-Klassen werden für verschiedene Geometrien und Belastungen ermittelt und berücksichtigen u.a. Schweißnahtimperfectionen, Schweißnahtnachbehandlung oder Schweißeigenstressungen. Die angegebenen Werte stammen aus zahlreichen repräsentativen Versuchsreihen. Die Festigkeit des Grundwerkstoffes spielt dabei keine Rolle. Die unterschiedlichen FAT-Klassen werden für die drei oben genannten verschiedenen Berechnungsmodelle benötigt. Diese verschiedenen FAT-Klassen berücksichtigen die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Modellierung der Schweißnähte und der späteren Auswertungen bzgl. der Dauerfestigkeit. Für RIMS gilt die FAT-Klasse 225, für CAB gilt FAT 103 und für Hot-Spot FAT 90.

## 7 VERGLEICH DER EINZELNEN BERECHNUNGSMETHODEN

Wenn man nun die Ergebnisse der jeweiligen Berechnungsmethode für die selbe Schweißnaht bei gleicher Lastsituation gegenüber stellt, wird der Unterschied schnell deutlich. Abbildung 12 zeigt die drei Methoden im direkten Ver-

**Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann**

Tel.: 0941 943-5182

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@maschinenbau.fh-regensburg.de

gleich. Der Graph beinhaltet hier allerdings fünf Berechnungsergebnisse. Dies liegt daran, dass auf Grund der nicht ganz einfachen Geometrie der untersuchten Schweißnaht drei verschiedene Submodelle für das RIMS-Modell erstellt wurden. Diese drei Submodelle entsprechen alle der Modellierungsvorschrift, liefern aber unterschiedliche Ergebnisse. Dies soll zeigen, dass die Ergebnisse selbst bei korrekter Vorgehensweise nach Vorschrift nicht immer eindeutig sind. Die Erfahrungen und das Vorgehen des Durchführenden sind immer ein Unsicherheitsfaktor, dessen Einfluss hier im Graphen deutlich wird.

Als Ergebnis einer Dauerfestigkeitsanalyse erhält man einen „zyklischen Auslastungsgrad“. Ein Auslastungsgrad zwischen 0 und 1 bedeutet, dass die Schweißnaht dauerfest ist. Liegt der Auslastungsgrad über 1, so muss die Schweißnaht als nicht mehr dauerfest angesehen werden.

Um eine möglichst realitätsnahe Aussage über die Dauerfestigkeit des vorliegenden Traversenkreuzes zu erhalten, wird auf Grund mehrerer Faktoren die Vorgehensweise nach RIMS-Methode Variante B gewählt. Die kritischen Schweißnähte wurden bereits am FEM-Grobmodell ermittelt. Nun müssen diese Stellen auf ihre Dauerfestigkeit untersucht werden.

Hier sollen jeweils die zwei am stärksten belasteten Schweißnähte im Druckspannungsbereich sowie im Zugspannungsbereich untersucht werden. Zunächst muss wieder ein Submodell nach RIMS-Konzept Variante B für jede dieser vier Stellen erstellt werden. In der Dauerfestigkeitsbetrachtung nach FKM-Richtlinie wird nun auch ein Gesamtsicherheitsfaktor von 1,3 berücksichtigt. Auch der bereits erläuterte Korrekturfaktor  $F_{Hzy} = 1,3$  kommt nun zum Tragen.

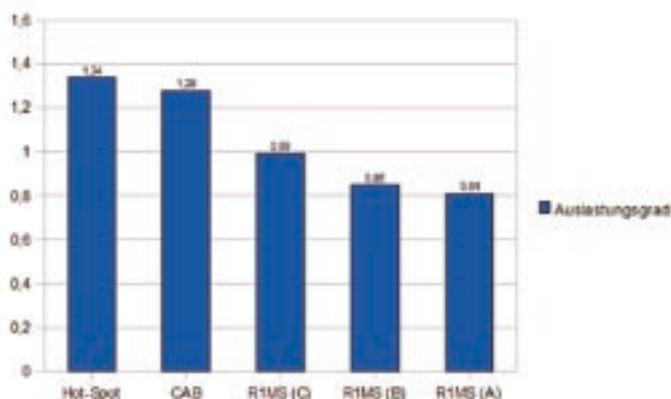


Abb. 12: Gegenüberstellung der Auslastungsgrade

## 8 FAZIT

Im Sinne einer kostenoptimierten Konstruktion ist eine Berechnung nach RIMS- Methode anzustreben, da die beiden anderen Methoden zu überdimensionierten Baugruppen führen würden. Der zusätzliche Aufwand bei der Berechnung der Dauerfestigkeit nach FKM-Richtlinie kann durch Implementierung des Berechnungsablaufes in ein Programm wie z. B. Mathcad kompensiert werden. Dadurch wird der Zeitaufwand soweit reduziert das kaum noch Unterschiede zu den beiden anderen Methoden bestehen.

Da die erzielten Ergebnisse auf statistische Versuche zurückgeführt werden, sind sie nicht als absolut zu betrachten. Die Ergebnisse sind stets vom Anwender abhängig, da immer Unsicherheiten auftreten. Die Ergebnisse geben lediglich grobe Anhaltspunkte zum Betriebsfestigkeitsverhalten der berechneten Bauteile. Der Aufwand lohnt sich jedoch in jedem Fall, da mit solchen Analysen kostspielige Reparaturen bereits in der Konstruktionsphase vermieden werden können.

## LITERATUR

- /1/ Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 4. erweiterte Aufl., VDMA-Verlag, Frankfurt am Main 2002 (ISBN 3-8163-0424-9)
- /2/ Forschungskuratorium Maschinenbau: Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 3. Ausgabe, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main 2006 (ISBN 3-8163-0514-8)
- /3/ Hobbacher, A.: INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING - RECOMMENDATIONS FOR FATIGUE DESIGN OF WELDED JOINTS AND COMPONENTS, IIW Document XIII-1965-03/XV-1127-03, Paris 2006 (ISBN 1-85573-315-3)
- /4/ Morgenstern, C.: Dissertation-Kerbgrundkonzepte für die schwingfeste Auslegung von Aluminiumschweißverbindungen am Beispiel der naturharten Legierung AlMg4,5Mn und der warmausgehärteten Legierung AlMgSi1 T6, Darmstadt 2006,
- /5/ Rudolph, J.: Rechnerischen Bauteilermüdungsfestigkeit unter dem besonderen Aspekt der Schweißnahtnachbehandlung, Dortmund 2003
- /6/ Rapp, S.: Rechnerischer Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen, Diplomarbeit, FH-Regensburg, 2008

## BESTIMMUNG DER EIGENFREQUENZEN UND EIGENFORMEN VON RENNSKIERN MIT HILFE DER EXPERIMENTELLEN MODALANALYSE

### 1. MOTIVATION UND ZIEL

Ein Ski ist heute ein hochkomplexes Gebilde aus Holz, Kunststoff und Metall, bei dem die Parameter Drehfreudigkeit, Spurführung, Laufruhe, Stoßdämpfung, Gewicht und Haltbarkeit optimal aneinander angepasst sein müssen.

Besonders die in der Skiwelt zentralen Größen „Flex“ und „Torsion“ müssen optimal aufeinander abgestimmt sein. Flex steht für die Biegesteifigkeit des Skis senkrecht zur Längsachse. Sein Wert ist maßgebend dafür, wie Stöße durch Unebenheiten auf der Piste absorbiert werden. Die Torsion beschreibt dagegen die Steifigkeit bei Verdrillungen um die Längsachse. Nur ein Ski mit hoher Torsionssteifigkeit greift mit den Kanten gut auf Eis oder beim Carven auf hartem Untergrund [1].

Weiterhin wirken auf einen Ski besonders bei Bodenwellen, Schlägen oder Sprüngen hohe dynamische Kräfte. Durch diese dynamische Belastung werden im Ski Schwingungen angeregt, welche das Fahrverhalten des Skis stark beeinflussen. Im Extremfall fängt der Ski an zu flattern. Der Fahrer wünscht einen Ski, dessen dynamisches Verhalten für sein subjektives Empfinden „gut“ ist [2].

Mit dem Werkzeug der Modalanalyse ist es möglich, das dynamische Verhalten eines Skis zu analysieren und zu visualisieren. Die Modalanalyse der aus der Strukturprüfung gewonnenen Daten liefert eine definierte Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer Struktur, die mit Sollwerten oder Planungsvorgaben verglichen werden kann. Des Weiteren ermöglicht sie die Bildung eines leistungsfähigen Hilfsmittels, dem Modal-Modell, mit dem die Auswirkungen struktureller Modifikationen untersucht werden.

### 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Unter Modalanalyse hat man ganz allgemein die Untersuchung der Charakteristik des dynamischen Verhaltens eines schwingungsfähigen Systems mit Hilfe seiner Eigenschwingungen zu verstehen. Eine Eigenschwingung ist eine globale Systemeigenschaft, die durch die modalen Parameter

#### Eigenfrequenz, Dämpfung und Eigenform

beschrieben werden kann. Die Kenntnis der modalen Parameter ermöglicht nicht nur eine einfache Beschreibung und Berechnung des dynamischen Systemverhaltens, sondern sie bietet einem Konstrukteur auch die Möglichkeit, durch gezielte konstruktive Maßnahmen den unerwünschten Resonanzbetrieb zu verhindern oder zu beeinflussen.

Für eine erfolgreiche Anwendung der Modalanalyse ist es notwendig, kurz den theoretischen Hintergrund näher zu betrachten. Das Ziel dabei ist die Herleitung der Frequenzgangmatrix, die bei der experimentellen Modalanalyse mit Messdaten gefüllt wird und Grundlage für alle nachfolgenden mathematischen Operationen ist.

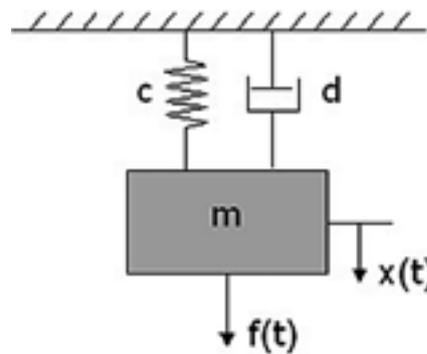


Abb. 1:  
Einmassenschwinger

#### 2.1 Einmassenschwinger

Der Einmassenschwinger wird deshalb so ausführlich behandelt, weil sich bei der Modalanalyse von schwingungsfähigen linearen Systemen mit  $n$  Freiheitsgraden deren dynamisches Verhalten von  $n$  Einzelmassenschwingern beschreiben lässt [3], [4].

Das dynamische Verhalten, das in Abbildung 1 dargestellt ist, wird im Zeitbereich durch die lineare Differentialgleichung (DGL) 2. Ordnung

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = f(t) \quad (2.1)$$

beschrieben. Hierbei ist  $\ddot{x}$  die zweite und  $\dot{x}$  die erste Ableitung der Koordinate  $x$  nach der Zeit  $t$ ,  $m$  die Masse des Einmassenschwingers,  $d$  die Dämpfungskonstante und  $c$  die Federkonstante.

Unter Verwendung der Laplace-Transformation kann die Übertragungsfunktion  $H(s)$  eines Systems definiert werden [5]:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \quad (2.2)$$

Hierbei sind  $X(s)$  die Laplacetransformierte des Ausgangssignals und  $F(s)$  die Laplacetransformierte des Eingangssignals, mit dem Laplaceoperator  $s = \sigma + j\omega$  als komplexe Größe.

Die Übertragungsfunktion lässt sich auch im Frequenzbereich durch

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.3)$$

beschreiben. Mit  $X(\omega)$  als Fouriertransformierte des Ausgangssignals und  $F(\omega)$  als Fouriertransformierte des Eingangssignals. Unter der Voraussetzung, dass alle Anfangsbedingungen gleich Null sind, ergibt die Laplace-Transformation von Gleichung (2.1) die Beziehung

$$[ms^2 + ds + c] x(s) = f(s) \quad (2.4)$$

laut Definition erhält man daraus für die Übertragungsfunktion  $h(s)$ :

$$h(s) = \frac{x(s)}{f(s)} = \frac{1}{ms^2 + ds + c} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \left(\frac{d}{m}\right)s + \left(\frac{c}{m}\right)} \quad (2.5)$$

Der Frequenzgang lässt sich auch direkt aus der Übertragungsfunktion  $h(s)$  ableiten, indem man die komplexe Größe  $s$  durch die imaginäre Größe  $j\omega$  ersetzt:

$$h(\omega) = \frac{x(\omega)}{f(\omega)} = \frac{1}{-m\omega^2 + jd\omega + c} = \frac{\frac{1}{m}}{-\omega^2 + j\left(\frac{d}{m}\right)\omega + \left(\frac{c}{m}\right)} \quad (2.6)$$

Führt man die Eigenfrequenz

$$\omega_o = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (2.7)$$

des ungedämpften Systems ( $d=0$ ) und den Dämpfungsgrad  $D$  mit

$$D = \frac{d}{2m\omega_o} \quad (2.8)$$

als modale Parameter ein, dann lässt sich Gleichung (2.6) auf die Form

$$h(\omega) = \frac{x(\omega)}{f(\omega)} = V(\omega) \cdot e^{-j\psi(\omega)} = \frac{\frac{1}{m}}{-\omega^2 + 2D\omega_o j\omega + \omega_o^2} \quad (2.9)$$

bringen, und zwar durch

$$|h(\omega)| = V(\omega) = \frac{1}{c \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2\right]^2 + \left[2D\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)\right]^2}} \quad (2.10)$$

und

$$\tan \psi = \frac{2D\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2} \quad (2.11)$$

sowie dem Frequenzverhältnis

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_o} \quad (2.12)$$

Wird der Einmassenschwinger mit der harmonischen Erregerkraft

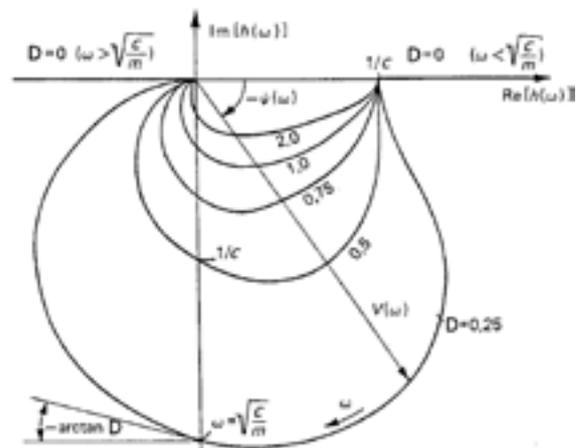
$$f(t) = \hat{f} \cos(\omega t) \quad (2.13)$$

erregt, so erhält man als Systemantwort

$$x(t) = V \cdot \hat{f} \cos(\omega t - \psi) \quad (2.14)$$

Dies ist eine um den Phasenwinkel  $\psi$  der Erregung nacheilende Sinusschwingung mit der um den Faktor  $V$  (Vergrößerungsfunktion) veränderten Amplitude  $\hat{f}$ .

Der Frequenzgang des untersuchten Einmassenschwingers ist in Abbildung 2 für verschiedene Dämpfungswerte in der komplexen Zahlenebene dargestellt.



**Abb. 2:** Ortskurve des Einmassenschwingers in Abhängigkeit von  $D$ [3]  
 $Re[h(\omega)]$ : Realteil des Frequenzgangs  $h(\omega)$   
 $Im[h(\omega)]$ : Imaginärteil des Frequenzgangs  $h(\omega)$

### 2.2 Experimentelle Modalanalyse

Die Schwerpunkte der experimentellen Modalanalyse beziehen sich auf das exakte Messen von Frequenzgängen und die nachfolgende Identifikation der modalen Parameter aus diesen Frequenzgängen (Curve fitting).

Von besonderer Bedeutung bei der experimentellen Modalanalyse ist das Erstellen der Frequenzgangmatrix. Sie kann bei einer Struktur von  $n$  Freiheitsgraden – was gleichbedeutend ist mit  $n$  Messpunkten auf einer zu untersuchenden Struktur – wie folgt beschrieben werden:

$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{n1} & \dots & h_{nn} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{\{\hat{x}\}_i \{\hat{x}\}_i^T}{-\omega^2 + 2D_i \omega_{oi} j\omega + \omega_{oi}^2} \quad (2.15)$$

wobei mit  $\{\hat{x}\}_i$  die Eigenvektormatrix für den ungedämpften Fall und mit  $\{\hat{x}\}_i^T$  die transponierte Matrix von  $\{\hat{x}\}_i$  bezeichnet wird. Die Elemente  $h_{kl}$  ( $k; l = 1, 2, \dots, n$ ) der Frequenzgangmatrix sind die an den Messpunkten  $i$  und  $k$  gemessenen Frequenzgänge, wenn am Messpunkt  $k$  mit  $f(t)$  erregt und am Messpunkt  $i$  die dazugehörige Systemantwort  $x(t)$  gemessen wird. Der Frequenzgang lautet demnach:

$$h(\omega)_{kl} = \frac{x(\omega)_k}{f(\omega)_l} = \sum_{i=1}^n \frac{\hat{x}_{ki} \hat{x}_{li}}{-\omega^2 + 2D_i \omega_{oi} j\omega + \omega_{oi}^2} \quad (2.16)$$

Unter der Voraussetzung, dass der Messpunkt nicht an Knotenpunkten der Eigenformen liegt, reicht es aus, nur einen beliebigen Frequenzgang zum Bestimmen der modalen Parameter Eigenkreisfrequenz  $\omega_o$  und Dämpfung  $D$  zu messen. Für die Ermittlung des dritten modalen Parameters – der zugehörigen Eigenform  $\hat{x}$  – ist es ausreichend, die Elemente einer Zeile oder Spalte von  $H(\omega)$  zu messen.

### 3. MESSOBJEKTE

Für alle Messungen wurden zwölf Paar Skier eines Typs verwendet. Zehn Paar wurden der laufenden Produktion entnommen, diese tragen an der Seitenwange eine fortlaufende Nummer. Da bei einem zusammengehörenden Paar auf beiden Skiern dieselbe Nummer aufgedruckt ist, wird zur weiteren Unterscheidung ein Ski eines Paares mit dem Großbuchstaben „A“, der andere mit „B“ gekennzeichnet. Ein Paar Skier wurde in der Saison 2005/2006 bei Weltcuprennen eingesetzt. Dieses Paar ist an den Stellen der Bindungsbefestigung mit jeweils vier Bohrungen versehen und trägt keine laufende Nummer. Er wird mit der Bezeichnung „gefa“ geführt.

Ein weiteres Paar wurde mit einem extra eingebauten Fehler gefertigt. Im Rahmen dieser Arbeit sollte der Fehler bei diesem Ski erkannt und lokalisiert werden, um so Einsatzmöglichkeiten der Eigenfrequenzmessung in der Fertigung aufzuzeigen. Auch diese sind nicht mit einer laufenden Nummer gekennzeichnet und werden unter der Bezeichnung „fehl“ geführt.

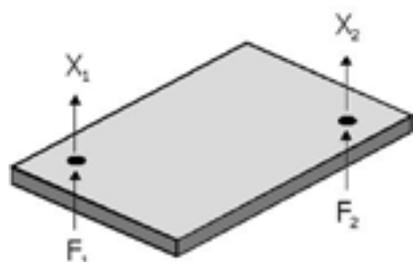
Alle Skier wurden ohne Bindung geliefert und haben eine Nennlänge von 1850 Millimeter.

Auf den zu messenden Skiern werden im Abstand von 50 mm in der Längsrichtung insgesamt 75 Messpunkte aufgetragen. Somit kann im weiteren Verlauf ein Skimodell zur Visualisierung der Schwingungen erstellt werden.

### 4. EIGENFREQUENZBESTIMMUNG

Am Anfang der Modalanalyse eines Bauteiles steht deren Eigenfrequenzbestimmung anhand einer Strukturanalyse. Grundsätzlich gibt es zwei Wege, die zur Strukturanalyse

Abb. 3: Schema der Erregung (links) und Frequenzgangmatrix (rechts) [4]



Erste Reihe	$X_1(\omega) = h_{11}(\omega)F_1(\omega) + h_{12}(\omega)F_2(\omega)$	$h_{11}(\omega) = \frac{X_1(\omega)}{F_1(\omega)}$
	$X_1(\omega) = h_{21}(\omega)F_1(\omega) + h_{22}(\omega)F_2(\omega)$	$h_{21}(\omega) = \frac{X_1(\omega)}{F_2(\omega)}$
Zweite Reihe	$X_2(\omega) = h_{21}(\omega)F_1(\omega) + h_{22}(\omega)F_2(\omega)$	$h_{21}(\omega) = \frac{X_2(\omega)}{F_1(\omega)}$
	$X_2(\omega) = h_{11}(\omega)F_1(\omega) + h_{12}(\omega)F_2(\omega)$	$h_{22}(\omega) = \frac{X_2(\omega)}{F_2(\omega)}$
Frequenzgangmatrix:	$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(\omega) & h_{12}(\omega) \\ h_{21}(\omega) & h_{22}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(\omega) \\ F_2(\omega) \end{bmatrix}$	



**Abb. 4:** Messpunkte auf dem Ski inklusive Lagerpunkte

führen: Die Signalanalyse und die Systemanalyse [6], [7]. Unter Signalanalyse (Betriebs-Schwingform-Messung) versteht man die Vorgehensweise zur Ermittlung des Verhaltens eines Systems infolge einer nicht näher bekannten Anregung. Typischerweise wird die Erregung im gesamten Betriebsbereich des Systems durchgeführt. Es werden nur die Systemantworten bei den Betriebsfrequenzen ermittelt. Bei der Systemanalyse (Modalprüfung) wird das System idealerweise über alle Frequenzen angeregt. Dies geschieht überwiegend mit den Signalformen Impuls, Sinus oder Rauschen. Bei linearen Systemen ist das Verhältnis Antwort zu Erregung eine unabhängige und konstante Größe. Bei den nachfolgenden Messungen wird diese Analyse angewandt.

#### 4.1 Messsystem und Messaufbau

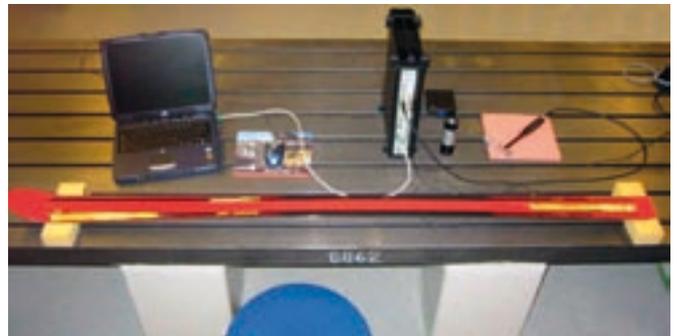
Um eine Strukturanalyse durchführen zu können, werden meistens mehrkanalige Messsysteme eingesetzt. Ein Messsystem besteht aus einer Messkette mit den Bestandteilen [8]:

- Messaufnehmer mit den Teilkomponenten:
  - a) Erreger: Impuls (Erregung mit Impulshammer)
  - b) Antwort: Beschleunigungsaufnehmer
- Messwerk (Mess-Frontend)
- Anzeige (Analysesoftware)

Zusammen mit dem Messwerk *Portable PULSE 3560 C/D – Multikanal-Multianalysatorsystem* wird zur Anzeige die Software *LabShop V10.1*, jeweils von der Firma Brüel & Kjær, verwendet [9], [10]. Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Messaufbau.

#### 4.2 Fensterfunktionen

Ist dem dynamischen Signalanalysator die Signalgruppe mit Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmer zugeordnet, können Einstellungen zu den Fensterfunktionen vorgenommen werden [11].



**Abb. 5:** Messaufbau

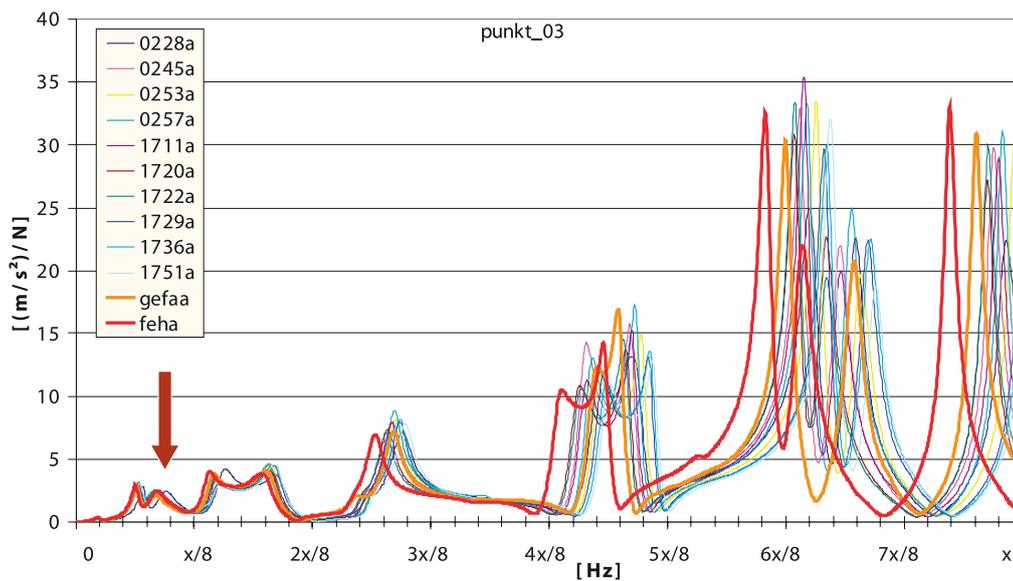
Bei der Impulserregung ist ein Rechteck-Zeitfenster zu wählen. Es lässt die Daten während der Berührungsdauer unberührt passieren und unterdrückt sie für den Rest der Aufnahme. Das Zeitfenster kann sanfte Übergänge an den Flanken besitzen, um die Glättung zu verbessern.

Die Strukturantwort auf einen Schlag ist ein freies Abklingen aller Schwingungsmoden. Hier bietet sich ein exponentielles Zeitfenster als Lösung an. Die hierfür benötigte Zeitkonstante wird für die Struktur optimal eingestellt. Hierbei wird ein vollständiges Abklingen des Antwortsignals innerhalb der Aufnahmelänge erzwungen. Im hinteren Bereich der Aufnahmelänge unterdrückt das Zeitfenster das Rauschen. Die Anwendung der Fensterfunktion ist aufgrund der idealisierten Fast Fourier Transformation (FFT) notwendig, da sonst Phantomfrequenzen auftreten können.

#### 4.3 Messreihen

Um die Einflüsse der Auflager, dem jeweiligen Erregungspunkt, die Seite der Erregung mit dem Impulshammer und des Gewichts des Skis zu untersuchen, wird eine Folge von Messreihen durchgeführt.

Im Rahmen einer ersten Messung werden alle Skier am Punkt 3 mit dem Impulshammer erregt und die dazugehörige Übertragungsfunktion ermittelt. Die Lage der Eigenfrequenzen sind in Abbildung 6 für alle Skier mit der Bezeichnung „A“ zu sehen.



**Abb. 6:** Eigenfrequenzen der Skier mit der Bezeichnung „A“ (Hinweis: Aufgrund der Geheimhaltung wird die Frequenzachse nicht absolut gekennzeichnet.)

Bei der ersten Analyse der Ergebnisse sieht man, dass die Lage der Eigenfrequenzen nicht alle gleich sind, sondern eine Streuung im Bereich von 4% auftritt. Wie sich später herausstellen wird, rührt die 3. Eigenfrequenz (roter Pfeil in Abbildung 6) von den Auflagern her, mit denen der Ski gegenüber der Umwelt schwingungstechnisch isoliert ist.

Jede Lagerung – ausgenommen die ideale Lagerung freischwebend im Raum – verstimmt das Ergebnis einer Frequenzgangmessung. Da dies offensichtlich nicht realisiert werden kann, ist eine Lagerung zu wählen, welche die Schwingungen nur geringfügig beeinflusst. Unter mehreren zur Verfügung stehenden Schaumstoffen wird der Schaumstoff mit der geringsten Steifigkeit als Lagerung für die Skier ausgewählt.

Nr.	Schaumstoff	Steifigkeit [N/nm]
1	bunt	2,88
2	gelb	0,49
3.1	weiss-schmal	1,38
3.2	weiss-breit	1,70
4	grau	2,94

**Tabelle 1:** Steifigkeit der Auflager-Schaumstoffe

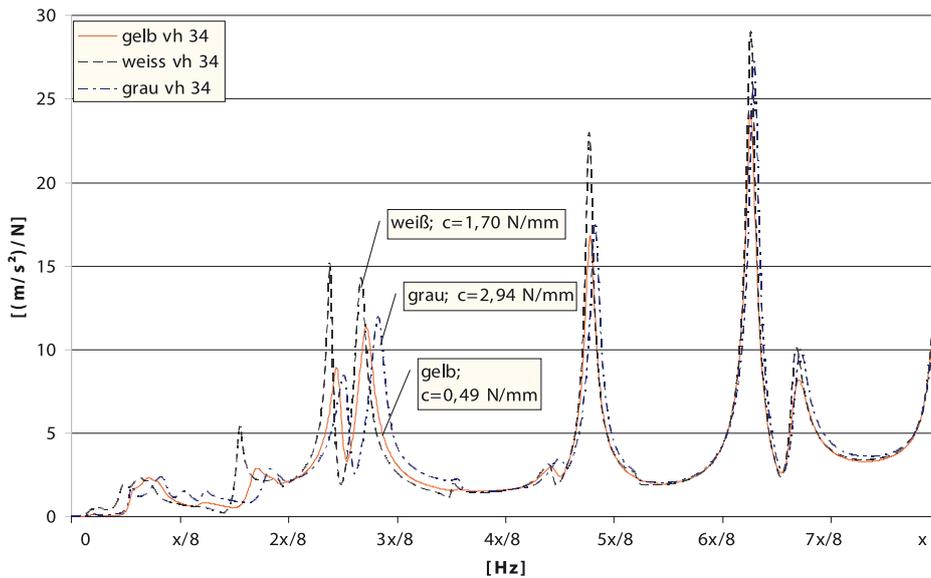
Um auf den Einfluss der unterschiedlichen Auflager näher eingehen zu können, wird eine Messreihe durchgeführt, bei der ein Ski immer an den selben Messpunkten erregt, jedoch mit verschiedenen Auflagern gelagert wird.

Abbildung 7 zeigt verschiedene Eigenfrequenzspektren bei unterschiedlicher Lagerung und Erregung im Punkt 34. Es ist ein Einfluss der Auflager auf die Lage der Resonanzstellen im tief frequenten Bereich bis etwa  $3x/8$  Hz erkennbar. Die Eigenfrequenzen in diesem Bereich sind mit der Lagerreaktion gekoppelt. Die Verschiebung der Eigenfrequenzen ist gleichbedeutend mit einer Steifigkeitsänderung des Gesamtsystems. Die Abweichung bei der dritten Eigenfrequenz bei etwa  $x/8$  Hz lässt sich auch so begründen, da diese Eigenfrequenz nur durch die Lagerreaktion verursacht wird und je nach Auflager unterschiedlich ist. Im Frequenzbereich ab  $3x/8$  Hz sind die Eigenfrequenzen wieder entkoppelt, und es tritt keine Beeinträchtigung auf.

Weiterhin wird der Einfluss der Position der Lagerung auf die Resonanzhöhe und Lage der Eigenfrequenzen untersucht. Hierzu wird auf dem Prüfling ein zusätzlicher Punkt 76 angezeichnet, welcher die Lage des experimentell ermittelten Skischwerpunktes kennzeichnet. Zunächst wird der Ski an den Kontaktpunkten gelagert und an Punkt 39 sowie Punkt 76 erregt. In Abbildung 8 sind diese Ergebnisse mit den Linien „gelb vh 39“ und „gelb vh 76“ dargestellt.

Im Anschluss erfolgt die Lagerung des Prüflings in der Nähe des Schwerpunktes (Punkt 76) und die Erregung erfolgt wiederum an den Punkten 39 und 76 (Linien „gelb m 39“ und „gelb m 76“).

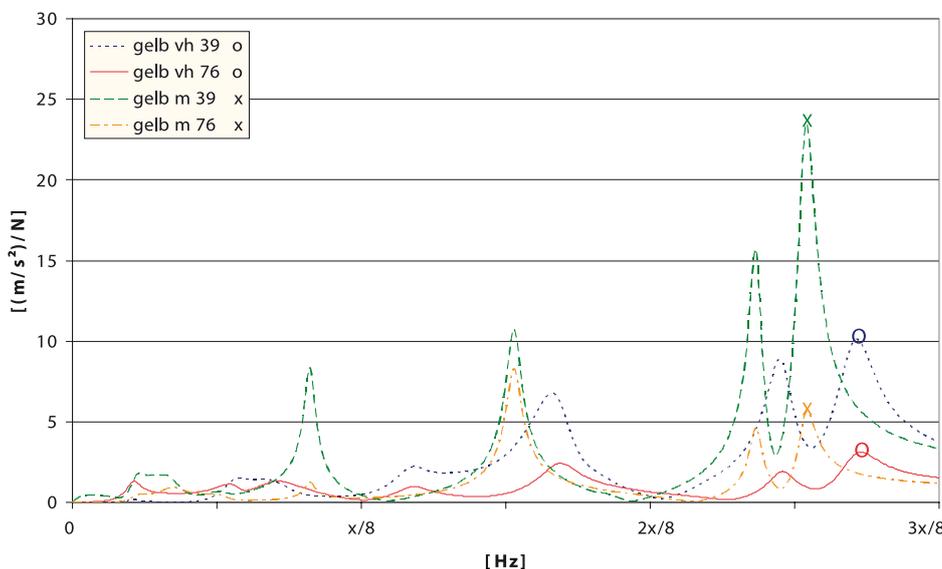
Man sieht, dass die Resonanzstellen bei identischer Lagerposition aber unterschiedlichem Erregungspunkt bei denselben Frequenzen liegen. Nur die Höhe der Amplitude ist different.



**Abb. 7:** Lagerung mit unterschiedlichen Auflagern

Ein Ski besitzt immer dieselben Eigenfrequenzen, unabhängig davon an welcher Stelle die Erregung stattfindet. Vereinzelt kann es jedoch vorkommen, dass nicht alle Eigenfrequenzen bei einem Schlag auf einen Punkt zu Schwingungen angeregt werden. Der Vergleich der Messwerte bei unterschiedlicher Lagerposition und identischem Erregungspunkt zeigt folgendes Ergebnis: Wiederum ist die Einflussnahme der Lagerung zu erkennen. Bei mittiger Lagerung sind die Resonanzstellen in einem niedrigeren Frequenzbereich angesiedelt als bei der

Lagerung an den Kontaktpunkten. Auch hier lässt sich diese Erscheinung mit einer Steifigkeitsänderung des gesamten Systems erklären. Bei mittiger Lagerung wirkt nur ein Lagerelement auf den Ski. Das System ist „weicher“ gelagert. Sehr gut zu erkennen ist in Abbildung 8 auch der Einfluss, den die Resonanzkurven untereinander ausüben – die modale Kopplung. Die Lagerung an den Kontaktpunkten erzeugt eine hohe Dämpfung (starke Kopplung). Wird der Ski nur mittig gelagert, ergibt sich eine schwache Dämpfung, was auf eine leichte Kopplung hinweist.



**Abb. 8:** Lagerung an unterschiedlichen Positionen

**5. EXPERIMENTELLE MODALANALYSE**

Modalanalyse ist der Vorgang zur Ermittlung der Modalparameter einer Struktur für alle Moden im zu untersuchenden Frequenzbereich. Das letztendliche Ziel ist die Erstellung eines Modal-Modells des Strukturverhaltens anhand dieser Parameter.

Die Begriffe Mode bzw. Modenform sind der englischen Formulierung „normal modes of vibration“ entlehnt. Sie bezeichnen also die speziellen Schwingungsformen der untersuchten Struktur, welche voneinander entkoppelt und hiermit voneinander unabhängig sind. Für jeweils einen Mode schwingt jedes Strukturelement in gleicher Frequenz. Bei Anregung einer Struktur durch eine ideale Erregerfunktion gehen alle modalen Antworten anteilig in die gesamte Strukturbewegung ein. Durch eine Summation über diese modalen Antworten lassen sich also die entsprechenden Antworten einer Struktur auf eine Erregerfrequenz gewinnen.

**5.1 Curve fitting**

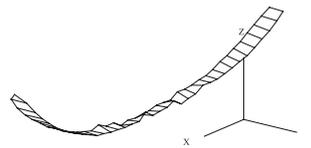
„STAR System V5.22“ ist das Analysesystem, mit dessen Hilfe die Modalanalyse durchgeführt wird. Es benutzt die Frequency Response Function (FRF) – Methode, um die modalen Parameter einer Struktur zu identifizieren [12], [13].

Ein Mode ist dort, wo sich im Frequenzgang eine Resonanzspitze (Eigenfrequenz) befindet. Diese muss aber nicht in allen Datensätzen an dieser Stelle auftreten. Es muss die Lage jedes Modes mit einem Frequenzband definiert werden. In den nächsten Schritten werden nur Daten verarbeitet, die sich innerhalb dieses Band befinden.

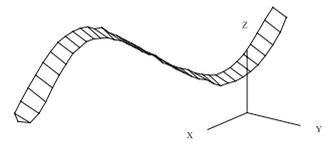
Sind alle Modes in einem Frequenzspektrum definiert, können alle Bänder auf alle einzelnen Spektren übertragen werden. Es werden bei allen Eigenkreisfrequenzen die Dämpfungen mit bestimmt und somit sind alle modalen Parameter der Struktur bekannt. Dieser gesamte Prozess wird als „curve fitting“ bezeichnet.

**5.2 Darstellung der Eigenformen**

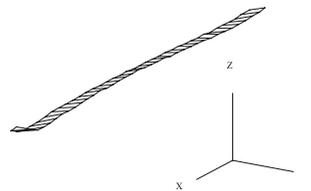
Nach erfolgtem „curve fitting“ können die Eigenformen perspektivisch am Bildschirm dargestellt werden. Es ergeben sich bei allen Skiern im beobachteten Frequenzbereich insgesamt 12 Eigenfrequenzen und damit 12 Eigenformen. Abbildung 9 bis Abbildung 20 zeigen für die ermittelten Eigenfrequenzen die Eigenformen für den neuen Ski mit der Nummer „0228“.



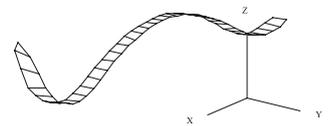
**Abb. 9:** 1. Eigenform



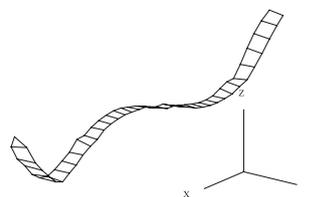
**Abb. 10:** 2. Eigenform



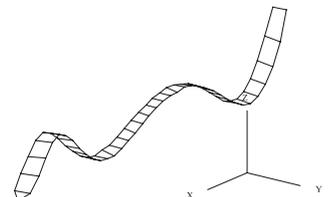
**Abb. 11:** 3. Eigenform



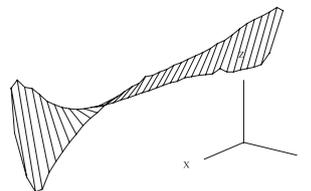
**Abb. 12:** 4. Eigenform



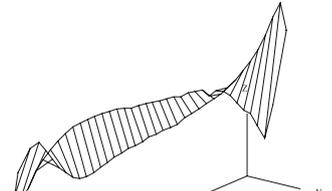
**Abb. 13:** 5. Eigenform



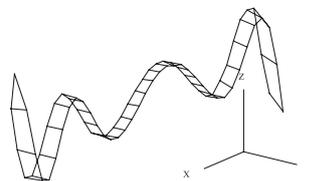
**Abb. 14:** 6. Eigenform



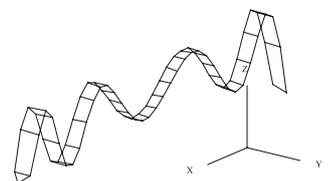
**Abb. 15:** 7. Eigenform



**Abb. 16:** 8. Eigenform



**Abb. 17:** 9. Eigenform



**Abb. 18:** 10. Eigenform

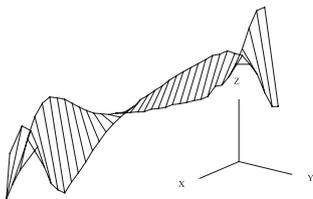


Abb. 19: 11. Eigenform

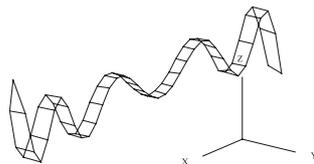


Abb. 20: 12. Eigenform

Die Analyse der Eigenformen führt zu folgenden Erkenntnissen:

- 1. Mode: Hier zeigt sich eine flache halbe Sinuswelle. In der Mitte ist die Welle etwas abgeflacht, da hier die höhere Steifigkeit des Holzkeils wirkt.
- 2. Mode: Die Steifigkeit des Holzkeils wirkt hier kaum, da der Knotenpunkt der Sinuswelle in etwa bei der Skimitte liegt. Bei den Schwingungsbäuchen ist hier eine Versteifung wichtig.
- 3. Mode: Diese Eigenform rührt von den Auflagern her, mit denen der Ski gegenüber der Umwelt schwingungstechnisch isoliert ist.
- 4. 5. 6. Mode: Hier ist vor allem die Holzstruktur im mittleren Bereich aktiv. Die Amplituden im vorderen und hinteren Skibereich sind deutlich höher als im mittleren Bereich.
- 7. Mode: Hier liegt die erste reine Torsion. Es tritt ein Knotenpunkt im vorderen Skibereich auf. Das Skivorderteil weist eine deutlich geringere Torsionssteifigkeit auf als das Hinterteil.
- 8. Mode: Hier liegt die zweite reine Torsion. Es treten zwei Knotenpunkte im hinteren und vorderen Skibereich auf. Hier weist der Skivorderteil eine höhere Torsionssteifigkeit als der Hinterteil auf.
- 9. 10. 12. Mode: Der Kern wird langsam „weich“. Es treten Spannungen im Holz auf. Daran erkennt man, dass die Amplituden über den gesamten Skibereich in etwa den gleichen Betrag besitzen. Bislang fand der Energieabbau fast ausschließlich im Epoxydharzbereich statt, jetzt erfolgt sie auch im Holz.
- 11. Mode: Hier liegt die dritte reine Torsion. Es treten zwei Knotenpunkte im vorderen und eine im hinteren Skibereich auf. Die Torsionssteifigkeit ist über den gesamten Skibereich in etwa gleich.

Die oben genannten Eigenformen treten in dieser Art bei allen getesteten Skiern auf. Sie liegen lediglich bei unterschiedlichen Frequenzen.

Da beim fehlerbehafteten Ski alle Eigenfrequenzen in einem niedrigeren Frequenzbereich liegen als bei allen anderen Vergleichsskiern (Ausnahme: Lagerfrequenz) und der Abstand mit steigender Ordnungszahl konstant zunimmt, ist davon auszugehen, dass bei diesem Ski eine komplette, für die Steifigkeit wichtige Lage weggelassen wurde. Dieser Ski ist eindeutig „weicher“ als alle anderen Skier.

Die niedrigeren Eigenfrequenzen bei einem gefahrenen Ski kann zum einen die Ursache haben, dass aufgrund der Belastungen beim Fahren die Steifigkeit des Skis nachgelassen hat. Zum anderen wirken sich die Bohrungen für die Bindungsbefestigung an der Skioberseite ebenfalls nachteilig auf die Steifigkeit des Skis aus. Dieser Ski ist ebenfalls etwas „weicher“ als alle anderen Skier.

## 6. SCHLUSSBETRACHTUNG, AUSBLICK

Es sind nach der Analyse der FRF-Datensätze deutliche Unterschiede der einzelnen Skier bezüglich der Lage der Eigenfrequenzen zu erkennen. Fehler beim Skiaufbau können sehr gut erkannt werden und ein gebrauchtes Paar Skier ist aufgrund eines charakteristischen Frequenzganges zu erkennen.

Die Lage der Eigenfrequenzen bei neuen Skiern aus der laufenden Produktion streuen in der Messreihe um bis zu 4%. Eine deutliche Abgrenzung zu fehlerbehafteten oder gebrauchten Skiern ist aber durchaus gegeben.

Nun gilt es, diese Erkenntnisse der Eigenfrequenzanalyse und Modalanalyse in der Skikonstruktion und der -produktion umzusetzen. Hierbei kann das Werkzeug der SDM (Structural Dynamic Modification) hilfreich sein. Es baut auf der Modalanalyse auf und erlaubt eine kostengünstige und zeitsparende Optimierung von Bauteilen durch die Simulation von konstruktiven Änderungen und deren Auswirkungen auf das dynamische Schwingungsverhalten. Man ist somit in der Lage, alle notwendigen Änderungen zu ermitteln, um bestimmte Resonanzzustände in ihrer Frequenz und Amplitude zu erzeugen, verschieben oder gar zu eliminieren.

Es stellt sich die Frage: Wie und wo kann oder muss man den Ski steifer machen, damit sich die Lage der Eigenmoden verschiebt und sich das Fahrverhalten ändert? Die SDM kann eine Antwort auf diese Frage geben.

Darüber hinaus muss analysiert werden, wie sich die jeweiligen Biegeschwingungsmoden und die Torsionsschwingungsmoden auf das Fahrverhalten auswirken. Nur ein Ski

**Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann**

Tel.: 0941 943-5182

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@maschinenbau.fh-regensburg.de

mit hoher Torsionssteifigkeit greift mit den Kanten gut auf Eis oder beim Carven auf hartem Untergrund. Aber welche Torsionsmoden muss man wie modifizieren, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen?

Es werden in allen Messungen Skier ohne Bindung verwendet. Das Schwingungsverhalten ändert sich aber bezüglich der Lage der Eigenmoden sowie deren Schwingungsbild. Folglich muss weiterhin untersucht werden, wie ein Ski mit Bindung, beziehungsweise mit zusätzlicher Belastung auf den Bindungsbereich, schwingt.

Eine wirkliche Produktverbesserung lässt sich nur erzielen, wenn aufgrund der Ergebnisse der Veränderungen Testskier mit unterschiedlichen Modifikationen aufgebaut werden und ein Testfahrer die objektiven Verbesserungen des Skis mit seinen subjektiven Empfinden beschreibt.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Werkzeuge der Eigenfrequenzbestimmung und der Modalanalyse ein geeignetes Mittel zur Produktverbesserung und Qualitätssicherung darstellen.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] [http://www.konstruktionspraxis.de/fachartikel/druck/kp\\_fachartikel\\_druck\\_2219448.html](http://www.konstruktionspraxis.de/fachartikel/druck/kp_fachartikel_druck_2219448.html) (Sichtungsdatum: 17.03.2006)
- [2] <http://www.3sat.de/nano/astuecke/88613/index.html> (Sichtungsdatum: 16.03.2006)
- [3] MÜLLER, R.D.: Messung, Berechnung und Analyse von Schwingungen. VDI-Zeitung Nr. 8, April 1980, Seite 325-330
- [4] DEISTLER, B.: Messung und Berechnung von Strukturveränderungen auf das Schwingungsverhalten ebener und verrippter Platten. Diplomarbeit FH Regensburg, FB Maschinenbau, 1991
- [5] PAPULA, L.: Mathematische Formelsammlung. Braunschweig; Wiesbaden, Vieweg, 2001
- [6] Døssing, O.: Strukturen prüfen Teil 1: Mechanische Beweglichkeits-Messungen (Brüel & Kjær). Nærum, Dezember 1989
- [7] Døssing, O.: Strukturen prüfen Teil 2: Modalanalyse und Simulation (Brüel & Kjær). Nærum, Dezember 1989
- [8] <http://www.muellerbbm-vas.de/getfile.php?id=16&type=fachberichte&mode=view> (Sichtungsdatum: 16.08.2006)
- [9] BRÜEL & KJÆR: Technische Dokumentation: PULSE Multi-Analyzer System Typ 3560. Nærum, 2002
- [10] BRÜEL & KJÆR: PULSE – Getting started, An Introduction of PULSE. Nærum, 2003
- [11] HEWLETT PACKARD S. A.: Grundlagen der dynamischen Signalanalyse. Genf, 1989
- [12] SPECTRAL DYNAMICS; Inc.: The Star System™, Reference Manual. San Jose, 1996
- [13] SPECTRAL DYNAMICS; Inc.: The Star System™, User Manual. San Jose, 1996
- [14] NATKE, H.G.: Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Braunschweig; Wiesbaden, Vieweg, 1988
- [15] SCHLIEKMANN, C.: Formelsammlung zur Maschinendynamik mit Anhang. FH Regensburg, FB Maschinenbau 1992
- [16] Skikonstruktion bei VÖLKL. VÖLKL Sports GmbH & Co. KG, Juli 2006

Spitze.



Doppelspitze.



Weltspitze.

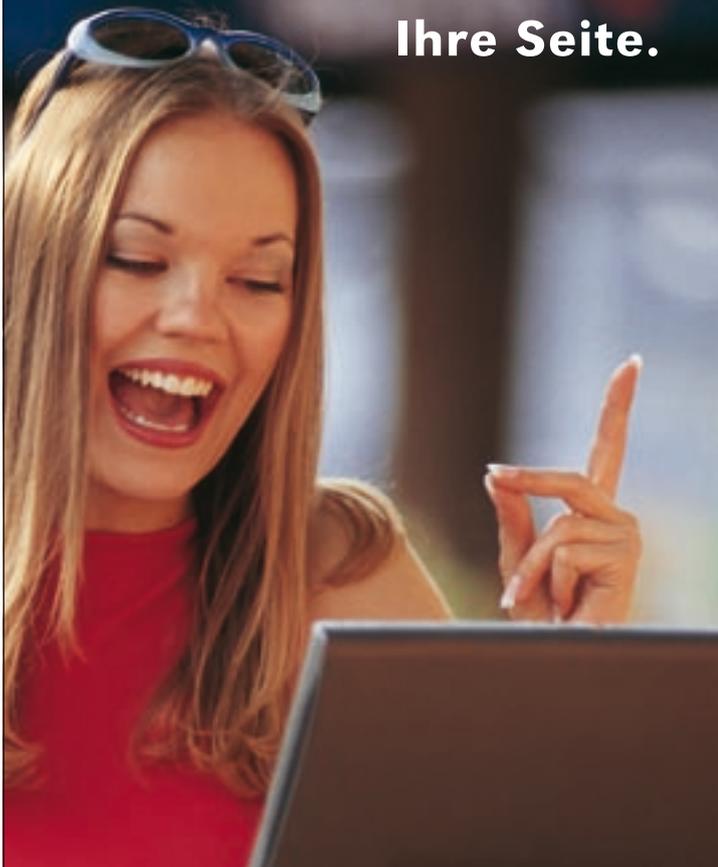


Spitzenjobs gibt's unter  
[www.reinhausen.com/jobs](http://www.reinhausen.com/jobs)



Stufenschalter made by  
Maschinenfabrik Reinhausen

Ihre Stadt. Ihr Leben.  
Ihre Seite.



[www.alles-deutschland.de](http://www.alles-deutschland.de)

Konzerte, Ausstellungen, Sportveranstaltungen **Alle** Restaurants, Biergärten, Bringdienste, Sportstudios **Infos** Kartbahnen **über** Schwimmbäder, Saunen, Vereine, Hotels **Ihre** Campingplätze **Stadt** Ferienwohnungen, Museen, Theater, Stadtpläne, Sehenswürdigkeiten, Wetter, Routenplaner, Radarfallen, Fabrikverkäufe, Immobilien, Branchenverzeichnis, Jobs ...

Eines der führenden Städteportale Deutschlands.

# Ihr Stück

# Lebensqualität.

Wir legen uns für Regensburg und die Region ins Zeug.  
Als Arbeit- und Auftraggeber, mit sozialem Engagement,  
kulturellen Aktivitäten und der  
Unterstützung von Vereinen.  
Hier lässt sich's besser leben.  
Ihre REWAG.



Immer für Sie nah!  
**REWAG**  
www.rewag.de

# Leadership Experience Expertise

- Technologieführer in der nasschemischen Reinigung von Wafern
- Partner aller führenden weltweiten Mikrochipproduzenten
- Globales Top-20 Ranking der Halbleiterequipment-Hersteller
- Führende Position durch internationales Team und innovative Produkte
- Mehr als 20-jährige Industrieerfahrung

Interessiert? Weitere Informationen auf unserer Homepage [www.sez.com](http://www.sez.com)



A DIVISION OF LAM RESEARCH CORPORATION



Bringen Sie  
der Technik  
das LEBEN bei!

**Für Visionäre**

Elektrotechnik

Nachrichtentechnik

Mikrosystemtechnik

Feinwerktechnik

Physik

Chemie

Maschinenbau

Mechatronik

Werkstoffwissenschaften

Wirtschaftsingenieurwesen

WIR MACHEN DAS LEBEN LEICHTER und stellen die Grenzen des Heute in Frage. Dabei entstehen Halbleiter- und Systemlösungen, die drei zentrale Herausforderungen der modernen Gesellschaft adressieren: Energieeffizienz, Kommunikation sowie Sicherheit. Dahinter stehen rund 30.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die auf der ganzen Welt zusammenarbeiten: im Infineon-Team.

DIE FRAGE LAUTET: Welche Position passt am besten zu Ihrer Qualifikation, Ihren Interessen und Ihren Ideen für die Zukunft? Wofür Sie sich auch entscheiden – Infineon bietet Ihnen einen individuellen Weg, der Technik das Leben beizubringen.

CLEVER UND NEUGIERIG auf die High-Tech-Spitze? Unsere aktuellen Praktika, Diplomarbeiten, Werkstudententätigkeiten, Traineeprogramme und Stellenangebote bei Infineon Technologies in Regensburg finden Sie unter:

[www.infineon.com/careers](http://www.infineon.com/careers)



Never stop thinking