

# Was bewegt uns morgen? Mit Wasserstoff bleiben wir mobil.



Mehr zum Thema?  
Wir halten Sie gerne  
auf dem Laufenden:

**BMW AG**

Abt. Information  
Postfach 50 02 44  
80972 München  
[www.bmwgroup.com](http://www.bmwgroup.com)

Eine Welt ohne Automobil ist für uns unvorstellbar. Mit emissionsarmen Fahrzeugen die Auflagen des Gesetzgebers zu unterschreiten, reicht langfristig allerdings nicht aus. Um unsere mobile Zukunft zu gestalten, müssen wir deshalb auch andere Energieträger erforschen und neue, passende Antriebskonzepte entwickeln: Der Wasserstoffantrieb arbeitet emissionsfrei. Seine Leistungsfähigkeit haben wir unter Beweis gestellt. Jetzt fehlen nur noch der politische Konsens und die Infrastruktur für die Herstellung und Verteilung des Wasserstoffs. Gemeinsam können wir es schaffen.

**BMW Group**



FORSCHUNGSBERICHT  
DER  
FACHHOCHSCHULE REGENSBURG  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
WIRTSCHAFT  
SOZIALWESEN  
2007

## IMPRESSUM

<b>Herausgeber:</b>	Der Präsident der Fachhochschule Regensburg Prof. Dr. Josef Eckstein
<b>Redaktion:</b>	Elke Steinberger, Dipl.-Sozialpäd. (FH), Referentin für Technologietransfer IAFW, Fachhochschule Regensburg
<b>Titelgestaltung:</b>	Prof. Pavel Zverina, Fachhochschule Regensburg, Manuela Apfelbeck
<b>Bildmaterial:</b>	Autoren der Fachbeiträge
<b>Gesamtherstellung:</b>	WEKA info verlag gmbh 86415 Mering www.weka-info.de
<b>Auflage:</b>	1200
<b>Erscheinungstermin:</b>	Juli 2007

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

### Kontaktadresse:

Fachhochschule 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

Regensburg ist der drittgrößte FH-Standort in Bayern. Die in einer herausragend schönen Landschaft gelegene, lebenswerte, historische (UNESCO-Welterbe!) und gleichzeitig moderne dynamische Stadt motiviert für ein fundiertes Studium. Weltoffenheit, vielfältige Studien- und Freizeitmöglichkeiten sowie ein exzellenter Arbeitsmarkt zeichnen Regensburg aus. Acht Fakultäten bieten an der FH Regensburg über 5700 Studierenden in über 20 Studiengängen eine große Vielfalt an Studienmöglichkeiten, so Präsident Prof. Dr. Josef Eckstein.

### Herr Prof. Dr. Eckstein! Regensburg ist ja der drittgrößte FH-Standort in Bayern. Was zeichnet den Standort Regensburg besonders aus?

*Prof. Dr. Eckstein:* Regensburg bietet die Möglichkeit, in einer alten und zugleich modern gebliebenen Stadt zu studieren. Die Hochschulstadt Regensburg mit ihren drei Hochschulen wird geprägt durch eine hohe Anzahl an Studierenden. Der gemeinsame Campus von Universität und Fachhochschule im Süden ist ein Standortvorteil, den die beiden Hochschulen in vielen Kooperationen zugunsten der Studierenden nutzen. Als Beispiele seien genannt die Zusammenarbeit im Bereich Rechenzentrum und Bibliothek, aber auch gemeinsame Studienangebote wie das Zusatzstudium „Internationale Handlungskompetenz“.

### Acht Fakultäten bieten über 5700 Studierenden in über 20 Studiengängen eine große Vielfalt an Studienmöglichkeiten an. Welche Studiengänge gibt es denn nur an der FH Regensburg?

*Prof. Dr. Eckstein:* Einzigartig an Fachhochschulen in Bayern sind die Studiengänge Mathematik, Mikrosystemtechnik und European Business Studies. Beim letztgenannten Studiengang erhalten die Absolventinnen und Absolventen ein Doppeldiplom der Fachhochschule Regensburg und der ausländischen Partnerhochschule. In der Region Ostbayern exklusiv angeboten werden die Studiengänge Architektur, Produktions- und Automatisierungstechnik, Technische Informatik und Soziale Arbeit.

### Stichwort „duale Studiengänge“? Was verbirgt sich dahinter und wie baut die FH Regensburg diese weiter aus?

*Prof. Dr. Eckstein:* Duale Studiengänge stellen eine Kombination eines Hochschulstudiums mit einer praktischen Ausbildung in einem Betrieb dar. Es handelt sich um ein vollwertiges Studium mit unverändertem Studienplan und Abschlüssen.

Zusätzlich erwerben die Teilnehmer den Abschluss im Lehrberuf nach Ableistung der IHK-Prüfung. Ein duales Studium bietet die optimale Verzahnung von Theorie und Praxis mit ausgezeichneten Berufsaussichten. Das „Regensburger Modell“ der Studienorganisation hat bereits Vorbildcharakter. Ein großer Vorteil für die Studierenden ist die finanzielle Unabhängigkeit durch Erhalt einer Ausbildungsvergütung. Die Fachhochschule Regensburg bietet aktuell als duales Studium folgende Studiengänge an:

- Elektro- und Informationstechnik, Mechatronik oder Mikrosystemtechnik jeweils mit dem Hochschulabschluss Bachelor of Engineering (B.Eng.) und dem Ausbildungsberuf als Elektroniker in der Betriebstechnik (IHK). Kooperationspartner für die betriebliche Ausbildung sind neben der Siemens Professional Education (SPE), BMW AG, Infineon Technologies, Kronos AG, Maschinenfabrik Reinhausen, Mühlbauer AG, Osram Semiconductors, Siemens A&D, Siemens VDO, Zahnradfabrik (ZF) Passau.
- Wirtschaftsinformatik mit dem Hochschulabschluss Bachelor of Science (B.Sc.) und IHK-Abschluss Fachinformatiker(in). Die betriebliche Ausbildung erfolgt bei ZF Passau.
- Kooperativer Studiengang Bauingenieur in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Bauindustrieverband (Studium mit vertiefter Praxis).

#### **Die FH Regensburg beweist Profil durch Forschungsk Kooperationen. Wie sehen diese Kooperationen aus?**

*Prof. Dr. Eckstein:* In Forschung und in Kooperationen mit Unternehmen, Institutionen und anderen Hochschulen zeigen unsere ProfessorInnen immer wieder, dass sie mit Ihrem Wissen auf dem aktuellen Stand sind und stellen damit sicher, dass an der FH Regensburg stets eine moderne wissenschaftliche Ausbildung angeboten wird, die ihr Ohr am Puls der Zeit hat. Um die Forschungsaktivitäten der ProfessorInnen zu unterstützen und zu bündeln wurde im Jahr 2000 das Institut für Angewandte Forschung und Wirtschaftskooperationen (IAFW) gegründet. Es koordiniert alle Forschungs- und Transfervorhaben der FH Regensburg und ist damit der Ansprechpartner für externe Forschungsanfragen. Im Zuge der Profilbildung haben sich mittlerweile zahlreiche fakultätsübergreifende Kompetenzzentren gegründet, u.a. zu den Themen Sensorik, IT-Security, Software-Engineering, Bioengineering oder Logistik. Das Kompetenzzentrum für Software-Engineering (CCSE) beispielsweise arbeitet mit seinen Kooperationspartnern Infineon Technologies, Osram Opto Semiconductors GmbH, Micron Electronic Divices AG, Siemens VDO und dem Landesamt für Finanzen seit mehr als zwei Jahren sehr

erfolgreich zusammen und beschäftigt mittlerweile 15 Mitarbeiter. Im Bereich Sensorik erhielt erst im November 2006 ein Forscher- und Entwicklungsteam der Fachhochschule Regensburg um die Professoren Hook, Kempf und Scharfenberg den Innovationspreis der Fa. Fresenius für Arbeiten an einem intelligenten Schreibstift, der das neuromotorische Verhalten der Hand beim Schreiben erfasst.

#### **Mit welchen Einrichtungen pflegt die FH Regensburg strategische Partnerschaften?**

*Prof. Dr. Eckstein:* Die Fachhochschule Regensburg ist in zahlreiche überregionale und regionale Netzwerke eingebunden, die die interne Schwerpunktbildung widerspiegeln.

Zu nennen wären hier beispielhaft:

- Strategische Partnerschaft Sensorik zusammen mit Stadt Regensburg, Universität Regensburg, Unternehmen der Region
- Bayerischer Cluster Sensorik
- Strategische Partnerschaft IT-Security (zusammen mit Universität Regensburg, Stadt Regensburg, Unternehmen aus der Region)
- Regionales Cluster Mikrosystemtechnik
- Wissenschaftszentrum Straubing und Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe
- Mechatronik-Kompetenznetzwerk
- bayonik – Bionik Netzwerk Bayern
- Wirtschafts- und Wissensraum Ostbayern

#### **Abschließend ein Blick in die Zukunft: Wo sehen Sie die FH Regensburg in den nächsten 10 Jahren? Wie wird sie sich entwickeln?**

*Prof. Dr. Eckstein:* Die Hochschule Regensburg für angewandte Wissenschaften ist die Hochschule der Region mit den vielfältigsten, qualitativ hochwertigen, betreuungsintensiven und praxisorientierten Studienangeboten in Technik, Wirtschaft und Sozialwesen. Diese werden wir ständig weiter verbessern z. B. durch neue Masterstudiengänge konsekutiver Art wie auch im Weiterbildungsbereich. Die Hochschule Regensburg wird ihre Strategie bei der Förderung von erfolgreicher anwendungsorientierter Forschung weiter verfolgen und mit ihren Kompetenzschwerpunkten ein wichtiger Partner für Unternehmen und Einrichtungen der Region sein. Das Zentrum für Weiterbildung und Wissensmanagement wird die führende Einrichtung für wissenschaftliche Weiterbildung in Ostbayern sein. Die Hochschule Regensburg für angewandte Wissenschaften ist einer der wichtigen Inkubatoren in der Wissenschafts- und Technologie-region Ostbayern um das Zentrum Regensburg.



## NEUE TECHNOLOGIEN

### Komplettlösungen in den Bereichen

- Lagerverwaltung (Soft- und Hardware)
- Kommissioniersysteme
- Versandsysteme
- Staplerflurssysteme
- Visualisierung
- Automatisierung und Steuerungstechnik

### 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

**ALLGEMEINWISSENSCHAFTEN UND MIKROSYSTEMTECHNIK**

Buchprojekt „Präsentationskompetenzen“ . . . . . 8  
*Prof. Dr. phil. Gabriele Blod*

**ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK**

Modern Permanent Magnetic Materials Advances and Limits . . . . . 10  
*Dipl.-Ing. (FH) Matthias Mayer, Prof. Dr. Gareth J. Monkman*

Berührungslose schlupffreie Wegmessung ohne globale Sensoren. . . . . 15  
*Dipl.-Ing. (FH) Thomas Heckner, Prof. Dr. Gareth J. Monkman*

Tactile Sensor for Robotic Applications. . . . . 19  
*Somrak Petchartee, B. Eng., M. Eng., Prof. Dr. Gareth J. Monkman*

Generische Safety-Architektur für automotive Software. . . . . 25  
*Dipl.-Ing. (Univ.) Martin Hummel, Prof. Dr. Jürgen Mottok, Dipl.-Ing. (Univ.) Ralf Egen, Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller, Dipl.-Math. (Univ.) Tina Mattes, Dipl.-Ing. (Univ.) Michael Blum, Dr. Franz Duckstein*

**INFORMATIK/MATHEMATIK**

Simulation von Einlagerstrategien . . . . . 30  
*Dipl.-Inf. Martina Heindl (Klug GmbH), Professor Dr. Frank Herrmann (FH Regensburg), Dipl.-Inf. E. Juraske (Klug GmbH)*

**MASCHINENBAU**

Tension-tension behaviour of 8-strand ropes . . . . . 40  
*Prof. Dr.-Ing. Ulrich Briem*

Randschichtkontrolle in Fusionsexperimenten durch den Einschuss tiefkalter Wasserstoffpellets . . . . . 44  
*Dipl.-Ing. (FH) Christian Dörner, Prof. Dr.-Ing. Karl Gerhard Kauke, Dr. Peter Lang, Dipl.-Ing. (FH) Christian Wittmann*

Systemtechnische Optimierung der Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden für den Einsatz in Kraftfahrzeugen: Entwicklung neuer Analysemethoden . . . . . 52  
*Dipl.-Ing. (FH) Stefan Fuchs, Dipl.-Ing. (FH) Johannes Langenfelder, Dipl.-Ing. (FH) Stefan Mindl, Joachim Vogl, Dipl.-Ing. (FH) Markus Wagner, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl*

Auslegen des Kurbeltriebs für einen variablen Einzylinder-Prüfstandmotor . . . . .	66
<i>Martin Jatta, Hubert Zwirgmaier, Prof. Gernot Langeloth, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Rabl, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer</i>	
FE-Simulation und Messung der mechanischen Beanspruchungen an Bauelementen beim Trennvorgang von bestückten Leiterplatten . . . . .	75
<i>Dipl.-Ing. (FH) A. Lemm, Dipl.-Ing. T. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	
Untersuchungen des Schwingungsverhaltens von mittelschnelllaufenden Großdieselmotoren im Hinblick auf die Lage der Eigenfrequenzen und Schwingformen in Messung und Berechnung. . . . .	79
<i>Dipl.-Ing. (FH) Matthias Kiermeier, Dr.-Ing. Annekathrin Kern, Dipl.-Ing Detlef Kurth, Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann</i>	

Anzeige  
Fraunhofer Institut

# Die Preisfrage.

# Schwere Übung!

Wer ärgert sich nicht über hohe Energiekosten? Verständlicherweise auch unsere Kunden. Und das, obwohl die REWAG im direkten Preisvergleich sehr gut dasteht. Wir setzen auf gezielte Einkaufsstrategien und neue Energie-Angebote. So versuchen wir die steigenden Einkaufspreise auf dem Energiemarkt in Ihrem Sinne auszubalancieren. Energiekosten müssen für Sie kalkulierbar bleiben. Wir arbeiten hart dran.



Immer für Sie nah!  
**REWAG**  
www.rewag.de

PROF. DR. PHIL. GABRIELE BLOD  
FACHGEBIET ANGEWANDTE RHETORIK UND KOMMUNIKATION

## BUCHPROJEKT „PRÄSENTATIONSKOMPETENZEN“

**Prof. Dr. phil. Gabriele Blod**  
Tel.: 0941 943-1275  
Fax: 0941 943-1426  
gabriele.blod@mikro.fh-regensburg.de

Im Berufsleben sind nicht nur Fachkenntnisse, sondern zunehmend auch Schlüsselqualifikationen gefragt. Diese Kernkompetenzen bereits im Studium zu erwerben und schon im Praktikum unter Beweis zu stellen, wird im Zeitalter von Bachelor und Master immer wichtiger. In der Reihe „**UNI-WISSEN Kernkompetenzen**“ veröffentlicht der Verlag Klett Lernen und Wissen mehrere Bände, mit denen Studierende fachübergreifende Schlüsselqualifikationen (= Kernkompetenzen) bereits im Hochschulalltag trainieren können.

Mein Band „**Präsentationskompetenzen**“ (Erscheinungstermin September 2007) behandelt ein Teilgebiet von Kommunikation, das seit einigen Jahren im Berufsleben und zunehmend auch in Schule und Studium eine bedeutende Rolle spielt: das zielorientierte und empfängergerechte Präsentieren von Themen vor einem Publikum, wobei der Redner visuelle Medien zur Unterstützung einsetzt.

Der Band verbindet erstmals **theoretische Fundierung und praktische Anwendung**. Zum einen stellt er das Wissen über relevante theoretische Grundlagen zusammen, wobei er die neuesten Ergebnisse der – noch sehr jungen – Forschung zum Thema „computergestützte Präsentationen“ einbezieht. Zum anderen will er die Zielgruppe – Studierende und Berufseinsteiger – praktisch befähigen, überzeugende Präsentationen für Studium, gesellschaftliches Engagement und den Beruf zu entwickeln. Zu diesem Zweck werden zu jedem Schritt die theoretischen Grundlagen erläutert; Beispiele aus verschiedenen Bereichen geben Anregungen und verdeutlichen das Dargestellte, wobei auf Verständlichkeit und überdisziplinäre Anwendbarkeit geachtet wird. Um die eigene Präsentationserstellung zu erleichtern, enthält der Anhang Checklisten zu den einzelnen Schritten.

Präsentationskompetenzen setzen sich aus mehreren **Teilkompetenzen** zusammen, von denen der selbstbewusste Auftritt vor Publikum nur eine, wenn auch die in der Literatur am häufigsten behandelte ist. Dieser Band stellt alle Teilkompetenzen dar, die von der Vorbereitungsphase bis zur Nachbereitung einer Präsentation von Bedeutung sind:

**1. Fokussieren:** Überzeugende Präsentationen sind ziel- und empfängerorientiert. Hier geht es um alle Aspekte, die bei der Planung einer Präsentation berücksichtigt werden müssen: Ziel, Empfänger, Hauptaussage, Kontext, Wahl der Medien.

**2. Strukturieren:** Die Struktur einer Präsentation ist ihr tragender Pfeiler. Dieses Kapitel zeigt, welche Strukturen sich für verschiedene Präsentationsziele anbieten und worauf es bei Präsentationen im beruflichen Kontext ankommt.

**3. Formulieren:** Gute Präsentationen verknüpfen die logisch strukturierten Argumente zu einer Geschichte. Wie man dies erreicht und wie man Präsentationsunterlage und Redetext in Einklang bringt, wird in diesem Kapitel dargestellt.

**4. Visualisieren:** Visualisieren heißt, Informationen in ein ‚Bild‘ übersetzen, und zwar so, dass das Wesentliche auf den ersten Blick erkennbar wird. Dieses Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen und die vielfältigen praktischen Möglichkeiten von visuellen Darstellungen in Präsentationen.

**5. Editieren:** Bei dieser Qualitätskontrolle geht es darum, den Unterlagen den letzten Schliff zu geben und die Präsentation zu proben.

**6. Präsentieren:** Erstmals rückt das Zusammenspiel von Folien, verbaler und nonverbaler Kommunikation in den Blick der Forschung. Dieses Kapitel verweist auf die jüngsten Forschungsergebnisse und stellt die praktischen Aspekte der eigentlichen Präsentationssituation zusammen.

# 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)

# MODERN PERMANENT MAGNETIC MATERIALS ADVANCES AND LIMITS

## ABSTRACT

During the past two decades the world has experienced enormous advances in magnetic materials. Energy densities and magnetic field stabilities have been greatly improved, particularly by the combination of ferromagnetic and rare earth materials. However, is this progress set to continue? This paper attempts to address this question and describes the limitations behind the search for a new generation of permanent magnets.

## 1. INTRODUCTION

Certain materials notably iron, nickel, cobalt, and some of their alloys and compounds are capable of acquiring large permanent magnetic moments. There is an extremely wide range of differing types of magnetic materials and it is important to know firstly, why these and only these material display magnetic properties and secondly, what governs the differences in their behavior.

Furthermore a permanent magnet should possess two attributes:

- Firstly, the magnetization should still be fully present when the external magnetizing field is removed.
- Secondly, it should counteract a demagnetizing force, under high temperatures, due to a reversed magnetic field.

Remanence  $B_r$  and coercivity  $H_c$  are used to quantitatively express these two properties respectively. A more comprehensive characterization is achieved by means of the maximum energy product  $(BH)_{max}$ . Consequently,  $(BH)_{max}$  is a basic parameter for measuring and comparing the performance of permanent magnets. Since the 1920s, the maximum energy product of permanent magnets has been improved by more than a factor of a hundred as can be seen from Figure 1.

Table 1 shows a selection of modern magnet materials with the three most relevant characteristics.

Permanent magnets	Energy density $(BH)_{max}$ [ $KJ/m^3$ ]	Remanent induction $B_r$ [T]	Intrinsic coercivity $H_c$ [ $\times 10^5 A/m^3$ ]
Alnico-9	80	1.0	100
SmCo <sub>5</sub>	190	0.9	1300
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	230	1.1	1300
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	430	1.51	1000

Table 1: Standard Magnetic Materials

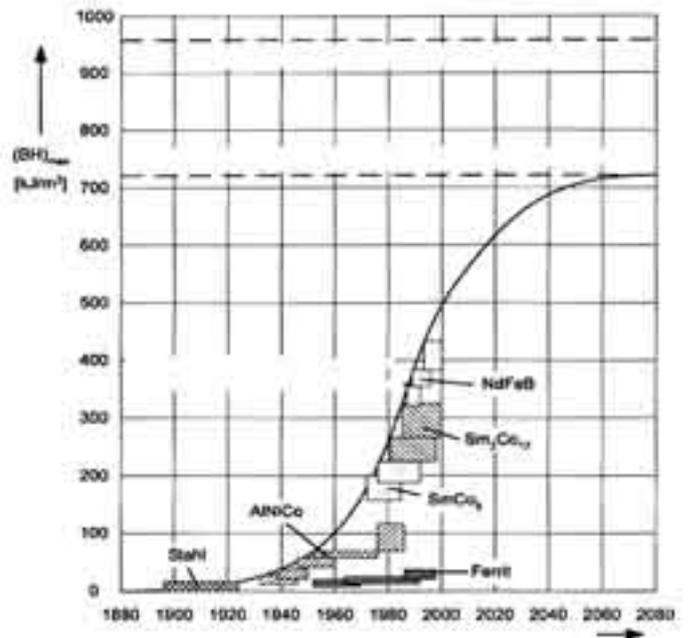


Figure 1: The history of  $(BH)_{max}$  since 1900 [Kallenbach]

Before embarking upon a quantitative comparison of magnetic materials a degree of basic magnetization theory is extremely helpful.

## 2. SIMPLIFIED THEORETICAL BACKGROUND

### 2.1 Magnetic moment and saturation magnetization

The basic object in magnetism is the magnetic moment which is coupled to an angular momentum. The magnetic moment of an electron consists of an orbital part and a spin part. The orbital part is converted to the orbital angular momentum of the electron. The spin part arises from the intrinsic angular momentum of the electron. This is described by the magnetic quantum number  $m_l$  and the spin quantum number  $m_s$ . To obtain the total magnetic moment of the atom it is necessary to add up the magnetic moments of the electrons whilst taking into account the fact that the direction of the moments are given by the sign of  $m_l$  and  $m_s$ . Consequently, closed shells of electrons having equal numbers of electrons with positive and negative values for  $m_l$  and  $m_s$  have no magnetic moment because all electrons neutralize one another. However, the filling of electrons in the inner atomic shells is incomplete. This leads to a well defined magnetic moment at every fixed atomic site, which in turn produces long-range magnetic coupling due to the exchange of conduction electrons. This

Element:	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
Number of 3d electrons	0	0	1	2	3	5	5	6	7	8	10	10
Spin directions	—	—	↑	↑↑	↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑
Magnetic moment in Bohr magnetons	0	0	1	2	3	5	5	4	4	2	0	0

**Table 2:** spin distributions and magnetic moments in the first period (without rare earth elements).

is why the most atoms with incomplete inner electron shells produce atomic magnetic moments. Table 2 lists materials with incomplete electron shells. [Michalowsky, 1995]

The resulting magnetic moments for a single electron are given by [Opel, 2005]:

$$\mu_B = \frac{-(e\hbar)}{2} m_e \quad \{1\}$$

this is defined as the bohr magneton

$$\mu_B = \frac{-(e\hbar)}{2} m_e = 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

The saturation magnetization ( $M_S$ ) is a measure of the maximum amount of magnetic field which can be sustained by a magnetic material. It will depend on the strength and density of the dipole moments within the atoms in the material. The atomic dipole moment will be influenced by the nature of the atom and the overall electronic structure within the compound. The packing density of the atomic moments will be determined by the crystal structure (i.e. the spacing of the moments) and the presence of any non-magnetic elements within the structure.

The magnetic moment per unit volume in metallic Fe, with an atomic moment of  $4 \cdot \mu_B$  on Table 2 ( $2,2 \cdot \mu_B$  exactly measured) and an atomic weight of  $M = 55,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ , a density of  $\rho = 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  is given by:

$$M_s = n \cdot \mu_B, \quad n = \frac{N_A}{M} \cdot \rho \quad \{2\}$$

The magnetic flux density B is expressed as either:

$$\vec{J} = \vec{B}_m - \vec{B}_0 = (\mu_r - 1) \cdot \vec{B}_0 \quad (\text{magnetic polarization}) [T] \quad \{3\}$$

$$\vec{M} = \vec{B}_m / \mu_0 - \vec{H} = (\mu_r - 1) \cdot \vec{H} \quad (\text{magnetization}) [A/m] \quad \{4\}$$

Where M and J are the local material contribution to the flux density respectively called magnetization and magnetic polarization and H is the contribution from all other sources

and is called magnetic field strength. Both expression for B will be used in this paper. Although magnetic polarization is the official name for J it will often be called magnetization.

with Avogadro's law  $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ atoms/mol}$

$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23} (\text{atoms/mol})}{55,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}} \cdot 7,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 = 8,52 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$${}^{Fe}M_s = n \cdot 4 \cdot \mu_B = 8,52 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \cdot 4 \cdot 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 = 3,16 \cdot 10^6 \text{ A/m}$$

$$B = J = \mu_0 \cdot M_s = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot 3,16 \cdot 10^6 \text{ A/m} = 3,97 \text{ T}$$

{5}

The calculated magnetization {5} is for a temperature of OK and for Fe having a resulting magnetic moment of 4 magnetons. The real value is much lower. This is explained by the thermal agitation in the lattice which disturbs the alignment of the atomic moments. Exact values of magnetization in ferromagnetic materials such as Fe, Co and their compounds are normally ascertained through measurement rather than exact calculation. Inter-electron and electron-atom interactions, displacements, crystal structure, temperature (curie point) and other influences show other values. Furthermore the radius of the incomplete inner atomic shells is also a important term for ferromagnetic materials and it is a value of the magnetic moment. Chrome and manganese shows under normal terms no ferromagnetic character. This elements have other magnetic structure (antiferromagnetic). Thus they have no important role in high energy permanent magnets. The real value of normal Fe is given by:

$${}^{Fe}M_s = n \cdot 2,2 \cdot \mu_B = 8,52 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \cdot 2,2 \cdot 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 = 1,738 \cdot 10^6 \text{ A/m}$$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} \cdot 1,738 \cdot 10^6 \text{ A/m} = 2,18 \text{ T}$$

Table 3 gives some examples of the saturation magnetization, Curie temperature and resulting bohr magnetons of commonly used magnetic materials. The saturation magnetization is also referred to as the spontaneous magnetization,

Material	$\bar{\mu}_B$	Curie Temp. [K]	$J_s [T]$
Fe	2,2	1043	2.18
Co	1,72	1388	1.72
Ni	0,61	627	0.64
Gd	8	292	2.59
$Dy^{3+}$	10,6	88	3.66
EuO	10,4	69	2.41

**Table 3:** Ferromagnetic materials with  $J_s$  and Curie temperature.

although this term is usually used to describe the magnetization within a single magnetic domain.

### 2.2 Magnetic anisotropy

Magnetic anisotropy is the directional variability of a specific magnetic property e.g. magnetic susceptibility or remanence magnetization. There are various methods of increasing or decreasing the coercivity of magnetic materials, all of which involve the controlling the magnetic domains within the material. Six mechanism have been proposed to explain magnetic anisotropy, whereby shape anisotropy and crystal-line anisotropy are the most important ones.

#### Crystal anisotropy:

In crystals, cations are located in a lattice structure, which affects the exchange process. The direction of magnetization is affected by this exchange. Now a magneto crystal-line anisotropy is produced. The phenomenon is more effective in a certain direction than in others and therefore the magnetization prefers to lie along specific crystallographic direction within the crystal. This behavior gives rise to an easy magnetization axis and a hard axis of magnetization within the crystal.

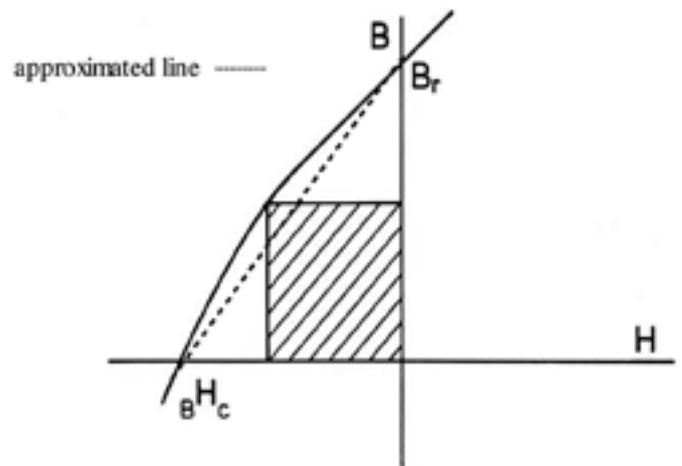
### 2.3 Energy Product

The energy product can be represented by the area of the shaded rectangle in figure 2. The hysteresis loop in the second quadrant is formed by a approximated straight line in figure 2. The line intersect the points  $(0, B_r)$  and  $(H_c, 0)$ . [Kronmüller, 1991], [Wohlfarth, 1982 (2)]. It can be calculated with:

$$(B \cdot H)_{max}^{theo} = \left(\frac{1}{4} \mu_0\right) M_s^2 \quad \text{with} \quad J_s = \frac{M_s}{\mu_0} \quad \{6\}$$

if the coercivity suits the following condition:

$$H_c \geq -\frac{1}{2} \frac{J_s}{\mu_0} \quad \{7\}$$



**Figure 2:** Demagnetize part of hysteresis loop curve

According to this calculation, the theoretical  $(BH)_{max}$  for an FeCo alloy yields the highest known saturation polarization of 2.4T at room temperature. The maximum energy product is calculated by:

$$(B \cdot H)_{max}^{FeCo} = \frac{1}{4} \frac{J_s^2}{\mu_0} = \frac{1}{4} \frac{(2.4T)^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} Vs/Am} \sim 1.15 \cdot 10^6 \frac{J}{m^3} \quad \{8\}$$

$$(B \cdot H)_{max}^{FeCo} = \sim 1.15 \frac{MJ}{m^3}$$

if the coercivity suits the following condition:

$$H_{max} \geq -\frac{1}{2} \frac{J_s}{\mu_0} \quad \{9\}$$

The typical saturation magnetizations of  $R_2Fe_{14}B$  rare earth compounds at 4.2 K and 300K measured along the easy direction of magnetization on single crystal are listed in table 4 [Börnstein & Landolt, 1986].

R	$\rho_s$ [ $\mu_B/f.u.$ ]		$M_s$ [T]	
	4.2 K	300 K	4.2 K	300K
Y	31.4	27.8	1.59	1.41
Ce	29.4	23.9	1.47	1.17
Pr	37.6	31.9	1.84	1.56
Nd	37.7	32.5	1.85	1.60
Sm	33.3	30.2	1.67	1.52
Gd	17.9	17.5	0.915	0.893
Tb	13.2	14.0	0.664	0.703
Dy	11.3	14.0	0.573	0.712
Ho	11.2	15.9	0.569	0.807
Er	12.9	17.7	0.655	0.899
Tm	18.1	22.6	0.925	1.15

max 1,6T  
with Nd

Table 4: Saturation magnetization of rare earth compounds

The highest saturation magnetization of sintered  $R_2Fe_{14}B$  magnets, has NdFeB with an  $J_s$  value of 1.6 T [Rodenwald et al, 2000]. The theoretical value of maximum energy product for  $Nd_2Fe_{14}B$  based magnets is calculated as 512 kJ/m<sup>3</sup> assuming 100% perfect alignment and 100% volume fraction of the hard phase. [Rodenwald et al, 2000]

Base Material	$T_c$ [K]	$B_r$ [T]	$H_c$ [ $\times 10^5$ A/m]	$mBH_{max}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	585	1.6	5.4	512
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> C	535	1.5	7.6	450
SmFe <sub>11</sub> Ti	585	1.16	7.4	512
Sm <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> C	540	1.42	4.2	403

Table 5: Magnetic Materials of several RE based permanent magnet materials

Table 5 shows a selection of RE based permanent magnet materials and their respective  $(BH)_{max}$  theoretical upper limits. [Buschow, 2003]

### 3. RESEARCH FOR NEW MATERIALS

#### 3.1 Fe-Alloys

Magnetic materials, including Fe-alloys, are presently used in soft magnetic materials and under investigation for use in hard magnetic materials. Fe alloys ( $J_s = 2.2T$ ) have a theoretical energy product maximum of 1 MJ/m<sup>3</sup>.

Fig. 4 presents the development of the maximum energy product  $(BH)_{max}$  during the last century. The shaded region covers hypothetical FeCo-based alloys, which are magnetically hardened by some additive X. It shows the progress which could be achieved if a FeCo-based magnet with a large saturation magnetization of 2.45 Tesla could be rea-

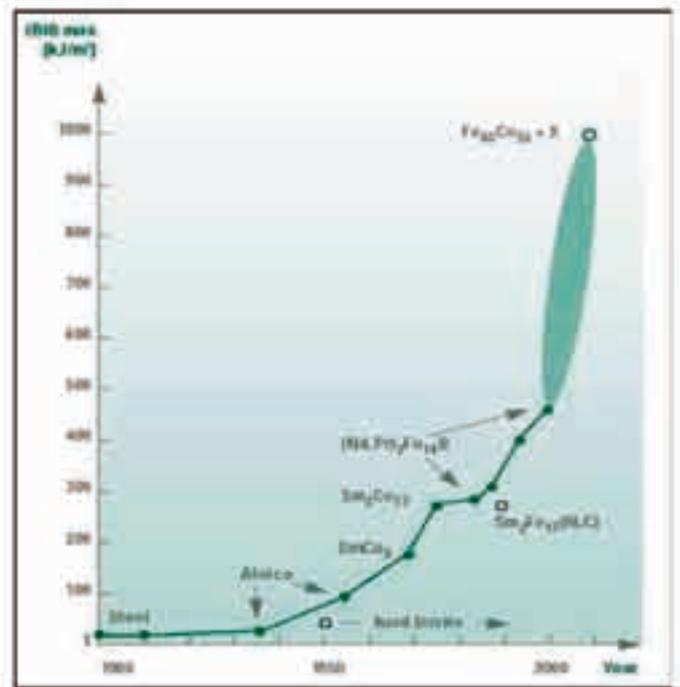


Figure 4:  $(BH)_{max}$  over the last century. [Kronmüller, 2004]

lized [Kronmüller, 2004]. Although Fe and Co demonstrate large magnetization and high Curie temperatures, they have low coercivity due to their low magnetic anisotropies and to date no way has been found of providing this alloy with a very high coercivity.

#### 3.2 SmFe-Alloys

New materials like SmFe based alloys intrinsically modified with nitrogen have been hailed as candidates for high energy permanent magnets as alternatives to NdFeB. Since their discovery in 1991, they have received considerable attention due to their excellent magnetic properties, high saturation magnetizing, high magnetic anisotropy and a relatively high Curie temperature. [Ping et al, 2003]

The microstructure of this hard magnetic material is composed of a mixture of magnetically hard and soft phases. Furthermore nano-composites are often doped with other elements in order to inhibit domain wall movement (temperature stability). Unfortunately, this is usually accompanied by a corresponding decrease in the amount of magnetic flux produced, since these additional elements reduce the volume of hard magnetic phases within the composite. Many investigations are currently in progress with the aim of optimizing the magnetic properties. Processes presently being

**Prof. Dr. Gareth J. Monkman**

Tel.: 0941 943-1108

Fax: 0941 943-1424

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

considered are: grinding, milling, HDDR (hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination) and nitriding. Hitherto SmFe(N) alloys have only slowly penetrated the market and their technical characteristics and market potential have not been fully evaluated. Generally it can be stated that SmFe(N) is a material comparable to NdFeB in its remanence with a coercivity similar to that of SmCo [Zuzek et al, 2002].

#### 4. CONCLUSIONS

Magnetic properties to be maximized are the saturation magnetization, the coercive field, the Curie temperature, and the magnetic anisotropy. A large saturation magnetization insures a large magnetic moment. A large coercive field insures that the magnet will not easily be demagnetized. A high Curie temperature permits applications under high external fields at temperatures above room temperature and a age stability.

The saturation magnetization  $M_s$  values apply to all the elementary atomic magnetic domains but neither the number of domains per unit volume nor the atomic magnetization of the domains can be essentially modified. Thus the highest remanence values for ferromagnetic materials and permanent magnets lie within the range 0.1 to 2.5 T (at room temperature) and this limits the resulting magnetic density. The coercivity force can be strongly modified by altering the materials physical properties such as crystal structure, doping with other elements, alloying, new nano composites etc.

The theoretical  $BH_{max}$  of NdFeB is about 512kJ/m<sup>3</sup> and the theoretical  $BH_{max}$  of Fe 1MJ/m<sup>3</sup>, assuming we could give Fe and Co higher coercivity without losing too much magnetic moment. The search for new magnetic materials is aimed toward the improvement of these properties by variation of the chemical composition and/or modification of the crystal-line structure of the materials.

It is not unreasonable to speculate that materials with better magnetic properties than NdFeB, SmFe(N) and SmCo may one day exist. However, the likelihood of this happening in the near future appears remote.

#### REFERENCES

- Buschow, K., New developments in hard magnetic materials, Philips Research Laboratories, Eindhoven (2003)
- Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Group III Condensed matter, Volume 19 III (1997)
- Kallenbach, E., Elektromagnet, Teubner, Wiesbaden (2003)
- Kronmüller, H.J., Magnetic Materials, Mat. 101, (1991)
- Kronmüller, H.J., 2.7 Magnetic Materials, Max-Planck-Institut für Metallforschung, (2004)
- Lapwoth, A.J. & Jakubovics, J.P., Proc. 3rd. Eur. Conf. on Hard Magnetic Materials - Amsterdam, (1974)
- Michalowsky, Magnettechnik, Grundlagen und Anwendungen, Fachbuchverlag Leipzig & Köln (1995)
- Opel D., Script -Magnetismus - Chapter 2, (2005)
- Ping, D.H., Hona, K., Hidaka, T., Yamamoto, T. & Fukuno, A., Microstructurale characterization of  $\alpha$ -Fe/Sm-Fe-N nanocomposite hard magnets, National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Japan, 2003
- Rodenwald, W., Blank, R., Wall, B., Reppel, G.W. & Zilg, H.D., Production of Sintered Nd-Fe-B Magnets with a Maximum Energy Density of 53 MGOe., Vacuumschmelze GmbH, Germany (2000)
- Wohlfarth, E.P., Ferromagnetic Materials, Wohlfarth Edition, A handbook on the properties of magnetically ordered substances, Volume 4, (1982)
- Zuzek, K., Drazic, G., McGuinness, P.J. & Kobe, S., High coercivity powders based on SMFETN prepared by a novel technique - Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia (2002)

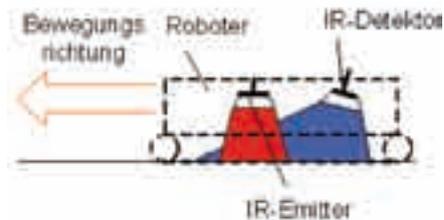
## BERÜHRUNGSLOSE SCHLUPFFREIE WEGMESSUNG OHNE GLOBALE SENSOREN

### ABSTRACT

Im Zuge der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der autonomen mobilen Robotertechnik wurde im Labor der Mechatronics Research Unit an der Fachhochschule Regensburg ein Sensorsystem zur berührungslosen und vor allem schlupffreien Wegmessung entwickelt, so dass die Selbstlokalisierung mobiler Roboterplattformen in geschlossenen Räumen ohne globale Sensoren wie GPS oder Funkortung ermöglicht werden kann. Das Sensorsystem soll unter anderem zur Verbesserung der Positionsschätzung durch Wegintegration der vom Roboter zurück gelegten Strecke dienen. Auf diese Weise soll es künftig ermöglicht werden, einen Roboter für zum Beispiel Serviceaufgaben in Gebäuden zu entwerfen, welcher hauptsächlich auf Koppelnavigation basiert. Da so auf die Erkennung von natürlichen Landmarken mittels Bildverarbeitung oder Laserscanning verzichtet werden kann und so keine perzeptuelle Kongruenzen beachtet werden müssen, verspricht man sich hiervon ein Navigationssystem, welches sehr kostengünstig umgesetzt werden kann. Als Grundlage zur Wegmessung wird hierbei auf eine Ermittlung von Abständen zwischen thermischen Punkten – temporäre mobile Landmarken –, welche zuvor von der Plattform auf den Untergrund projiziert wurden, zurückgegriffen.

### DAS SENSORSYSTEM

Der prinzipielle Aufbau des Sensorsystems besteht aus einer IR-Quelle, welche einen thermischen Punkt vom Robotersystem aus auf den Untergrund projiziert, einem thermischen



**Abbildung 1:**  
Prinzip der  
Wegmessung

Sensor (Thermosäule, Wärmebildkamera, ...etc.) zur Detektion der Projektion und einer Signalverarbeitungseinheit (Vgl. Abbildung 1). Eine einfache Messung besteht nun aus der Projektion des Punktes auf den Boden. Anschließend wird die Position des Punktes relativ zum Roboter gemessen und zwar solange, bis dessen Temperatur einen Mindestschwellewert unterschreitet. Anschließend muss ein neuer Wärmepunkt generiert werden.

So können sowohl diskrete, als auch analoge Messsysteme ermöglicht werden. Diskrete Systeme bestehen beispielsweise aus einem Emitter und einer Reihe von thermischen Sensoren, welche am Umfang um den Emitter angeordnet sind. Ein eindimensionales System ist in Abbildung 2 dargestellt. Diese Systeme haben den Nachteil, dass der von der Plattform fahrbare Weg auf den Radius der kreisförmigen Anordnung quantisiert werden muss. Analoge Messsysteme können unter anderem durch ein Array thermischer

Sensoren, welches wiederum eine Quelle im Mittelpunkt inne hat, realisiert werden. Diese globalen Messeinrichtungen haben jedoch den Nachteil, dass sich die Verarbeitung



**Abbildung 2:** Erste Realisierung der Wegmessung (links), Teststand für erste Messungen (rechts)

der Signale der Temperatursensoren aufwendig gestaltet. Im Gegenzug muss jedoch keine Wegeinschränkung der Plattform gefordert werden. Des Weiteren sind verschiedene Projektionsmethoden denkbar, und zwar die Projektion einer Linie, eines Punktes, oder einer mit Punkten modellierten Linie denkbar [Heckner, 2007].

Zur Evaluierung des Sensorsystems wurde der in Abbildung 2 (rechts) dargestellte Teststand entwickelt. Der Industrieroboter soll hierbei die Bewegung des mobilen Roboters simulieren. Durch Wiederholung der selbigen Abstandsmessung konnte hiermit bereits eine erste, über 100 Messwerte ermittelte, Standardabweichung von 0,3 mm erreicht werden. Dieses Ergebnis repräsentiert jedoch noch lange nicht die Spitze des Eisbergs. Um den Wärmepunkt zu prozieren wurde hierbei eine IR-Quelle mit 1 W Leistung und einer Aufheizzeit von 4 s eingesetzt. In einer realen Anwendung muss die Aufheizzeit natürlich eher im einstelligen Millisekundenbereich liegen, weshalb für verschiedene Böden das Abkühlverhalten analysiert wurde, so dass eine Schätzung bezüglich der tatsächlich benötigten Leistung über die Zeitkonstante ermöglicht werden konnte. Auf die Leistungsabschätzung, sowie deren Herleitung soll im nachfolgenden Abschnitt genauer eingegangen werden.

Abschließend wurde das Sensorsystem auf einer ersten Roboterplattform getestet. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass alle thermischen Landmarken wiedergefunden werden konnten.

**LEISTUNGSABSCHÄTZUNG ZUR IR-QUELLE**

Um Aussagen über das transiente Verhalten bei der Projektion des Wärmepunktes treffen zu können, wurde, wie bereits erwähnt, versucht anhand von Abkühlkurven eine Beziehung zwischen Strahlerleistung und Aufheizdauer für einen bestimmten Untergrund zu finden. Natürlich sollte prinzipiell ein Aufheizvorgang betrachtet werden, aus versuchstechnischen Gründen war dies jedoch nicht möglich. Da die Kühlbedingungen jedoch für Aufheiz- und Abkühlvorgang gleich sind, sollte der Unterschied bezüglich der Zeitkonstanten, welche der e-funktionalen Temperaturänderung zu Grunde liegt, sehr gering sein. Prinzipiell sollte der Aufheizvorgang bei der Projektion der Landmarke durch folgende Gleichung beschrieben werden können:

$$\Theta(t) = \Theta_E \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Wobei  $\Theta(t)$  die momentane Erwärmung und  $\Theta_E$  die Erwärmung für  $t \rightarrow \infty$  gegenüber der Raumtemperatur darstellt. Der

Bezug zur Leistung, welche eingestrahlt werden muss, wurde mittels nachfolgender Beziehung über die Anfangssteigung der Erwärmung hergestellt werden:

$$\left. \frac{d\Theta(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{P}{k} \tag{0-1}$$

Wobei k also system-beschreibende Konstante betrachtet werden kann, welche unter anderem die Materialkonstanten des Untergrunds enthält. Es gilt:  $k = c \cdot m$

Der Abkühlvorgang sollte mittels folgender Gleichung beschrieben werden können:

$$T(t) = (T_0 - T_R) \cdot e^{-at} + T_R \tag{0-2}$$

wobei gilt:

$T_0$ : = Anfangstemperatur, [°C]

$a = 1/\tau$ , [1/s]

$T_R$ : = Raumtemperatur, [°C]

Ziel der Versuchsdurchführung war es nun, die Anfangssteigung der Temperaturänderung  $\left. \frac{d\Theta(t)}{dt} \right|_{t=0}$  und die Zeitkon-

stante des  $\tau$  Systems während der Abkühlung über die Zeit bei verschiedenen Aufheizzeiten zu bestimmen. Zur Bestimmung dieser Parameter wurden Abkühlkurven bei verschiedenen Aufheizzeiten aufgenommen. Anschließend wurden die Parameter durch Curve-Fitting mittels der Analysesoftware Origin extrahiert (Vgl. Abbildung 3 Messwerte der Abkühlkurve und Fitting). Als Fitting-Funktion wurde aufgrund der systembeschreibenden Funktion (Vgl.  $T(t) = (T_0 - T_R) \cdot e^{-at} + T_R$  0-2), naheliegenderweise folgende Funktion verwendet:

$$y = y_0 + A \cdot e^{R \cdot x}$$

Die gesuchte Zeitkonstante  $\tau$  kann so direkt per Koeffizientenvergleich ermittelt werden. Zur Bestimmung der system-

beschreibenden Konsanten k nach Formel  $\left. \frac{d\Theta(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{P}{k}$  0-1,

musste zuerst die Anfangssteigung des Abkühlvorgangs bestimmt werden.

Diese ergibt sich aus Formel  $T(t) = (T_0 - T_R) \cdot e^{-at} + T_R$  0-2 zu:

$$k = \left. \frac{P_E}{\frac{dT(t)}{dt}} \right|_{t=0} = \frac{P_E}{(T_0 - T_R) \cdot e^{-t/\tau}} \cdot \tau \Big|_{t=0} = \frac{P_E}{T_0 - T_R} \cdot \tau$$

Da gilt:

$$\left. \frac{d\Theta(t)}{dt} \right|_{t=0} = - \left. \frac{dT(t)}{dt} \right|_{t=0}$$

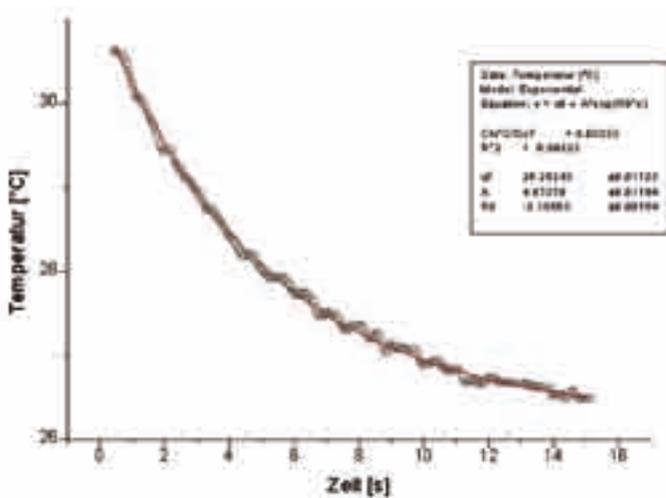


Abbildung 3: Messwerte der Abkühlkurve und Fitting

Ferner kann die Anfangssteigung auch von der aufheizenden Seite her betrachtet werden:

$$\left. \frac{d\Theta(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\Theta_E \cdot e^{-0/\tau}}{\tau} = \frac{\Theta_E}{\tau}$$

Daraus folgt:

$$k = \frac{P_E}{\Theta_E} \cdot \tau$$

Mit:

$$\Theta_E = \frac{\Theta(t_{auf})}{1 - e^{-t_{auf}/\tau}} = \frac{\Delta\Theta}{1 - e^{-t_{auf}/\tau}}$$

Die vom Emitter aufgenommene Leistung  $P_E$  wurde während der gesamten Versuchsdurchführung auf  $852mW$  ( $U_E = 7,1V$ ,  $I_E = 120mA$ ) gehalten. Die vom Boden zu absorbierende Leistung  $P_{Abs}(\Delta\Theta, t_{Auf})$  ergibt sich dann näherungsweise aus folgender Beziehung:

$$P_{Abs}(\Delta\Theta, t_{Auf}) = \frac{\Delta\Theta}{(1 - e^{-t_{Auf}/\tau})} \cdot k$$

wobei  $\Delta\Theta$  die benötigte Temperaturänderung, verursacht durch die Projektion der Landmarke, und  $t_{Auf}$  die benötigte Aufheizzeit darstellen.

Natürlich ist diese Vorgehensweise nur eine mehr oder

weniger genaue Schätzung, da unter Anderem beobachtet wurde, dass mit wachsender Aufheizzeit die Zeitkonstante größer wird, was natürlich über das größer werdende Volumen, welches über die Materialdichte eine größer werdende zu erwärmende Masse zur Folge hat, zu erklären ist. Im Gegensatz dazu wird der K-Faktor kleiner. Um jedoch einen Eindruck über die benötigten Größenordnungen zu bekommen, reicht sie leicht aus. Abbildung 1 soll den Zusammenhang zwischen Aufheizzeit und benötigter Leistung visualisieren, und zwar für eine angestrebte Temperaturerhöhung von  $\Delta\Theta = 1K$ . Zur Berechnung der Funktion wurde K-Faktor und Zeitkonstante  $\tau$  der Messung mit fünfsekündiger Aufheizzeit entnommen.

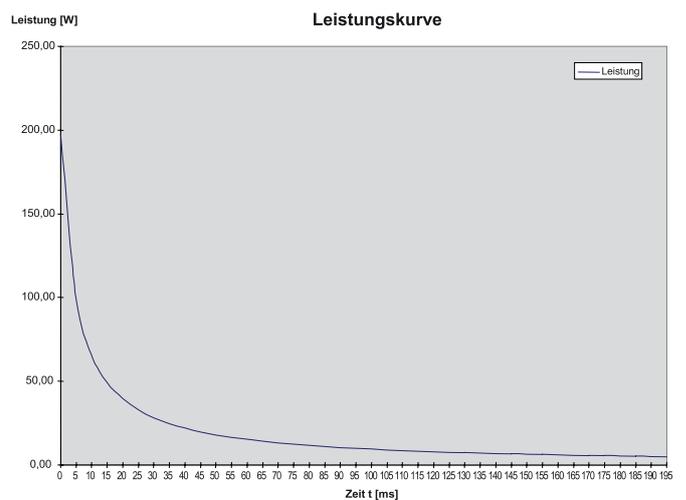


Abbildung 4: Schätzleistung als Funktion der Aufwärmzeit

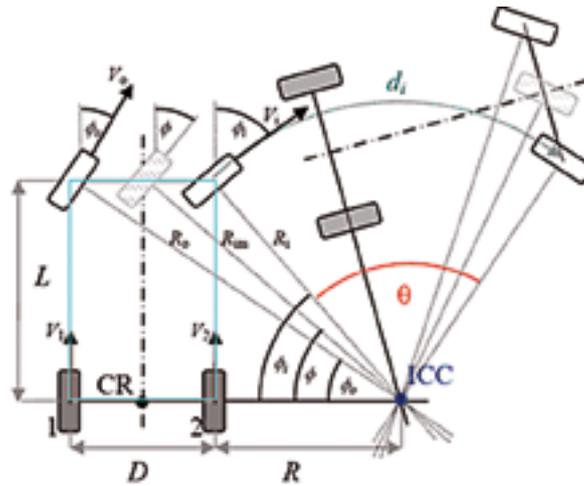
Abschließend soll noch kurz auf eine mögliche Dimensionierung eingegangen werden. Angenommen man will die Schlupfmessung für ein Robotersystem nutzen, welches als maximale Fahrgeschwindigkeit  $2\text{ m/s}$  aufweist, und der Emitter eine kreisförmige Fläche mit  $2\text{cm}$  Durchmesser bestrahlt, blieben für den Aufheizvorgang genau  $10\text{ ms}$ , was eine Spitzenleistung von ca.  $100W$  bei der Projektion zur Folge hat. Würde man eine Auflösung von  $10\text{cm}$ , welche dem Abstand zwischen Sensor und Quelle entspricht, zu Grunde legen, müsste eine mittlere Leistung von etwa  $25W$  aufgebracht werden, was durchaus vertretbar ist, auch bei Akkubetrieb.

### AUSWERTUNG DER SENSORDATEN

Wie bereits erwähnt soll die Position des Roboters in der internen Karte, welche durch die kartesischen Koordinaten

**Prof. Dr. Gareth J. Monkman**  
 Tel.: 0941 943-1108  
 Fax: 0941 943-1424  
 gareth.monkman@e-technik.fh-regensburg.de

$$\begin{aligned}
 x(k) &= V_{cr}(k) \cdot \cos[\Theta(k)] \cdot \Delta t + x(k-1) \\
 y(k) &= V_{cr}(k) \cdot \sin[\Theta(k)] \cdot \Delta t + y(k-1) \\
 \Theta(k) &= \frac{V_{cr}(k) \cdot \tan \phi(k)}{L} \cdot \Delta t + \Theta(k-1)
 \end{aligned}$$



**Abbildung 5:**  
 Positionsermittlung  
 [Schilling, 2006]

und dessen Ausrichtung  $(x, y, \Theta)$  bestimmt ist, mittels Integration der gemessenen Strecken bestimmt werden. Die exakte Berechnung hängt hierbei von der tatsächlichen Sensoranordnung ab. Würde man beispielsweise eine differentiell angetriebene Plattform mit zwei Sensoren, welche sich an den Rädern beziehungsweise Ketten befinden, betreiben, ergibt sich die Position aus den in Abbildung 5 dargestellten Gleichungen.

**ZUSAMMENFASSUNG**

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass ein solider Grundstein für ein neuartiges Sensorsystem geschaffen werden konnte, welcher ein erhebliches Problem der mobilen Robotik lösen könnte beziehungsweise entschärft. Ferner wären auch andere Anwendungen, bei denen schlupffreie Wegmessung eine Rolle spielt denkbar, wie zum Beispiel die Positionsermittlung eines XY-Tisches. Für konkretere Angaben bezüglich Einsatzgebiete und Messgenauigkeit, muss jedoch noch einiges an Entwicklungsarbeit folgen.

**REFERENZEN**

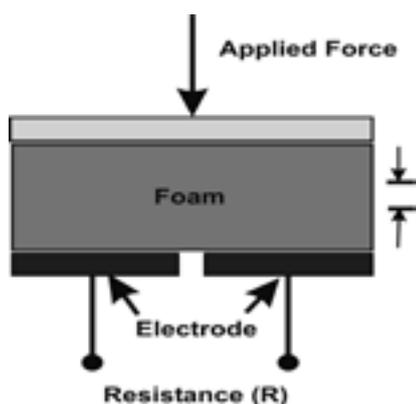
- [Heckner, 2007] Thomas Heckner, Selbstlokalisierung mobiler Plattformen in geschlossenen Räumen, Diplomarbeit Fachhochschule Regensburg, 2007
- [Schilling, 2006] Prof. Dr. Klaus Schilling, University of Würzburg, Department of Computer Science Robotics and Telematic, Experiments with mobile robots, 2006

## TACTILE SENSOR FOR ROBOTIC APPLICATIONS

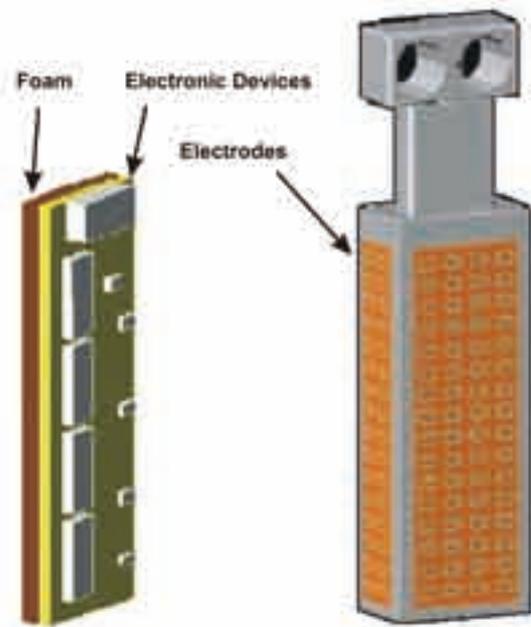
A predictive model has been proposed which uses a basic method adapted for real applications in grasp optimization. Prevention of premature release with minimum prehension force is addressed without measuring the coefficient of friction between object and robot gripper. Predictive models have been used to develop a set of rules which predict the presliding based on fluctuations in tactile signal data. Deformable surfaces caused by shear and moment forces on the tactile material are interpreted. We developed a method to reduce the risk of slippage by controlling the normal force and invented a system to detect slip from tactile sensor information. Additionally, the surface recognition algorithm that determines the types of contact surfaces by fusing information collected by the tactile sensor system are proposed. This algorithm can recognize 3-D objects using a 2-fingered robot hand, on which tactile sensors are mounted. Experiments demonstrate the reliability of the surface classification method and the accuracy of transformations independent of object shape, translation and rotation.

Changes in electrical resistance are detected by a tactile sensor made from electrically conductive foam. The soft, deformable surface detects continuous pressure with excellent sensitivity and resolution. The electrical resistance measured between two electrodes on the same side of the conductive foam (one tactile element) is derived from electrical conductivity through a number of simultaneously conducting paths.

The tactile sensor and control unit are connected to the robot through a fast CAN interface on the C167 chip. The analog-to-digital (12Bits) module consists of quad-channel ADC chips with successive approximation on all input channels capable of sampling frequencies up to 10 KHz. The robot-fingers are covered by 3-mm thick electrically conductive foam which provides each finger with 204 tactile elements.



**Figure 1:**  
Operating principle of the tactile elements



**Figure 2:** Details of each side assembled into the finger

Each side of the fingers is designed to measure the force at one specific location. The tactile sensors have been developed with the following specifications: one finger consists of two 16x4 cells, two 16x2 cells, and one 6x2 cell, making up the total 408 cells for two fingers. The width of the fingers is 20 mm, the length is 55 mm excluding an aluminum core and it has a thickness of 12 mm.



The tactile sensors are mounted on both surfaces of a 2-finger gripper on all four sides and their tips where they are used to sense force and moment data during operation of a 12-DOF mobile robot "ATHENE".

**Figure 3:** ATHENE Robot

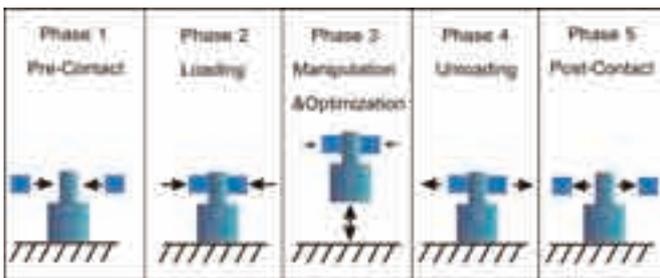


**Figure 4:**  
Object Prehension

**MINIMUM GRASPED FORCE**

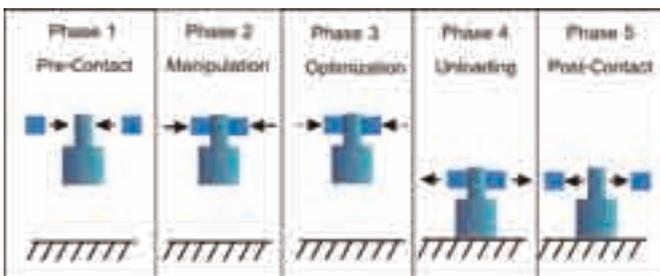
Specifically, the proposed tactile sensor is applied in grasp experimentation by identifying the least force required for prehension. The objects used consist of four different sized solid cylinders. Two experiments are conducted; Grasp-Lift-Replace and Grasp-Optimize-Replace.

**Grasp-Lift-Replace (GLR)**



**Figure 5:** Grasp-Lift-Replace Experiments

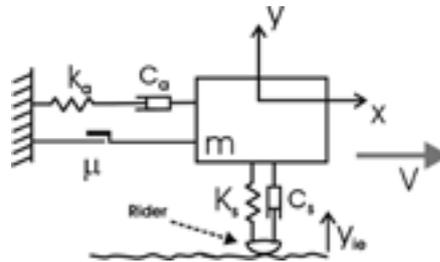
**Grasp-Optimize-Replace (GOR)**



**Figure 6:** Grasp-Optimize-Replace Experiments

In the first experiments, objects placed on a surface are prehended by a robot and the minimum prehension force determined by active force variation. In the second phase objects are held between the robot fingers and lifted above the surface. Prehension forces are then reduced until the first occurrence of pre-slip is detected and the applied force noted as the minimum retention force.

The generation of roughness induced dynamic grasping at a deformable contact point may be viewed most simply in the context of the model shown which describes both elastic and steady state creep behaviour. The models are simple and suitable for experimental representation of any polymer over an extended period of time.



**Figure 7:**  
Dynamic model

The smooth rider sits in contact with a rough surface moving at a constant velocity  $V$ . The rider is connected to a frame through a suspension characterized by a spring stiffness  $k_a$ , a damping constant  $c_a$  and a degree of static friction  $\mu$ . The normal contact stiffness  $k_s$  and any associated damping  $c_s$  are lumped between the mass and the moving surface. The normal and frictional force at the contact area are each composed of average components,  $F$  and  $M_G$  respectively and fluctuating components  $F_N(t)$  and  $F_G(t)$ .  $M_G$  is the object weight and  $F$  the prehension force.  $F_N(t)$  is the fluctuating force normal to the tactile surface while  $F_G(t)$  is the fluctuating friction force. The average kinetic coefficient of friction is usually measured as  $\mu_k = F / M_G$ , but the actual friction, occurring during oscillation is dynamic and denoted by  $\mu_D$ . The fluctuating part of the frictional force becomes  $F_N(t) = \mu_D F_G(t)$  and the friction  $\mu_D(x,y)$  changes according the object surface. The equation of the object surface will be estimated by the parabolic cylinder equation  $z^2 - 2py = 0$ . From this relation, the instantaneous coefficient of friction becomes  $\mu = (F + F_N(t)) / (M_G + F_G(t))$ . Tangential oscillations are governed by the equations (1):

$$m\ddot{x} + c_a\dot{x} + k_ax = F_G(t) \tag{1}$$

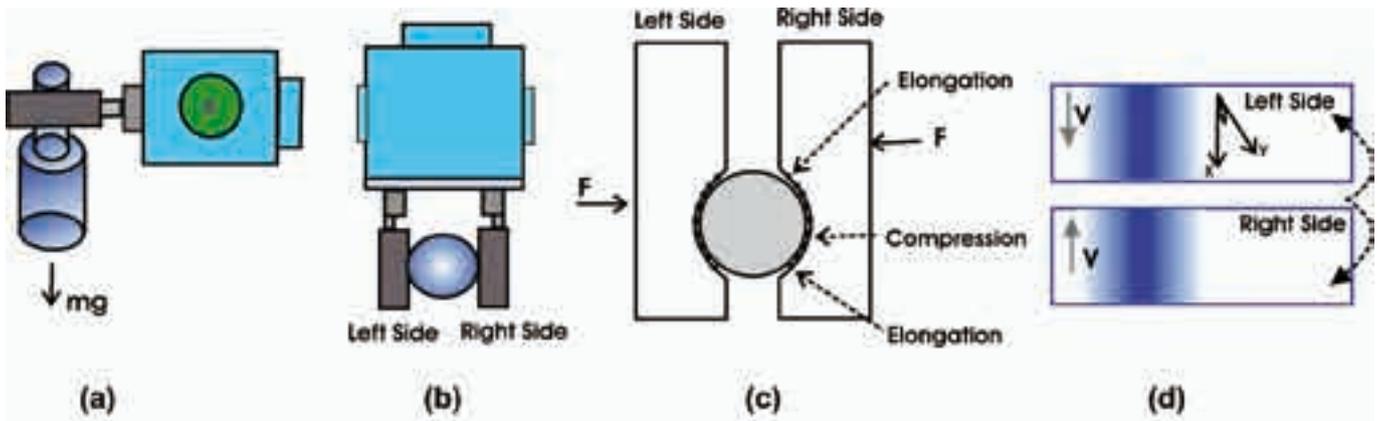


Figure 8: (a), (b) Object prehension, (c), (d) area of contact deformation and pressure distribution.

whereby  $k_a$  is the tactile surface hardness, defined as the stress/strain ratio  $\sigma/\epsilon$  and  $c_a$  is the damping constant. The governing equations for the contact surface, obtained by summing forces on the rider mass are:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c_a(\dot{x} - \dot{x}_{ie}) + k_a(x - x_{ie}) &= F_G(t) \\ m\ddot{y} + c_s(\dot{y} - \dot{y}_{ie}) + k_s(y - y_{ie}) &= F_N(t) \\ F_G(t) &= \mu_D F_N(t) \end{aligned} \quad (2)$$

### First Case: Grasp-Optimize-Replace

When one of the contact points slips, the relation between displacement and time can be approximated to a linear function; i.e. [Howe 1989]. Then, the slip displacement can be described as:

$$x = Ht, \quad (3)$$

where  $H$  is slope.

The completed solution to the differential equation,  $F_N(t)$ , is:

$$y(t) = C_1 e^{-\frac{t}{2}} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) + C_2 e^{-\frac{t}{2}} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) + c_a H t^{\frac{2}{3}}(t-1) + k_a H t^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

The slip on some contact points (local slip) will appear before total slip occurs. This slip can be detected by checking the oscillation frequency (fluctuation signal) and is identified as a pre-slip condition for the whole object. In the experiment of Grasp-Optimize-Replace, the object was held between the robot gripper fingers. The robot would then decrease the prehension force until it could detect slipping at some contact points which in turn would be indicative of complete

slippage. The rule sets can be adapted by checking the oscillation frequency (fluctuation signal) in the tactile array. If there are several tactile elements experiencing the same vibration frequency then whole slippage can be assumed. To rapidly measure the slip signal during prehension the computer memory may be organized in stacks. To compare stack data index (pointers) called 'index 1' and 'index 2' are used to scan the data. Index 1 locates the starting point of the scan or the oldest stored data, whereas index 2 locates the finishing point of the scan or the data next to those located by index 1.

There are three conditions which successfully indicate slippage determined by index 1 and index 2. The first one is differing cell vibration frequencies, the second one is a number of equal cell vibration frequencies. The last condition is that the first two conditions must both be simultaneously true for both sides of gripper to conclude that slip occurs. To check these conditions, two sets of procedures, responsible for each side of the tactile sensors in contact with the object, are conducted simultaneously.

### Second Case: Grape-Lift-Replace

Dundurs [J. Dundurs 1983] presented the solution for the shear tractions  $S(x)$ , with dislocation distribution on an elastic material. He introduced geometry of the problem for elastic contacts. The two components of force, shear and normal, can vary independently and are introduced as shear traction. The contact between objects is separated into three zones corresponding to point locations along the  $x$ -axis. He described the shear traction based on the locations of points in the slip zone and stick zone when they are dislocated. From the conclusions made by Dundurs, this means there

exists an extra term varying with time in the equations pertaining to surface deformation, i.e.  $\sin(at)$ . Then the equation of surface deformation will be  $y = z^2 / 2p + \sin(at)$ .

The same method can be used to find the solution to the differential equations, but particular solutions,  $y_P(t)$ , will not be different.

$$y_p(t) = -\frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\frac{t}{2}} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) \int e^{\frac{t}{2}} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) (C + D \sin(at))^{\frac{1}{3}} (A + Bt) dt + \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\frac{t}{2}} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) \int e^{\frac{t}{2}} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) (C + D \sin(at))^{\frac{1}{3}} (A + Bt) dt \quad (5)$$

It may not be necessary to find the integral solution because,  $y_P(t)$ , will always contain the term "sin(at)". That means in this case, there is more than one oscillation frequency (different numbers of fluctuation cycles) in the tactile array. One frequency is derived from the solution of  $y_C(t)$ , another from the solution of  $y_P(t)$ . In this experiment, the rule sets can be expressed: if there are more tactile elements that have different frequencies of oscillation (different numbers of fluctuation cycles), then the commencement of pre-slip can be assumed.

There will be four conditions which if true indicate pre-slip. The first one is unequal  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$  coordinates determined by index 1 and 2. The second one is unequal vibrating cells determined by index 1 and index 2. The third one is the frequency of vibration determined by index 2 - which must be larger than that of index 1. The final condition is that the first three conditions are simultaneously true on any of the fingers. To check these slip conditions, two simultaneous sets of procedures, each responsible for each side of the tactile sensors contacting the object, are required.

In both experiments it was necessary to use metal balls to weight the prehended object in order to evaluate the minimum grasping force before the object was forcibly released from the robot gripper. Each metal ball weighed 3.5 gram and the experiments were repeated thirty times for both Grasp-Lift-Replace and Grasp-Optimize-Replace.

This reflects the greater confidence in the mean value as more measurements are made. It can be stated that, based on 30 measurements, the impact ball at Grasp-Lift-Replace is  $2.96 \pm 0.128$  balls and at Grasp-Lift-Replace is  $3 \pm 0.133$  balls. The  $\pm$  values are the standard errors and express a level of confidence that the mean values (which are 2.96 and 3) represent the true values of the balls.

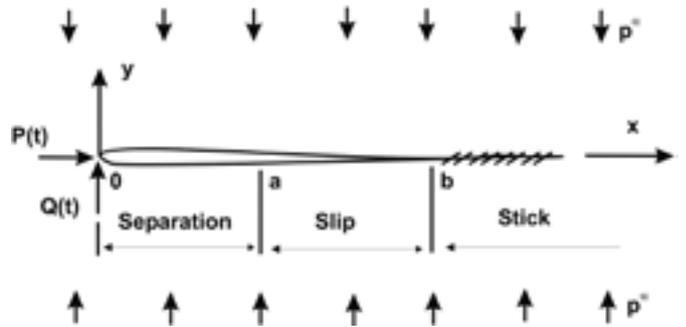


Figure 9: Geometry of the problem [J. Dundurs 1983]

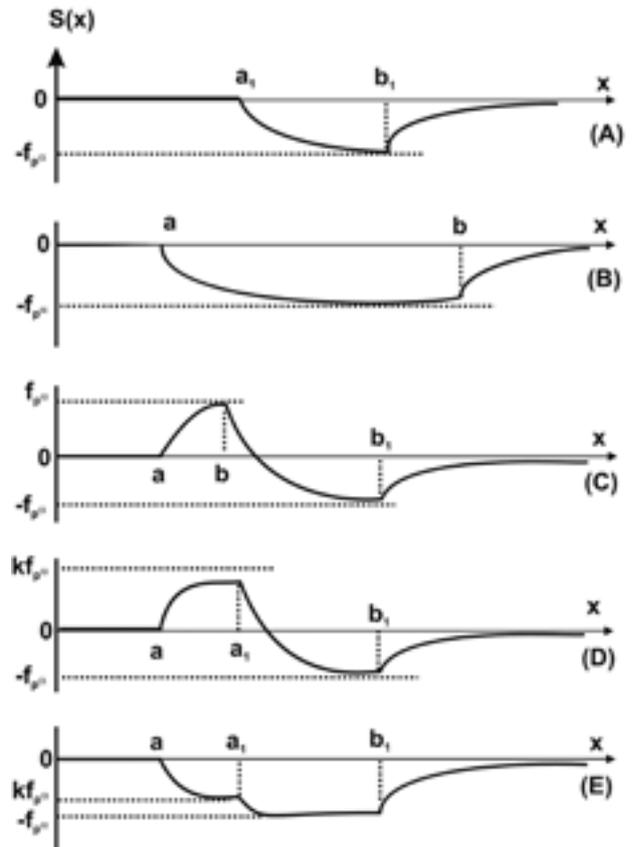
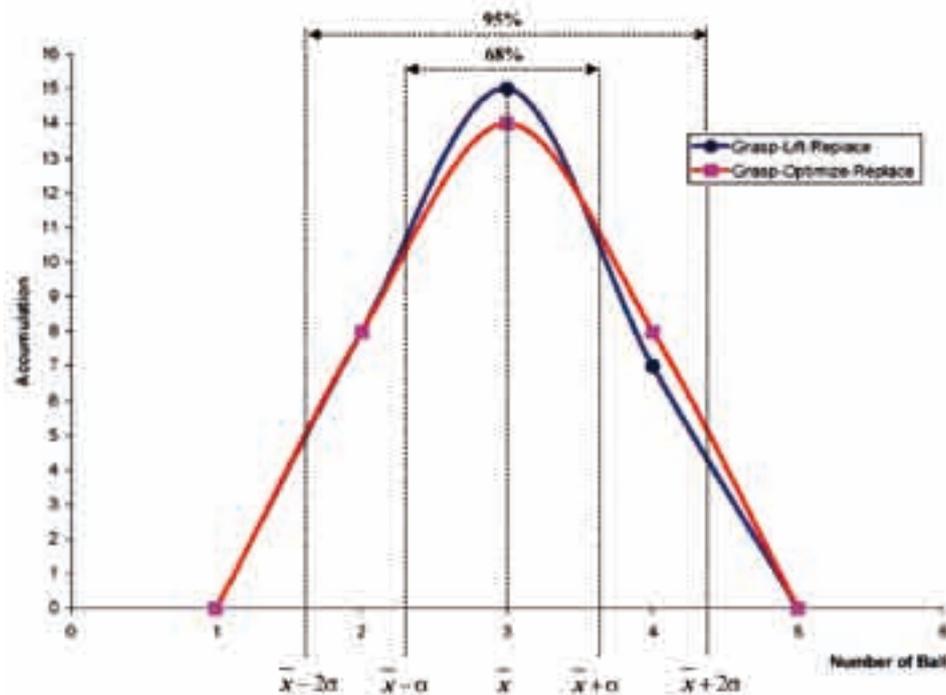


Figure 10: Distributions of shear tractions for loading from  $(P1, Q1)$ : (A)-Initial distribution; (B)-regime I; (C)-regime II; (D)-regime III with  $k > 0$ ; (E)-regime III with  $k < 0$  [J. Dundurs 1983].



**Figure 11:** Standard deviation of experimental results

### Contact Identification

In this study, an algorithm that can discriminate between types of contact surfaces and recognize objects at the contact stage is proposed. A tactile sensor array is used because it provides several types of meaningful information unavailable or difficult to acquire by a single sensor. Tactile arrays can recognize surface types on contact, making it possible for a tactile system to recognize translation, rotation, and scaling of an object independently. The type of contact surfaces obtained by the tactile system will be determined by the shape of the object image which can then be characterized using the mathematical properties of quadric surface.

To identify the properties of the quadric surface, the eigenvalues of the contact surface will be calculated. Here, the eigenvalue represents the matrix properties of the quadric surface of object prototypes calculable from the eigenvalue trajectory of the object types. The types of contact surface can be classified, for instance, into: elliptic, plane, cylindrical and spherical.

The shape representation designed for this study is both rotation and translation invariant. The quadric surface seems to be a simple, yet adequate, method for the proposed tactile sensor as the dimension of the tactile array (16x4) cannot

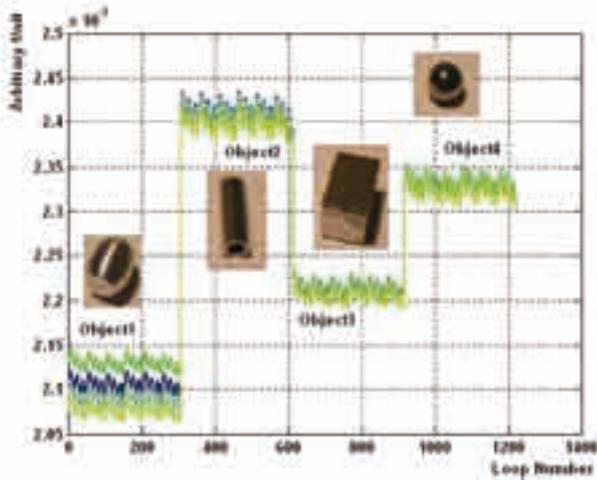
represent a complex object surface. The basic way of creating quadric surfaces uses least squares interpolation.

To classify the type of contact, the smallest eigenvalue of the covariance matrix derived from the contact surface is used. The training procedure is done to check classification performance. The quadric surface properties are modified by multiplying with transformation matrix for translation, rotation and scaling operations. This experiment applies several numerical, symbolic and graphical techniques to study the behaviour of matrix eigenvalues after the matrix elements have changed. This change normally requires numerical analysis and perturbation theory, but the technique called "eigenvalue trajectory analysis", illustrated in figure 12, is more widely applicable and will be adopted.

According to figure 12, the thresholds of object 1, object 2, object 3, object 4 correspond with oval, cylindrical, cube and ball shapes, respectively. Each object has a different eigenvalue in the eigenvalue trajectory with no particular increasing or decreasing order in terms of their levels. This leads into misclassification in the case of two very close threshold values.

This graph shows the smallest eigenvalue of the covariance matrix of the quadric surface properties independent of translation in all two axes (x and y), of rotations around any

**Prof. Dr. Gareth J. Monkman**  
 Tel.: 0941 943-1108  
 Fax: 0941 943-1424  
 gareth.monkman@e-technik.fh-regensburg.de



**Figure 12:** Eigenvalue trajectories of quadric parameters under different tested objects

axis (x, y or z), and of scalable values. After the trajectory of the eigenvalue is derived, it can be used to classify the contact surface of an object by matching the level of eigenvalues in the surface-property matrix belonging to the object prototype as shown in figures 13.

The eigenvalue trajectories were tested with random noise added to the tactile data and the performance of the algorithms verified. Object classification is statistically unaffected for noise levels under 8% of tactile data levels.

This algorithm is easy to apply for the smallest eigenvalue, but problematic due to round-off errors. Even though the

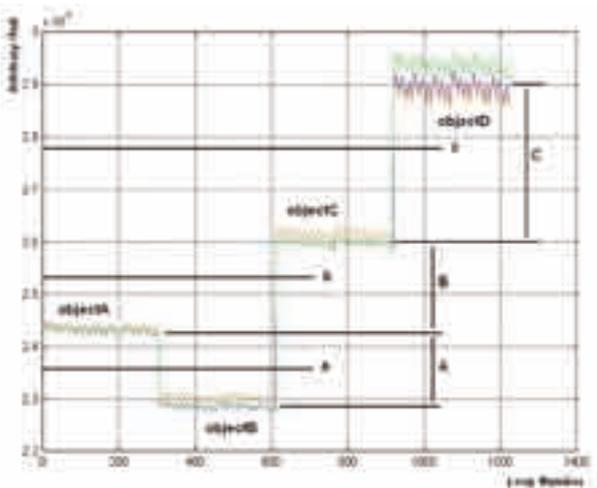
level enabling classification of objects is only in the range of  $10^{-3}$ , the computing method to find an eigenvalue needs a very small round-off error. Moreover, there are some methods used in finding the roots of polynomials via eigenfunctions as in Matlab. The algorithms simply involve computing the eigenvalues of the companion matrix. Although it is possible to prove that the results produced are the exact eigenvalues of a matrix within given round-off errors of the given companion matrix, this does not mean that they are the exact roots of the polynomial with coefficients within the same round-off error bounds. Furthermore, tests in our experiments have yielded poor results so these methods may not be suitable for contact identification.

On the other hand, popular methods such as the QR algorithm used in the LaPACK library (Linear Algebra Software Package), have good classification ability since a precise resolution within the range of  $10^{-3}$  is possible with very small round-off errors. The QR algorithm can be used for either general matrix or non-symmetric matrix. According to the QR algorithm, matrix  $A$  will be transformed into a Hessenberg matrix using householder convergence. This matrix is then used to calculate the eigenvalue. An important step is the factorization  $A_i = Q_i R_i$ , through the iteration process using the equation  $A_{i+1} = Q_i R_i = Q_i^T A_i Q_i$ .

Experiment has also clearly shown that classification capability reduces if the random noise peaks are greater than 8% of the ADC's maximum value. Invalid classification was achieved by increasing noise levels above 8%, and consequentially. As a result, contact classification cannot be achieved by simple level checking.

**REFERENCES**

Howe R., M. Cutkosky (1989): Sensing Skin Acceleration of Slip and Texture Perception. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 145-150.  
 J. Dundurs, M. Comninou (1983): An Education Elasticity Problem With Friction, Part3: General Load Paths, Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 77-84.



**Figure 13:** Windows of Margin

DIPL.-PHYS. MARTIN HUMMEL, PROF. DR. JÜRGEN MOTTOK,  
 DIPL.-ING. (UNIV.) RALF EGEN, PROF. DR.-ING. FRANK SCHILLER,  
 DIPL.-MATH. (UNIV.) TINA MATTES, DIPL.-ING. (UNIV.) MICHAEL BLUM,  
 DR. FRANZ DUCKSTEIN

## GENERISCHE SAFETY-ARCHITEKTUR FÜR AUTOMOTIVE SOFTWARE

Bei Fahrerassistenz- und X-By-Wire-Funktionen hat die eingesetzte Elektronik und damit die funktionserbringende Software eine hohe Verantwortung: Die Systeme müssen im Betrieb die Verkehrssicherheit jederzeit zu gewährleisten. Die mittlerweile erreichte Komplexität des Kfz-Bordnetzes sowie die verteilte Entwicklung (OEM, Zulieferer) führen dabei zu rapide steigenden Entwicklungsaufwänden. Für die Prüfung und Freigabe sicherheitsrelevanter Software, zum Beispiel für ein Brake-by-Wire Steuergerät, trifft dies in besonderem Maße zu. Zudem ist im Automobilbau der Weg über mehrfachredundante Systeme derzeit schwer umsetzbar. Neue Konzepte und Techniken sind nötig, die den ökonomischen Randbedingungen gerecht werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts mobilSoft entstand in Zusammenarbeit von Siemens VDO Automotive, der Technischen Universität München und 3SOFT ein Konzept für eine generische Safety-Architektur für automotive Software. Das Konzept sollte effizient und möglichst einfach in vorhandene Software und Infrastruktur integrierbar sein. Die Koexistenz von sicherheitsrelevanter und nicht-sicherheitsrelevanter Software auf einem Steuergerät sowie die Verteilung der Funktionalität über mehrere Steuergeräte hinweg wurden als wichtige Anforderungen identifiziert. Neben der von Projektbeginn an geforderten Kompatibilität zu den AUTOSAR-Konzepten ergaben sich weitere Anforderungen aus schon gültigen Safety-Normen und Safety-Richtlinien.

Folgende Eigenschaften sollte das Konzept erfüllen: eine separate Zertifizierung von einzelnen, sicheren Software-Komponenten, die nachweisbare Fehlererkennung und definierte Fehlerreaktion, die Kapselung von sicherheitsrelevanten Funktionen innerhalb der Software-Komponenten und eine sicherheitsrelevante Kommunikation über ein standardisiertes Interface. Auf dieser Grundlage wurden dann die im Folgenden beschriebenen Konzepte entwickelt. Das Ergebnis sind eine Architektur, die sicherheitskritische Funktionen, Fehlererkennung und Zustandsüberwachung klar trennt, sowie ein Safety Supervisor, der die zentrale Koordinierungsebene darstellt.

### SICHERHEITSORIENTIERTE STANDARDISIERUNG

Aktuelle Lösungen zur Erfüllung der Anforderungen sind meist individuelle Implementierungen auf Basis von Spezialhardware. Dies hat einen großen Zertifizierungsaufwand zur Folge, da für jede neue Lösung wiederum ein vollständiger Nachweis geführt werden muss. Zudem wirkt sich die Verwendung von Spezialkomponenten anstelle von Standardkomponenten oder Lösungen auf Basis von Redundanzen

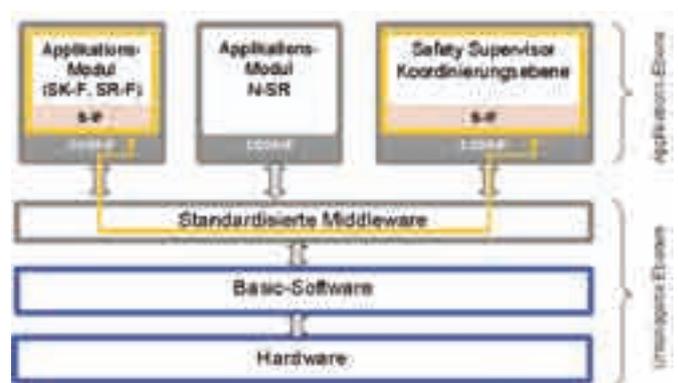
negativ auf die Kosten aus, was besonders in Anbetracht hoher Stückzahlen im Automobilbereich ein bedeutsamer Aspekt ist.

Die einfache Integration von sicherheitskritischen Funktionen in eine standardisierte Bordnetzarchitektur ist zur Zeit aufgrund fehlender Möglichkeiten der Kapselung von sicherheitsrelevanten Funktionen nicht praktikabel. Hierbei würden auch alle ursprünglich nicht sicherheitskritischen Software-Komponenten und die Hardware zu sicherheitskritischen Teilen und müssten bei der Zertifizierung berücksichtigt werden.

Als Lösung wird eine sicherheitsorientierte Standardisierung vorgeschlagen, die durch eine Kapselung seitens der Software-Architektur und definierten Mechanismen zur Fehlererkennung und Fehlerreaktion eine einfachere Prüfbarkeit bietet und eine verteilte Entwicklung sicherheitskritischer Software zulässt.

### WIE KANN EINE SOFTWARE-ARCHITEKTUR HELFEN?

Man unterscheidet Komponenten, die einen Einfluss auf die Sicherheit des Systems haben oder selbst ein Gefährdungspotential besitzen, von denen, die nicht-sicherheitsrelevant sind. Im Folgenden werden nur sicherheitskritische und sicherheitsrelevante Komponenten betrachtet. Eine sicherheitskritische Funktion (SK-F) kann bei eigenem Fehlverhalten Gefahr für Mensch oder Umwelt erzeugen. Sicherheitsrelevante Funktionen (SR-F) überwachen die sicherheitskritischen Funktionen, ohne dass ein eigenes direktes Gefährdungspotential von ihnen ausgeht.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Architekturkonzepts für sicherheitskritische Funktionen auf Steuergeräte-Ebene. Sicherheitskritische (im Bild SK-F und SR-F) Funktionen sind gekapselt und kommunizieren über ein gesichertes Safety-Interface (SIF). Auf Modul-Ebene erfolgt die Kombination mit nicht-sicherheitsrelevanten (N-SR) Komponenten.

Die Architektur sieht ausschließlich Komponenten auf Applikations-Ebene vor. Sicherheitskritische und sicherheitsrelevante Funktionen werden in Applikations-Modulen gekapselt. Neben einer Standardschnittstelle (COM-IF) zum Betriebssystem benötigen diese Komponenten zur Kommunikation der sicherheitsrelevanten Signale eine sichere Datenkommunikation. Dafür sorgt ein entsprechend definiertes Safety-Interface. Des Weiteren ist eine übergreifende Koordinierungskomponente, der Safety Supervisor, vorgesehen (s.a. Abbildung 1). Die unterlagerten Ebenen bestehen aus einer standardisierten Middleware (z.B. AUTOSAR Runtime Environment), der Basic-Software und der Steuergeräte-Hardware. Diese Ebenen können sowohl individuell als auch durch Standard-Bauteile (OSEK Betriebssystem, Standard Micro-Controller) realisiert werden. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Applikations-Ebene detailliert erläutert.

Die Kapselung bietet den Vorteil der möglichen Koexistenz mit nicht-sicherheitsrelevanter Software. Ein weiteres Plus liegt in der Einschränkung auf die sicherheitskritische Funktion beim Sicherheitsnachweis der Software. Man kann folglich durch geschickte Aufteilung erreichen, dass weniger Software geprüft werden muss.

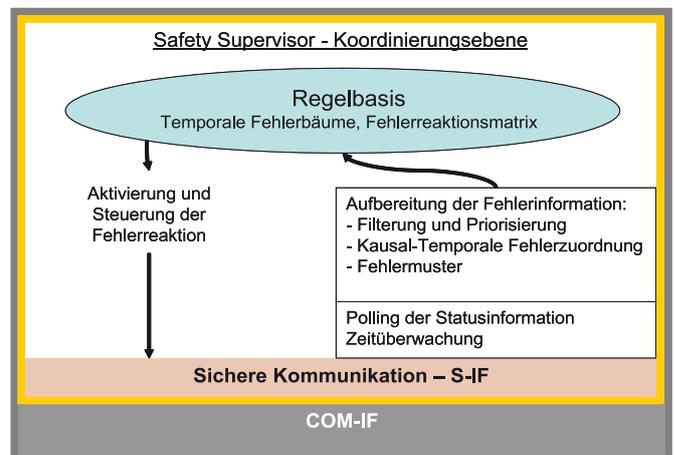
Die sicherheitskritische Funktion benötigt eine Sicherung der Daten und der Operationen. Es ist so möglich, zufällige Fehler sicher zu erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten und somit die funktionale Sicherheit des Systems zu garantieren. Das Konzept geht davon aus, dass die sicherheitskritischen und -relevanten Funktionen korrekt erstellt wurden, und nur noch zufällige Fehler wie beispielsweise Bitfehler zu einer gefährlichen Fehlreaktion des Steuergerätes führen können. Die dieser Absicherung zugrunde liegende Idee wird Coded Processor oder Coded Processing genannt [Forin].

Auch die Kommunikation muss geeignet gesichert werden. In der vorgeschlagenen Architektur ist es vorgesehen, dies über das Safety-Interface (S-IF) als sicheren Kanal zu realisieren. Hierbei sorgen geeignete zusätzliche Mechanismen wie Prüfsumme und fortlaufende Nummerierung für die sichere Aufdeckung von Fehlern. Hierbei ist wichtig, dass auch diese Maßnahme, unabhängig von vorhandenen Maßnahmen auf den unterlagerten Ebenen, auf der Applikations-Ebene stattfindet, und so die Elemente, wie das Standard-Kommunikations-Interface (COM-IF) oder die Middleware, somit nicht Teil der nachweispflichtigen Software sind.

**LOKAL PRÜFEN, ZENTRAL ENTSCHEIDEN**

Für die globale Überwachung steht ein zentraler Safety Supervisor bereit (siehe Abbildung 2). Der Safety Supervisor kontrolliert den Sicherheitszustand einer oder mehrerer sicherheitskritischer Funktionen (auch bei Verteilung über mehrere SW-Komponenten hinweg). Er gewährleistet eine hohe Verfügbarkeit des Systems durch frühzeitiges Reagieren und standardisiert die Kontrollfunktion und Fehlerreaktion auf Safety-Ebene. Letztendlich unterstützt diese Vorgehensweise die verteilte Entwicklung zwischen Autohersteller und den Zulieferern.

Der Safety Supervisor kann eigenständig geeignete Maßnahmen einleiten, um den passenden Sicherheitszustand (fail-safe, fail-operational oder fail-degraded) einer oder mehrerer Komponenten der Applikationssoftware zu erreichen.



**Abbildung 2:** Blockdiagramm Safety Supervisor. Die Kommunikation erfolgt über standardisierte Schnittstellen S-IF. Es erfolgt ein Monitoring (Polling) der Statusinformation inklusive Zeitüberwachung. Die akzeptierten Fehlerinformationen werden gefiltert und gewichtet (Priorisierung). Nach einer Aufbereitung der Fehlerinformation und Zuordnung zu Fehlermustern und Diagnose wird eine Fehlerreaktion generiert, basierend auf der programmierten Regelbasis und der priorisierten Fehlermuster. Pro überwachter Komponente wird der Sicherheitszustand initiiert und überwacht.

Die Generierung der Regelbasis erfolgt in der Entwicklungsphase des Steuergerätes. Der Regelbasis liegt das Systemwissen bezüglich des Zusammenhangs von Fehler und Funktion zugrunde. In der Regel kann der Fehlerpfad durch Verfahren wie FMEA und FTA ermittelt und die gewünschte Fehlerreaktion daraus entnommen werden.

**Prof. Dr. Jürgen Mottok**

Tel.: 0941 943-1120

Fax: 0941 943-1424

juergen.mottok@e-technik.fh-regensburg.de

**FAZIT**

Die Entwicklung von automotive Steuergeräte-Software mit sicherheitskritischen Funktionen ist eine große Herausforderung. Durch die Sicherung von Daten und Operationen kann die Fehlererkennung auf bewährten Plattformen erfolgen und somit Zeit und Kosten sparen. Mit der hier vorgeschlagenen Software-Architektur wird eine klare Trennung von sicherheitskritischer Funktion, Fehlererkennung und Zustandsüberwachung gemacht. Über eine entsprechende Standardisierung ist eine effiziente und gut nachprüfbar Entwicklung möglich.

In der Regel besitzen komplexe Steuergeräte mehrere sicherheitskritische oder sicherheitsrelevante Komponenten, die zudem von verschiedenen Zulieferern stammen können. Der Ansatz eines zentralen Safety Supervisor kontrolliert dabei die Zustände mehrerer sicherheitskritischer Funktionen, um eine Konsistenz der Fehlerreaktionen beim Auftreten eines oder mehrerer Fehlerzustände zu gewährleisten.

**Forschungsprojekt mobilSoft:** Softwaretechnik für das Automobil der Zukunft, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur Verkehr und Technologie (StMWIVT); Förderkennzeichen LuK 188/001, weitere Informationen unter [www.mobilsoft.info](http://www.mobilsoft.info)

Der vorliegende Artikel ist erschienen bei Hanser Automotive, München, 11 (2006) 52-54. Wir danken dem Carl Hanser Verlag für die Genehmigung des Abdrucks.

**Autoren:**

- Martin Hummel, Functional Safety, SIEMENS VDO Automotive
- Prof. Dr. Jürgen Mottok, Functional Safety, SIEMENS VDO Automotive
- Ralf Egen, Prozess-Ingenieur, SIEMENS VDO Automotive
- Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller, Leiter des Fachgebiets Automatisierungstechnik, Fakultät für Maschinenwesen, TU München
- Tina Mattes, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU München, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen
- Michael Blum, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU München, Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen
- Dr. Franz Duckstein, Manager, 3SOFT GmbH

**Anmerkung:**

Prof. Dr. Jürgen Mottok hat im Rahmen einer wissenschaftlichen Beratungstätigkeit für die SIEMENS AG, SIEMENS VDO Automotive, am Forschungsprojekt mobilSoft mitgewirkt.

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



## Partnerschaft und Kompetenz

... Basis für maßgeschneiderte Hydrauliksysteme

Kleine Hydrauliksysteme

für Patientenlagerung, mikrohydraulische Systemlösungen  
und Fahrzeugtechnik

- Komponenten
- Systeme
- Engineering

**HOERBIGER**  
*because performance counts*

**HOERBIGER Micro Fluid GmbH** · Borsigstraße 11 · 93092 Barbing  
Tel. +49 (0)9401 785 - 0 · Fax +49 (0)9401 785 - 50  
e-mail info-hmf@hoerbiger.com · www.hoerbiger.com

Strom aus der Dose.



Spannung ist bei uns der Regelfall, Hochspannungstechnik  
unser Metier. Mit unseren Produkten und Dienstleistungen  
tragen wir weltweit zur zuverlässigen Energieversorgung bei.

Spannung aus Regensburg.



[www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com)

Maschinenfabrik Reinhausen GmbH  
Falkensteinstr. 8, 93059 Regensburg, Tel. 0941/40 90-0



# Lernen mit Gehmeyr



praxisnah  
und  
nachhaltig

**Rexroth**  
Bosch Group  
Vertriebspartner



**Gehmeyr**  
Technischer Vertrieb

Systeme in Pneumatik, Montage- und Transfertechnik

Auerbacher Straße 2  
D-93057 Regensburg  
Tel. (0941) 69681-0  
Fax (0941) 69681-49  
info@gehmeyr.de  
www.gehmeyr.de



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. Renommiertere Kunden weltweit verlassen sich auf die wegweisenden Lösungen von MICRO-EPSILON.

## Sensoren



## Systeme



## Software



## Lösungen



[www.zukunftschancen.de](http://www.zukunftschancen.de)

Perfekt bewerben mit den Tipps in  
[www.zukunftschancen.de](http://www.zukunftschancen.de)

- Stärken- und Schwächenanalyse
- Dokumentenmappe anlegen
- Bewerbungen richtig formulieren
- Das bessere Telefongespräch und vieles mehr . . .

**Reinschauen, es lohnt sich!**

Bewerbungsmöglichkeiten online bei vielen Firmen in der Region.

Mit der **Online-Bewerbung** schnell kontakten!

Nur in [www.zukunftschancen.de](http://www.zukunftschancen.de)



Zukunft planen mit [zukunftschancen.de](http://www.zukunftschancen.de)

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)

## SIMULATION VON EINLAGERSTRATEGIEN

### 1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG

In der industriellen Produktion gelingt es nur selten, die Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsvorgänge zeitlich genau aufeinander abzustimmen, weswegen Lagerung unvermeidlich ist. Vor allem bei Fertigwarenlager handelt es sich in der industriellen Praxis um großdimensionierte Lagersysteme, die zumeist als Hochregallager, s. Abbildung 1, ausgelegt werden.

Ein Lagersystem (s. z.B. [Stadt98], [Arno95] oder [Arno05]) umfasst den Prozess der Lagerhaltung, dessen Aktivitäten grob in die fünf Gruppen Lagervorbereitung, Einlagerung, Lagerung, Auslagerung und Lagernachbereitung unterteilen lassen, und die physische Infrastruktur wie spezielle Gebäude, technische Einrichtungen (z. B. Regale), Fördermittel (z. B. Transportbänder, Rollenbahnen, Kräne, Gabelstapler, Regalbediengeräte) sowie Ladungsträger (z. B. Paletten und Container). Die für die Lagerhaltung noch wesentliche Disposition von Lagerzugangsmengen und -zeitpunkten wird im Rahmen des Bestandsmanagements behandelt.

Die einzelnen Elemente eines Lagersystems beeinflussen sich gegenseitig und müssen daher sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Dies betrifft sowohl die Auswahl der Lagertechnik als auch die Dimensionierung der Lager- und Handlingkapazität sowie die Entwicklung geeigneter Informations- und

Steuerungssysteme. Im Allgemeinen werden die Maximierung des Raumnutzungsgrads und der Umschlagleistung des gesamten Lagersystems, d.h. das Lagersystem soll innerhalb einer gegebenen Zeitspanne (z. B. einer Stunde) möglichst viele Lagereinheiten ein- bzw. auslagern können, angestrebt.

In der industriellen Praxis wird vielfach versucht, die Raumausnutzung und die Umschlagleistung eines Lagers durch aufwendige lager- und fördertechnische Maßnahmen zu steigern. Als Alternative wurde in enger Zusammenarbeit mit der Klug GmbH untersucht, welche Leistungsreserven durch eine effiziente Steuerung von Regalbediengeräten erschlossen werden können. Bei einem Regalbediengerät handelt es sich (in der Regel) um ein automatisiertes Fördermittel, das ein oder mehrere Ladungseinheiten aufnehmen kann. Sein Betrieb beeinflusst folglich die Effizienz der Einlagerung (-en) und der Auslagerung (-en) in einem Lagerhaltungsprozess und beeinflusst daher die Umschlagleistung eines gesamten Lagersystems.

Die Beobachtung einer Steuerung von Regalbediengeräten in existierenden Lagern erfordert einen langen Beobachtungshorizont, um aussagekräftige Daten zu erhalten. Da eine solche Untersuchung in existierenden Lagern nicht möglich ist, wurde in dieser Forschungsarbeit die Wirkung von Regalbediengerätesteuerungen simuliert. Hierzu wurde ein Softwaresystem implementiert, mit dem Lagerprozesse simuliert werden können. In der

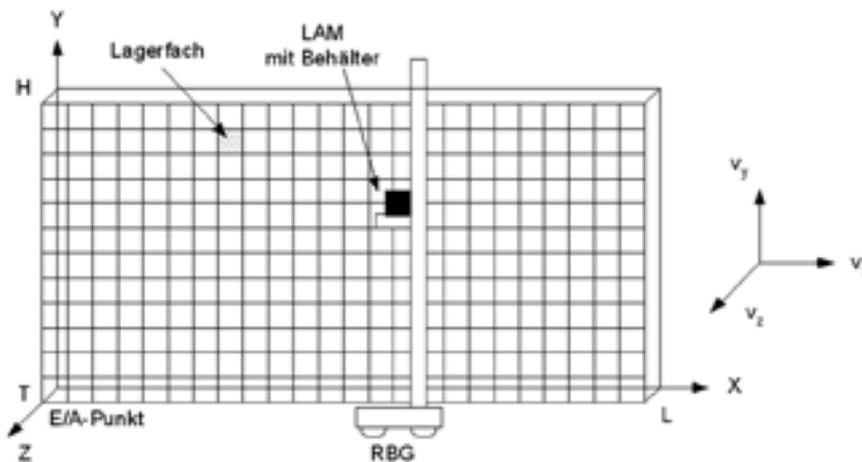
Literatur übliche alternative Untersuchungen berechnen die charakteristischen Kennzahlen mathematisch durch analytische Modelle. Die Unterschiede in den Vorgehensweise einerseits sowie Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei den Ergebnissen andererseits sind in den entsprechenden Abschnitten angegeben.

**Abbildung 1:** Ansicht eines Hochregallagers



### 2 TESTPROBLEM

Die Grundlage dieser Simulationsuntersuchung bildet eine Abstraktion des Palettenlagers der Goldsteig Käsereien Bayerwald GmbH. Dort, wie auch bei



**Abbildung 2:** Modell des Regals und des Regalbediengeräts (RBG)

Hochregallagern generell üblich, wird die Ware in freistehenden Regalen gelagert. Auf diese eingelagerte Ware, die i. d. R. auf Paletten gestapelt ist, wird mit Hilfe der Regalbediengeräte zugegriffen. Jede Regalzeile ist mit einem eigenen Regalbediengerät (RBG) ausgestattet, das über ein Lastaufnahmemittel (LAM) eine oder mehrere Ladungseinheiten aufnehmen kann.

Der weiteren Betrachtung wird das in der Abbildung 2 dargestellte und in [Arno95] vorgestellte Modell einer Regalanlage und eines Regalbediengeräts zugrunde gelegt. Die X-Achse verläuft an der Länge der Regalwand, die Y-Achse läuft entlang der Höhe und die Z-Achse beschreibt die Tiefe. Das Regal hat die Länge L, die Höhe H und die Tiefe T. Der Ein-/Auslagerpunkt, d.h. die Ein- und Auslagerbahn, liegt hier in der linken unteren Ecke an den Koordinaten (0,0). Die Einlagerbahn und Auslagerbahn können sich aber an jedem beliebigen Punkt am Rand oder in der Regalfläche befinden. Die Lagerfächer sind in Zeilen und Spalten regelmäßig angeordnet und im Modell durch Kästchen dargestellt. Bei Regalbediengeräten handelt es sich um automatisierte Fördermittel, die innerhalb einer Lagergasse (in x-Richtung mit der Geschwindigkeit  $v_x$ ) verfahren werden und gleichzeitig über ein Hubgerät ein bestimmtes Regalfach in der Höhe (in y-Richtung mit der Geschwindigkeit  $v_y$ ) ansteuern können, während das Lastaufnahmemittel in ein Fach der Tiefe (in z-Richtung mit der Geschwindigkeit  $v_z$ ) fahren kann, um Behälter aufzunehmen oder abzugeben.

Das Modell des einfachtiefen Palettenlagers besteht aus einer Gasse und zwei Regalen. Jedes Regal umfasst 44 Stellplät-

ze in x-Richtung und 14 Stellplätze in y-Richtung. In z-Richtung befindet sich nur je ein Stellplatz (also insgesamt 1232 Stellplätze). Ein Regal ist 42,72 m lang, 24,94 m hoch und 1,43 m tief. Da alle Stellplätze gleich sind, ergibt sich für einen Stellplatz folgende Abmessungen: 0,97 m Länge, 1,78 m Höhe, 1,43 m Tiefe. Die Einlagerbahn befindet sich im Regal 1 an Position (0,0,1) und die Auslagerbahn im Regal 2 an Position (0,0,1). Es wird ein Regalbediengerät mit einem Lastaufnahmemittel mit einer Position verwendet. Dieses Regalbediengerät wird mit folgenden maximalen Geschwindigkeiten ( $v$ ) und Beschleunigungen ( $a$ ) bzw. Bremsungen ( $-a$ ) betrieben.

$$v_x \text{ leer: } 2,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_x \text{ beladen: } 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_y \text{ leer: } 0,9 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$v_y \text{ beladen: } 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_z \text{ leer: } 1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_z \text{ beladen: } 0,87 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$a_x = 0,45 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, a_y = 0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ und } a_z = 0,45 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Um sowohl die Durchführung der Simulation als auch die Interpretation ihrer Ergebnisse zu erleichtern, wurden folgende Vereinfachungen des Lagerbetriebs vorgenommen: Die Größe der Lagerfächer ist homogen; m.a.W.: alle Lagerfächer haben die gleiche Größe. Deshalb gibt es auch nur einen Behältertyp. Es gibt keine Einschränkungen bezüglich der Einlagerung, so dass prinzipiell jeder Behälter auf jeden Stellplatz eingelagert werden darf. Gewichtsrestriktionen bleiben ebenfalls unberücksichtigt. Weiterhin werden statt Artikel Förderereinheiten betrachtet.

Erfahrungswerte mit realen Lagern, die durch Experimente mit dem Simulationssystem bestätigt werden, zeigen, dass die Leistungsfähigkeit der Steuerung von Regalbediengeräten durch den Füllgrad eines Lagers bestimmt ist. Die Messung des Lagerfüllgrads verschiedener von der Klug GmbH konzipierter und betreuter Lager ergab eine Schwankung im Füllgrad zwischen 50% und 95%. Deswegen wurden in der Forschungsarbeit die Füllgrade von 50%, 80% und 99% untersucht. Füllgrade unter 50% sind weniger praxisrelevant, ein Füllgrad von 99% entspricht einem sehr ausgelasteten Lager und 80% wird als Mittelwert gewählt. Die Füllgrade von 50% und 99% können als Grenzwerte eines Lagerfüllgrads aufgefasst werden.

Grundsätzlich kann ein Regalbediengerät nach dem Einzel- oder dem Doppelspiel eingesetzt werden. Beim Einzelspiel wartet das Regalbediengerät am Übergabepunkt der Regalzeile auf einen Transportauftrag. Im Falle einer Einlagerung wird die Ladungseinheit in das nächstgelegene freie Regalfach eingeordnet. Anschließend kehrt das Regalbediengerät zum Übergabepunkt zurück. Bei einer Auslagerung wird das betreffende Regalfach angesteuert, und die Ladungseinheit wird am Übergabepunkt bereitgestellt. Beim Doppelspiel hingegen kann das Regalbediengerät nach einer erfolgten Einlagerung unmittelbar ein weiteres Regalfach ansteuern, aus dem eine Auslagerung getätigt werden soll.

Im realen Lagerbetrieb hängt die verwendete Bewegungsstrategie mit den Aufträgen zusammen. Bei bevorzugtem Wareneingang werden vermehrt Einlagerspiele durchgeführt, bei bevorzugtem Wareneingang vermehrt Auslagerspiele. Im Idealfall werden Ein- und Auslagerungen immer kombiniert, um Leerfahrten zu vermeiden und die Spielzeit zu reduzieren. Ein Doppelspielanteil von 100% wird in der Realität aber oft nicht erreicht, so dass Einzel- und Doppelspiele durchgeführt werden; ein Verhältnis von 2:5 erscheint aufgrund unseres Erfahrungshorizonts als sehr realistisch. Daher wurde das Vorliegen von

- nur Einzelspiele
- nur Doppelspiele
- Einzelspiele und Doppelspiele vermischt im Verhältnis 2:5 simuliert.

In industriellen Lagersystemen werden in der Regel A-, B- und C-Behälter eingesetzt. Motiviert durch reale Lagersysteme aus unserem Erfahrungshorizont sind zu Beginn der Simulation 40% der Behälter im Lager A-Behälter, und je 30% B- bzw. C-Behälter. In solchen Fällen ist es nahe liegend, richtig dimensionierte Zonen zugrunde zu legen. Daher sind die Zonen im Lager ebenso verteilt: 40% der Stellplätze sind A-Stellplätze, weitere 30% sind B-Stellplätze und bei den restlichen 30% handelt es sich um C-Stellplätze. Die Einteilung der Zonen erfolgt nach dem Algorithmus von Lippolt und Blunck [LBOO], wobei als Startpunkt der Zoneneinteilung die Einlagerbahn gewählt wird. Liegt ein solches aufeinander abgestimmtes Zusammenspiel zwischen den Verteilungen der ABC-Behälter und der ABC-Zonen vor, so wird dieses als abgestimmte ABC-Behälter- & ABC-Zonen-Verteilung bezeichnet.

Beim Vorliegen von ABC-verteilten Behältern sollten die zufälligen Ein- und Auslageraufträge ebenfalls ABC-verteilt

sein. Auch hier werden aufgrund unserer Erfahrung mit realen Lagern die Verteilungen

- 80% A, 15% B, 5% C
- 60% A, 20% B, 20% C
- 50% A, 25% B, 25% C

untersucht. Wegen der bei ABC-Verteilungen bekannten „80:20“-Regeln (genauer „80:15:5“-Regel) wird in den Simulationen die erste Variante verwendet. Deswegen wird die oben eingeführte abgestimmte Verteilung um diese Variante erweitert, wodurch die abgestimmte ABC-Behälter- & ABC-Zonen- & ABC-Ein- und Auslageraufträge -Verteilung entsteht.

Alle Steuerungsverfahren werden für alle diese Einflussgrößen untersucht, so dass jede Kombination als ein Arbeitspunkt der Simulation aufgefasst werden kann. Obwohl eine möglichst gute Abstimmung zwischen den ABC-Verteilungen für die Behälter, Zonen und Ein- und Auslageraufträgen einleuchtet, ist ihre Abweichung in der industriellen Praxis möglich und dürfte auch quasi „schleichend“ auftreten, sofern nicht kontinuierlich beobachtet wird und auftretende Abweichungen konsequent korrigiert werden. Die Relevanz dieser Maßnahme wird analysiert, in dem signifikante Abweichungen vorgenommen werden. Da ein System grundsätzlich gut eingestellt sein soll, wird auf die Aufnahme dieser Parameter in einem Arbeitspunkt verzichtet.

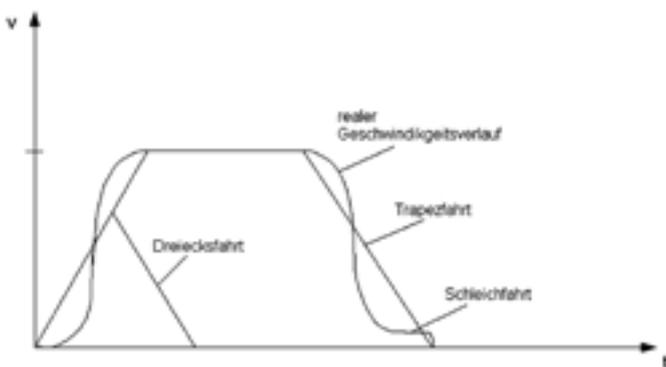
Jeder Lagerbetrieb ist durch ein zufälliges Auftreten von Ein- und Auslagerungen gekennzeichnet. Deswegen werden in jedem Simulationsexperiment die Anzahl an Ein- und Auslagerungen zufällig über eine Normalverteilung erzeugt; diese Einstellung wird über den Erwartungswert und die Standardabweichung der Normalverteilung charakterisiert.

### 3 KENNZAHLEN

Steuerungen von Regalbediengeräten beeinflussen die Ein- und Auslagerzeiten. Diese Zeiten werden durch den Bewegungsablauf für das Fahrwerk und das Hubwerk bestimmt, da die Anzahl der ein- bzw. auszulagernden Güter im Untersuchungszeitraum konstant zu halten sind. Ein solcher bei allen Fördervorgängen wiederkehrender Bewegungsablauf wird als „Arbeitspiel“ bezeichnet und die dabei benötigte Zeit heißt Spielzeit. Beim Regalbediengerät besteht er aus den Phasen: Anfahren, Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, Bremsen, Positionieren am Ziel. Am Zielort ist das so genannte Lastaufnahmemittel-Spiel zur Aufnahme oder Abgabe einer Fördereinheit durchzuführen. Es besteht aus

dem Vorbewegen der Teleskopgabel bzw. des Teleskopisches, dem Anheben des Hubwagens, dem Zurückbewegen der Teleskopgabel bzw. des Teleskopisches und der Senkbewegung des Hubwagens; bei Riemenförderer entfällt die Hub- und Senkbewegung.

In beiden Fällen treten veränderliche Fahrzeiten auf, die zunächst untersucht werden. Viele Literaturstellen vernachlässigen bei der Fahrzeitberechnung die Beschleunigungs-, Abbrems- sowie Positionierzeiten, die in realen Lagern auftreten, und wenden auf die dann vorliegenden konstanten Geschwindigkeiten in x- und in y-Richtung die bekannte Tschebyscheff-Metrik an. Tatsächlich hat der reale Geschwindigkeitsverlauf den in Abbildung 3 dargestellten Verlauf. Wie Arnold in [Arno95] ausarbeitete, kann der Geschwindigkeit-Zeit-Verlauf des realen Verlaufs durch die Linearisierung der Beschleunigungs- und Bremsphase und der Vernachlässigung der Schleichfahrt während des Positioniervorgangs durch ein Trapez angenähert werden; dies ist ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt. Wird die maximale Geschwindigkeit des Regalbediengeräts während einer Fahrt nicht erreicht, so geht das Trapez in ein Dreieck über; s. Abbildung 3.



**Abbildung 3:** realer und vereinfachter Geschwindigkeitsverlauf

In [Hein07] wurden die einzelnen Berechnungsformeln für die Fahrzeiten im Detail hergeleitet; sie stimmen mit den in [Arno95] genannten Formeln überein.

Zur Vereinfachung nimmt [Hein07] an, dass Beschleunigung und Verzögerung den gleichen Betrag haben. Nach [Hein07] beträgt beim Erreichen der maximalen Geschwindigkeit die Fahrzeit für eine zu fahrende Strecke von  $s$  dann

$$t_s = \frac{v_{\max}}{a} - \frac{s}{v_{\max}}, \quad \text{mit der maximaler Geschwindigkeit } v_{\max},$$

Beschleunigung (bzw. Verzögerung)  $a$  und Fahrstrecke  $s$ . Wird die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht, so

beträgt die Fahrzeit  $t_s = 2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}$ , mit Beschleunigung  $a$  und

Fahrstrecke  $s$ . Beide Formeln gelten sowohl für die Fahr- als auch für die Hubbewegung des Regalbediengeräts. Für eine Fahrt zwischen zwei beliebigen Punkten ist die größere der beiden Zeiten maßgebend, also  $t = \max\{t_x, t_y\}$ , mit der Zeit für die Fahrbewegung  $t_x$  und der Zeit für die Hubbewegung  $t_y$ .

Der Zeitverbrauch für ein Lastaufnahmemittel-Spiel besteht aus einer konstanten Zeit ( $t_{HS}$ ) für die Hub- und Senkbewegung des Lastaufnahmemittels und der Zeit ( $t_z$ ) für das Ein- und Zurückfahren des Lastaufnahmemittels in ein Fach der Tiefe  $z$ . Beladene Lastaufnahmemittel werden mit geringerer Geschwindigkeit und Beschleunigung betrieben als leere. Die Fahrkurve entspricht meist einer Dreiecksfahrt. Nach

[Hein07] beträgt sie  $t_z = 2 \cdot \sqrt{\frac{z}{a_z}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{z}{a_z^{bel}}}$ , wobei  $z$  die

Fachtiefe,  $a_z$  die Beschleunigung (bzw. Verzögerung) des unbeladenen Lastaufnahmemittels in  $z$ -Richtung und  $a_z^{bel}$  die des beladenen Lastaufnahmemittels in  $z$ -Richtung ist. Die Gesamtzeit lautet damit:  $t_{LAM} = t_{HS} + t_z$ .

Die Spielzeit für ein Regalbediengerät besteht neben den veränderlichen Fahrzeiten aus konstanten Zeiten vor allem für Positionierung, Platzkontrolle sowie Schalt- und Kontrollvorgängen. Diese Zeiten sind nur von den spezifischen technischen Daten des Regalbediengeräts abhängig und fallen vor jedem LAM-Spiel an; sie werden unter dem Begriff „Totzeit“ ( $t_0$ ) zusammengefasst.

Die gesamte Spielzeit setzt sich aus den Fahrzeiten für ein Regalbediengerät, den anfallenden Totzeiten und Spielzeiten für die Lastaufnahmemittel-Spiele zusammen. Exemplarisch sei dies anhand einer Einlagerung bei einem Einzelspiel in einem einfachtiefen Lager dargestellt. Diese gliedert sich grob in die folgenden Phasen, zu denen die zugehörigen Spielzeiten angegeben sind (die Indizes beziehen sich auf Betrachtungspunkte wie Start- oder Zielorte):

- Fördereinheit am Einlagerpunkt E aufnehmen ( $t_{LAM}^E + t_0$ )
- Fahrt mit der Fördereinheit vom Einlagerpunkt E zum Einlagerplatz P1 ( $t^{EP1}$ )
- Fördereinheit in ein Lagerfach einlagern ( $t_{LAM}^{P1} + t_0$ )
- Leerfahrt vom Einlagerplatz P1 zum Bereitstellplatz E ( $t^{EP1}$ )

Damit beträgt die gesamte Spielzeit:

$t_{ES} = 2 \cdot t_0 + t_{LAM}^I + t_{LAM}^E + 2 \cdot t^{EP}$ ; entsprechend wird die Spielzeit für eine Auslagerung berechnet. Es ist möglich, dass eine Einlagerung nicht durchgeführt werden kann, weil nicht für alle Behälter Stellplätze frei sind. Dann werden die Behälter bei der Einlagerbahn aufgenommen und bei der Auslagerbahn abgegeben. Dieser Vorgang wird als Durchlagerung bezeichnet.

In [Hein07] sind die Formel der Spielzeiten für Einlagerungen, Durchlagerungen und Auslagerungen für alle Varianten von doppeltiefen Lagern hergeleitet.

Wie in der Literatur üblich wurden in dieser Forschungsarbeit die mittleren Spielzeiten über die in einem Untersuchungszeitraum anfallenden Ein- und Auslagerspiele untersucht. Diese ist definiert durch

$$\bar{t}_s = \frac{1}{E + A} \cdot \sum_{i=1}^{E+A} t_{s_i}, \text{ wobei}$$

$\bar{t}_s$  die mittlere Spielzeit,  $E$  die Anzahl der Einlagerspiele,  $A$  die Anzahl der Auslagerspiele und  $t_{s_i}$  die Spielzeit für das  $i$ -te Spiel sind.

Vielerorts werden die mittleren Spielzeiten für Einzel- oder Doppelspielen nach der FEM 9.851 Richtlinie [Féd03] berechnet; ihre deutsche Pedante sind die VDI-Richtlinien VDI 3561 und VDI 4480 (VDI 3561: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen und VDI 4480: Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediengeräten). Die Anwendung dieser Richtlinie dient zum Leistungsvergleich von Regalbediengeräten. Dies erklärt ihre Beschränkung auf repräsentative Fächer. Für eine Analyse von Lagerhaltungsstrategien ist dies ungünstig, da die Definition von repräsentativ das Analyseergebnis beeinflussen dürfte. Noch gravierender ist, dass die Richtlinie nur auf einfachtiefe Lager mit einem einfachtiefen LAM, doppeltiefen Lager mit einem einfachtiefen LAM oder einfachtiefe Lager mit zwei einfachtiefen LAM anwendbar ist.

In dem Simulationssystem werden die Fahrzeiten nach den genannten Berechnungsformeln ermittelt. Im Rahmen einer repräsentativen Erhebung wurden eine hohe Anzahl an Fahrzeiten in dem Palettenlager der Goldsteig Käsereien Bayerwald GmbH erhoben und mit den nach obigen Formeln berechneten Fahrzeiten gegenübergestellt. In allen Fällen lag die Differenz unter einer Sekunde. Deswegen stimmt die Steuerung eines Regalbediengeräts in diesem Lager mit der

Simulation der Steuerung eines Regalbediengeräts in dem Modell dieses Lagers überein. Folglich ist es gerechtfertigt, die Untersuchung der Steuerung eines Regalbediengeräts an der Simulation dieser Lager durchzuführen.

#### 4 EINLAGERSTRATEGIEN

Die bisherigen Überlegungen begründen, dass der Einfluss der Steuerung von Regalbediengeräten auf die Umschlagleistung durch die Einlagerung der Fördereinheiten bestimmt ist. Für Einlagerungen wurden in der Literatur die folgenden Einlagerstrategien intensiv untersucht, die auch Gegenstand der vorliegenden Ausarbeitung sind.

1. Zufällige Einlagerung: Bei der Einlagerung nach Zufall wird für den einzulagernden Behälter irgendein freies Lagerfach ausgewählt. Es werden nur Restriktionen bezüglich Fachgröße und Gewicht berücksichtigt.
2. Einlagerung nach Zonen: Das Lager ist in Zonen eingeteilt und jeder Fördereinheit ist ein Zonenkennzeichen zugewiesen. Für die Einlagerung eines Behälters wird ein freies Fach mit dem gleichen Zonenkennzeichen ausgewählt, das sich möglichst nahe am E/A-Punkt befindet.
3. Strategie des schnellsten Nachbarn: Bei Doppelspielen wird als Einlagerfach ein Fach in der Nähe des Auslagerfachs ausgewählt, das möglichst schnell vom Auslagerfach erreichbar ist. Bei Einzelspielen wird das Fach zur Einlagerung ausgewählt, das von der Einlagerbahn aus am schnellsten erreichbar ist.
4. Kombination aus Zonen und schnellster Nachbar: Bei Einzelspielen wird nach Zonen eingelagert, während bei Doppelspielen die Strategie des schnellsten Nachbarn angewendet wird.

Die Steuerung von Regalbediengeräten durch diese Einlagerstrategien wird mit verschiedenen Arbeitspunkten simuliert, bei denen (zunächst) eine abgestimmte ABC-Behälter- & ABC-Zonen- & ABC-Ein- und Auslageraufträge-Verteilung vorliegt. Bei Simulationen, bei denen Einzelspiele oder Einzel- und Doppelspiele gefahren werden, beträgt die Anzahl der Ein- und Auslagerungen pro Durchlauf 10 mit einer Standardabweichung von 3,3. Bei reinen Doppelspielen werden die Anzahl der Ein- und Auslagerungen pro Durchlauf auf 15 erhöht und die Standardabweichung auf 0 gesetzt, damit es für jede Einlagerung auch eine Auslagerung gibt und umgekehrt. Um stabile Ergebnisse zu erzielen, darf sich die mittlere Spielzeit bei einer höheren Anzahl an Einlagerungen nur minimal verändern; eine Anzahl von ungefähr 20000 Einlagerungen erwies sich als ausreichend.

In Abbildung 4 sind die mittlere Spielzeiten für die Einlagerstrategien zufällige Einlagerung (in der Tabelle durch Zufall bezeichnet), Einlagerung nach Zonen (als Zonen eingetragen) und Strategie des schnellsten Nachbarn (durch schnellster Nachbar angegeben) in Sekunden angegeben.

Die Ergebnisse erlauben die folgenden Schlussfolgerungen:

1. Beim Anstieg des Lagerfüllgrads (von 50% auf 99%) steigen die mittlere Spielzeit bei den Einlagerstrategien nach Zonen (um 14%) und des schnellsten Nachbarn (um 25%); aber nicht so stark wie beim Lagerfüllgrad (um 98%).
2. Demgegenüber ist die mittlere Spielzeit bei der Einlagerstrategie zufällige Einlagerung quasi konstant (die Abweichung vom Minimum zum Maximum ist durch 0,2 Sekunden beschränkt); und damit unabhängig vom Lagerfüllgrad.

3. Die Strategie Zonen liefert stets die kleinsten mittleren Spielzeiten. Der Abstand nimmt gegenüber der Strategie des schnellsten Nachbarn mit zunehmenden Lagerfüllgrad zwar in absoluten Sekunden deutlich zu (von ca. 5 bis ca. 9 Sekunden; also 80%), relativ gesehen ist der Anstieg deutlich geringer (von ca. 11% bis ca. 22%). In absoluten Sekunden bleibt dieser Abstand aber stets unter dem (abnehmenden) Abstand zur Strategie der zufälligen Einlagerung.

Das Auftreten von Einzel- und Doppelspiele wird durch ein Simulationsexperiment untersucht, bei dem 30% der Einlagerungen über Einzelspiele und der Rest über Doppelspiele erfolgt. Die Ergebnisse des vorhergehenden Experiments werden bestätigt und sind in Abbildung 5 dargestellt.

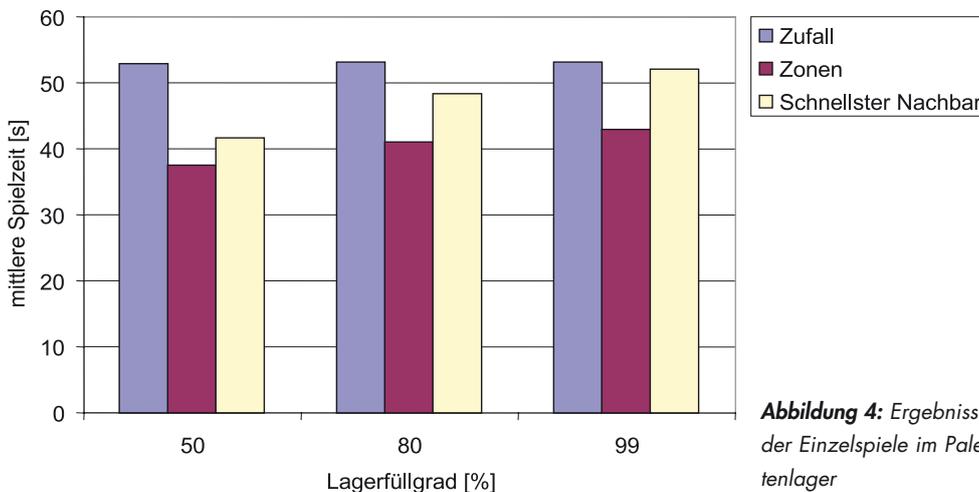


Abbildung 4: Ergebnisse der Einzelspiele im Palettenlager

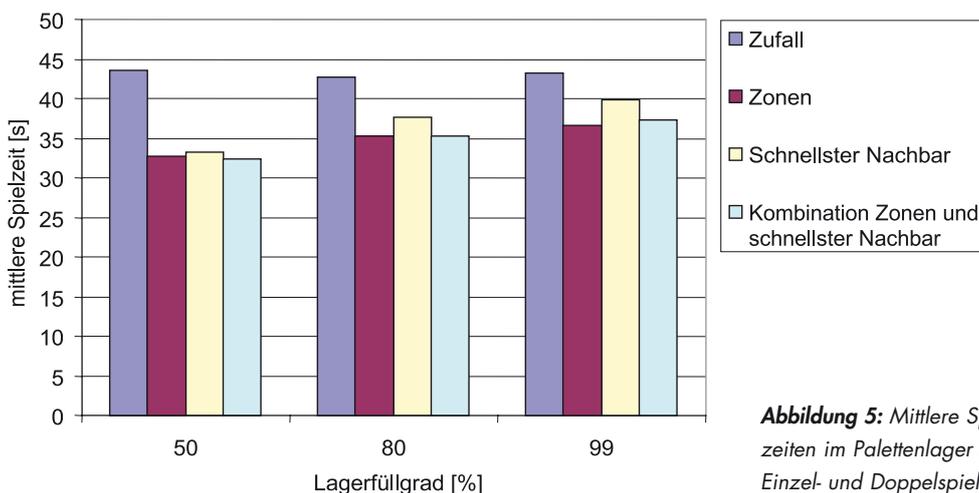


Abbildung 5: Mittlere Spielzeiten im Palettenlager bei Einzel- und Doppelspielen

Mit der Einlagerstrategie „Kombination aus Zonen und schnellster Nachbar“ können leicht verbesserte Ergebnisse bei einem geringen und einem mittleren Lagerfüllgrad erzielt werden. Beim sehr hohen Lagerfüllgrad liefert weiterhin die Einlagerstrategie nach Zonen die besten Ergebnisse.

Dies Ergebnis deutet bereits an, dass die Einlagerstrategie „Kombination aus Zonen und schnellster Nachbar“ keine bessere Alternative zur Einlagerstrategie nach Zonen darstellt. Treten nur Doppelspiele auf, so ist wiederum die Einlagerstrategie nach Zonen die beste Strategie (Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Simulation, wenn nur Doppelspiele durchgeführt werden). Auch diese Messreihe bestätigt die obigen Ergebnisse.

Bei einem Doppelspiel wird auf dem Rückweg von einer Einlagerung zur Einlagerbahn eine Auslagerung

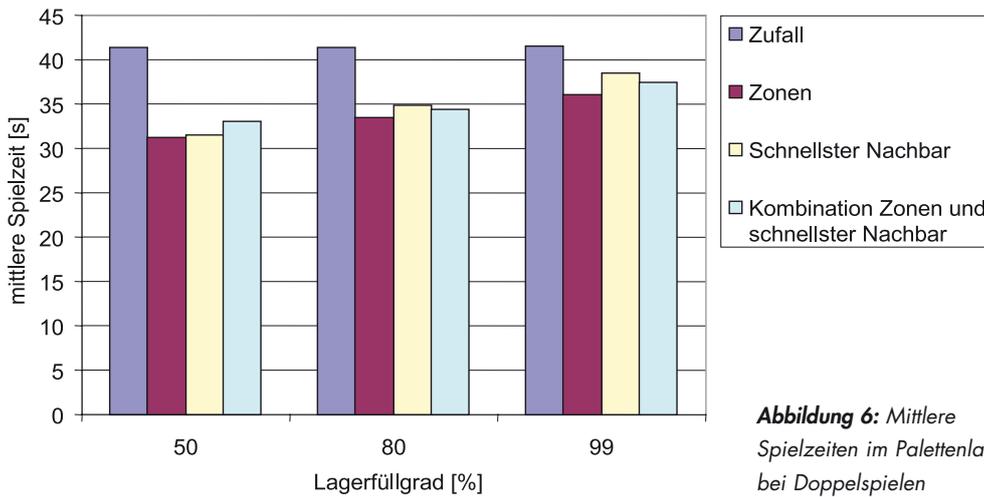


Abbildung 6: Mittlere Spielzeiten im Palettenlager bei Doppelspielen

Abbildung 7 zeigt die mittleren Spielzeiten in Sekunden bei richtig dimensionierter Zonen (Zonen ok.) und zu kleiner A-Zone (A-Zone zu klein). Bei der Strategie „Einlagerung nach Zonen“ steigt die mittlere Spielzeit generell an. Dieser Anstieg nimmt mit zunehmendem Anteil an Einzelspielen zu. Verantwortlich dafür ist eine Abnahme der Anzahl an Leerfahrten zu weit entfernten A-Behälter bei zunehmender Anzahl an Doppelspielen. Bei den

getätigt, wobei in der Regel ein Umweg in Kauf genommen werden muss. Dadurch verringert sich der Anteil an Leerfahrten. Die Simulationsexperimente zeigen eine Reduktion der mittleren Spielzeiten bei allen Strategien, sofern Ein- und Auslagerungen zu Doppelspielen kombiniert werden. Deswegen sind die auftretenden Umwege kleiner als die Fahrten für eigenständige Auslagerungen.

Bisher konnten die Zonen als richtig dimensioniert angesehen werden, da die Zonengrößen so gewählt worden sind, dass es (theoretisch) für jeden Behälter in der entsprechenden Zone einen Stellplatz gibt. Theoretisch deswegen, da durch die zufällige Anzahl an Ein- und Auslagerungen eine Zone überfüllt sein kann und deswegen in einer anderen Zone eingelagert werden muss. Hierbei handelt es sich um eine Ausnahmesituation; die in der Simulation durch die Eigenschaften einer Normalverteilung hervorgerufen wird. Ist eine Zone zu klein, so passen nicht alle Behälter mit dem gleichen Zonenkennzeichen, die sich im Lager befinden, in diese Zone.

Um einen möglichst hohen Einfluss zu bewirken, wird die wichtigste Zone, die A-Zone, im Lager verkleinert, wodurch sich die Zonen nun wie folgt verteilen: 20% der Stellplätze sind A-Stellplätze sowie je 40% der Stellplätze sind B- und C-Stellplätze. Somit ist gerade bei einem hohen Lagerfüllgrad die A-Zone zu klein und A-Behälter müssen deshalb öfters in die anderen Zonen eingelagert werden. Wiederum zur Maximierung des Einflusses wird die Simulation für einen Lagerfüllgrad von 99% durchgeführt. Diese Einstellung bewirkt, dass fast 50% der A-Behälter außerhalb der A-Zone eingelagert werden müssen.

anderen Strategien „Zufall“, „schnellster Nachbar“ und „Kombination aus Zonen und schnellster Nachbar“ liegt der absolu-

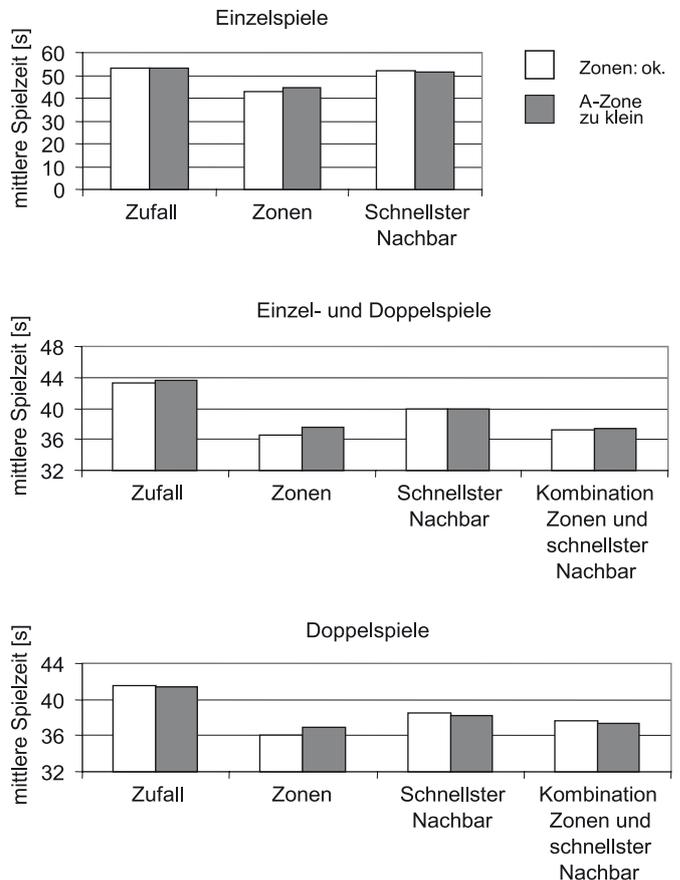


Abbildung 7: Vergleich der mittleren Spielzeiten bei veränderter Zonengröße

te Unterschied der mittleren Spielzeiten bei den verschiedenen Zoneneinteilungen stets unter einer Sekunde, weswegen die Zoneneinteilung keinen Einfluss auf die mittleren Spielzeiten dieser Strategien hat. Der zu beobachtende etwas größere Einfluss auf die Strategie „Kombination aus Zonen und schnellster Nachbar“ erklärt sich durch den erläuterten Einfluss auf die Strategie „Einlagerung nach Zonen“ und ist durch die Anzahl der Einzelspiele limitiert.

Zusammenfassend sei betont, dass die auftretenden Verschlechterungen gering sind (die mittlere Spielzeit steigt um maximal 3,6%).

Im Folgenden wird der Einfluss einer ABC-Verteilung der Ein- und Auslageraufträge (also der Transporte) auf die mittlere Spielzeit analysiert. Hierzu werden die ABC-Verteilungen

- 80% A, 15% B, 5% C
- 60% A, 20% B, 20% C
- 50% A, 25% B, 25% C

verglichen. Die ABC-Verteilung der Behälter und der Zonen ist aufeinander abgestimmt; sie beträgt bei allen Simulationsläufen 40% A, 30% B, 30% C.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse ist es ausreichend, die Einlagerstrategien nach Zonen sowie der Kombination aus Zonen und schnellster Nachbar zu untersuchen.

Die Simulationsergebnisse, die in Tabelle 1 dargestellt sind, weisen einen Anstieg der mittleren Spielzeiten bei der Strategie Zonen bei abnehmendem Anteil an A-Aufträgen (d.h. Ein- und Auslageraufträge in A-Behälter) nach; im Bereich von 10% (Doppelspiele bei einem Lagerfüllgrad von 99%) bis 20% (Einzel- und Doppelspiele bei einem Lagerfüllgrad von 50%) bei einer Verringerung des Anteils an A-Aufträgen um 37,5% und Zunahme des Anteils an C-Aufträgen um 500%. Demgegenüber ist kein Einfluss bei der Strategie „schnellster Nachbar“ nachweisbar; die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert pro Messreihe liegt zumeist unter einer Sekunde (lediglich bei zwei Messreihen treten Abweichungen von über einer Sekunde auf).

Diese Verschlechterungen bei der Strategie „Einlagerung nach Zonen“ sind in allen betrachteten Simulationsexperimenten so deutlich, dass nun die Strategie des schnellsten Nachbarn fast immer die besten Ergebnisse liefert. Wird jedoch das Regelbediengerät in einem hohen Maße nach dem Einzelspiel eingesetzt und ist der Lagerfüllgrad sehr hoch, so liegt weiterhin die bisherige Reihenfolge der Strategien vor.

Verantwortlich für diese Ergebnisse ist die Zunahme an Fahrtzeiten bei einem höheren Anteil an C-Aufträgen. Die Zonen sind immer so angeordnet, dass eine Fahrt in der A-Zone unabhängig vom Lagerfach immer eine kleinere Spielzeit liefert als eine Fahrt in die C-Zone; der Anteil an A-Aufträgen entspricht folglich dem Anteil an kurzen Fahrten und der Anteil an C-Aufträgen entspricht ebenso dem Anteil an langen Fahrten. Somit wirkt sich eine Veränderung der Anfahrhäufigkeit der Zonen (durch die ABC-Verteilung) direkt auf die mittlere Spielzeit aus.

In diesem Fall kann eine signifikante Abweichung von der abgestimmte ABC-Behälter- & ABC-Zonen- & ABC-Ein- und Auslageraufträge-Verteilung auftreten (ein Anstieg der mittleren Spielzeit um bis zu 20% ist möglich).

ABC-Verteilung	80 % A, 15 %B, 5%C					
	Zonen			Schnellster Nachbar		
Lagerfüllgrad	50%	80%	99%	50%	80%	99%
Einzelspiele	37,57	40,94	42,93	41,66	48,34	52,03
Einzel- und	32,78	35,19	36,53	33,21	37,61	39,89
Doppelspiele	31,14	33,47	36,01	31,57	34,90	38,53
ABC-Verteilung	80 % A, 15 %B, 5%C					
	Zonen			Schnellster Nachbar		
Lagerfüllgrad	50%	80%	99%	50%	80%	99%
Einzelspiele	43,53	47,11	48,17	42,10	46,30	51,98
Einzel- und	38,56	40,03	39,74	32,21	36,82	40,71
Doppelspiele	35,42	37,36	38,81	31,42	34,96	38,27
ABC-Verteilung	80 % A, 15 %B, 5%C					
	Zonen			Schnellster Nachbar		
Lagerfüllgrad	50%	80%	99%	50%	80%	99%
Einzelspiele	44,93	47,33	49,96	41,28	46,85	52,35
Einzel- und	39,19	40,21	41,64	34,06	36,03	40,03
Doppelspiele	36,82	38,63	39,73	31,38	34,91	38,36

**Tabelle 1:** Mittlere Spielzeiten bei veränderter ABC-Verteilung der Ein- und Auslageraufträge

## 5 VERGLEICH MIT DEN ERGEBNISSEN AUS DER LITERATUR

Stand der Technik der Untersuchungen in der Literatur zur Beurteilung von Einlagerstrategie sind mathematisch-analytische Vorgehensweisen; manche Arbeiten wie Fischer und Dietrich ([FiDi97]) oder Günther und Tempelmeier([GuTe03]) beschränken sich auf qualitative Aussagen. Die Spielzeiten erfolgen in der Regel nach den im Abschnitt „Kennzahlen“ erläuterten Berechnungsformeln; teilweise beruhen diese auf die in der Richtlinie FEM 9.851 ([Féd03]) (bzw. den entsprechenden oben erwähnten VDI-Richtlinien 3561 und 4480) genannten Spielzeitberechnungen und besitzen dann die oben erläuterten Schwachpunkte. In den, den Autoren dieses Beitrags bekannten Ausarbeitungen, werden Erwartungswerte für die mittleren Spielzeiten verwendet. Auf die in dem folgenden Vergleich berücksichtigten Ausarbeitungen der Literatur wird zunächst kurz eingegangen.

Seemüller ([Seem05]) entwickelte zunächst Erwartungswerte der Spielzeiten für Einzel- und Doppelspiele in Abhängigkeit von Lagerparametern wie Länge, Höhe, Wandparameter, Regalbediengerätgeschwindigkeiten, deren Herleitung der Arbeit von Arnold ([Arno95]) für ein Grundmodell und bei Erweiterungen beispielsweise der Arbeit von Gudehus folgt. Für die verschiedenen Strategien teilt er die Spielzeit in verschiedene Komponenten auf (z.B. mittlere Fahrzeit bei Einzelspielen, mittlere Fahrzeit bei Querfahrten, LAM-Spiel, mittlere einfache Fahrzeit bei Umlagerungen nach nächster Nachbar) und versieht sie mit Wahrscheinlichkeiten, die vom Lagerfüllgrad abhängen.

Gudehus ([Gude04]) leitete ebenfalls eine Formel für die Erwartungswerte der Spielzeiten her. Beim Vorliegen einer Schnellläuferzone ermittelt er ebenfalls in Abhängigkeit von Lagerparametern die mittlere Spielzeit (nach der Richtlinie FEM 9.851 ([Féd03]) für jede Lagerzone, multipliziert diese jeweils mit einem Frequenzfaktor (also wie häufig diese Zone angefahren wird) und addiert die Resultate.

Lippolt und Blunck ([LiBu00]) berechnen die mittlere Doppelspielzeit im zonierten Lager mit Hilfe von repräsentativen Fächern über Erwartungswerte für die Doppelspielzeiten im gesamten Lager sowie in einzelnen Zonen, und diese Erwartungswerte werden mit Wahrscheinlichkeiten für die Zugriffshäufigkeiten gewichtet.

Es sei angemerkt, dass eine grundsätzliche Schwäche dieser Ansätze in deren Voraussetzung liegt, nach der alle Lagerfächer

mit der gleichen Wahrscheinlichkeit angefahren werden. Der Einsatz verschiedener Einlagerstrategien, wie z.B. Zonen, führt jedoch zwangsläufig zu unterschiedlichen Anfahrwahrscheinlichkeiten der einzelnen Fächer. Liegt beispielsweise eine ABC-Verteilung von 80% A-Aufträgen (in A-Transportbehälter), 15% B-Aufträgen und 5% C-Aufträgen vor, dann werden Fächer der A-Zone häufiger angefahren, als Fächer der C-Zone. Dieser Problematik wird dadurch Rechnung getragen, dass beispielsweise mit Wahrscheinlichkeiten für die Zugriffshäufigkeit auf einzelne Zonen gerechnet wird oder, wie bei Gudehus (s. oben und [Gude04]), spezielle Berechnungsformeln für die Erwartungswerte der mittleren Spielzeiten für eine so genannte Schnellläuferzone verwendet werden.

Ferner deuten die im Abschnitt „Kennzahlen“ ausgearbeiteten Einflussfaktoren auf die Steuerung von Regalbediengeräten bereits an, dass das Testproblem bzw. ihre Abstraktion vielen zeit- und zufallsabhängigen Größen ausgesetzt sind, zwischen denen auch starke Wechselwirkungen bestehen. Mögliche mathematisch-analytische Vorgehensweisen bei der Untersuchung von Einlagerstrategien dürften daher schnell an ihre Grenzen stoßen. Wie beispielsweise bei [Seem05] begründet worden ist, ist es daher nicht möglich, alle Parameter, die die Spielzeit beeinflussen, in einem einzigen analytischen Modell zu berücksichtigen. Möglich ist dies mit der in dieser Forschungsarbeit eingesetzten Simulation.

In verschiedenen Literaturstellen wurde die Steigerung der Umschlagleistung eines zonierten Lagers gegenüber eines unzonierten Lagers untersucht. Lippolt und Blunck (s. [LiBu00]) ermittelten eine Steigerung zwischen 15 und 20 %. Nach Gudehus [Gude04] ist eine Leistungssteigerung von höchstens 15% erreichbar. Durch die Simulation wird für einfachtiefe Palettenlager deutliche höhere und genauere Steigerungen nachgewiesen, sofern die Strategie „zufällige Einlagerung“ durch die Strategie „Einlagerung nach Zonen“ ersetzt wird. Die Höhe der Steigerung nimmt bei zunehmenden Lagerfüllgrad und zunehmendem Anteil an Doppelspielen beim Einsatz des Regelbediengeräts ab. Die maximale Reduktion von 40% wird bei einem Lagerfüllgrad von 50% und dem Einsatz des Regelbediengeräts nach Einzelspielen erreicht. Die geringste Reduktion im Palettenlager von 15% tritt beim Einsatz des Regelbediengeräts nach Einzelspielen und dem höchsten Lagerfüllgrad von 50% auf. Diese optimalen Werte werden nur bei mustergültig abgestimmten Verteilungen der ABC-Behälter, ABC-Zonen sowie Ein- und Auslagerungen erreicht. Wird der Anteil an A-Behältern reduziert und der Anteil an C-Behältern erhöht, so nimmt die Leistungssteigerung, die durch die

**Prof. Dr. Frank Herrmann**

Tel.: 0941 943-1307

Fax: 0941 943-1426

frank.herrmann@informatik.fh-regensburg.de

Anwendung von Zonen erreicht werden kann, ab. Lautet die ABC-Verteilung der Behälter nun 50% A-, 25% B- und 25% C-Behälter, so beträgt die Leistungssteigerung der Strategie „Zonen“ gegenüber der Strategie Zufall bei einem Füllgrad von 50% unter Einsatz des Regelbediengeräts nach Einzelspielen nur noch 18% und sinkt auf nur noch 5% bei einem Füllgrad von 99% und dem ausschließlichen Einsatz des Regelbediengeräts nach Doppelspielen. Die Simulation bestätigt also die Leistungssteigerung durch den Einsatz von Zonen, weist aber auch nach, dass die Höhe der Leistungssteigerung von der ABC-Verteilung der Transporte, dem Lagerfüllgrad und der Bewegungsstrategie abhängt, und erlaubt die Quantifizierung der tatsächlich zu erwartenden Steigerungen.

Seemüller vergleicht in [Seem05] die Strategien „Chaotische Lagerung“, „Einlagerung nahe Auslagerung“ und „Mehrfacheinlagerung“. In seinen Berechnungsbeispielen betrachtet er ein Regalbediengerät mit 3 LAM nebeneinander. Nach Seemüller ist im einfachtiefen Lager der Durchsatz bei chaotischer Lagerung unabhängig vom Lagerfüllgrad und liegt deutlich unter dem Durchsatz der beiden anderen Strategien. Die Simulation bestätigt das Ergebnis. Sowohl in der Simulation als auch bei Seemüller liefert die Strategie Zufall (entspricht der chaotischen Lagerung bei Seemüller) immer die höchsten mittleren Spielzeiten während die mittleren Spielzeiten der anderen Strategien deutlich darunter liegen.

Die Verringerung der mittleren Spielzeit durch Anwendung von Doppelspielen, wie in der Literatur beschrieben, wird durch die Simulationsergebnisse ebenfalls bestätigt und die dafür verantwortlichen Ursachen wurden im Abschnitt „Einlagerstrategien“ analysiert. Es sei angemerkt, dass in der Literatur keine quantitativen Aussagen über die Leistungssteigerung durch den Einsatz eines Regelbediengeräts nach Doppelspielen gefunden wurden. Es fehlen ebenfalls quantitative Aussagen über die Leistungssteigerung im mehrfachtiefen Lager durch die Anwendung geeigneter Einlagerstrategien.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Mit einem, nicht näher erläuterten, Simulationssystem, können für beliebig komplexe Lagersysteme die im laufenden Betrieb eines Lagers auftretenden Einflüsse durch die Steuerung von Regalbediengeräten quantifiziert werden. Die erzielten Ergebnisse bestätigen die meisten qualitativen Ergebnisse der Literatur. Der eigentliche Vorteil liegt in den

erzielbaren quantitativen Aussagen. Durch das Simulationssystem werden für manchen Szenarien erstmalig belastbare Ergebnisse ermöglicht; z.T. werden die existierenden lediglich präzisiert.

Nach den Ergebnissen der Simulationsexperimente ist für einfachtiefe Lager die Einlagerung nach Zonen am besten ist, wenn bei den Transporten eine mustergültige ABC-Verteilung vorliegt. Ansonsten ist die Strategie schnellster Nachbar vorzuziehen. Deswegen zahlen sich Anstrengungen zum Erreichen einer ABC-Verteilung bei der Artikelstruktur, die in der Regel zur Strukturanalyse der wertmäßigen Bedeutung von Artikeln – beispielsweise zur Verteilung von Absatz- und Bestandsmengen – genutzt wird, auch hier aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die hier vorgestellte simulationsbasierte Untersuchung zur Steuerung von Regalbediengeräten einen wichtigen Beitrag für eine Nutzen-Analyse und Parametrisierung unterschiedlicher Steuerungsstrategien leisten kann. Experimente werden nun mit komplexeren Lagersystemen durchgeführt, um die Potentiale und relevanten Parameter detailliert zu erforschen.

## 7 LITERATUR

- [Arno95] Arnold, Dieter: Materialflusslehre. Vieweg Verlag, 1995.
- [FEM03] Fédération Européenne de la Manutention (FEM): Leistungsnachweis für Regalbediengeräte. 2003.
- [FiDi97] Fischer, Wolfram; Dittrich, Lothar: Materialfluss und Logistik. Springer-Verlag, 1997.
- [GuTe03] Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst: Produktion und Logistik. Springer-Verlag, 2003.
- [Gude04] Gudehus, Timm: Logistik. Springer-Verlag, 2004.
- [Hein07] Heindl, Martina: Vergleich verschiedener Einlagerstrategien mit Hilfe einer Java Simulation, Fachhochschule Regensburg, Diplomarbeit 2007.
- [LiBu00] Lippolt, Ch. R.; Blunck, S.: Zonenbildung in Hochregallagern bei beliebiger Lage der Übergabestellen am Regalrand. In: Operations Research Proceedings 2000. Springer-Verlag, 2000.
- [LiAr04] Lippolt, Christan R.; Arnold Dieter: Hochregallager mit doppelttiefer Lagerung. In: F + H Fördern und Heben (2004).
- [Seem05] Seemüller, Stefan: Durchsatzberechnung automatischer Kleinteilelager im Umfeld des elektronischen Handels, Technische Universität München, Dissertation, 2005.

## TENSION-TENSION BEHAVIOUR OF 8-STRAND ROPES

The most detailed tension-tension tests to date have been conducted with spiral strands and with 6-strand Warrington-Seale ropes. Round strand ropes had either a fibre or an independent steel wire rope core. Tension-tension tests with 8-strand ropes are not very common. The tension-tension behaviour of special wires ropes (e.g. compacted ropes, ropes with a double parallel design, ropes with a plastic coated core, etc.) are to a large extent unknown. In previous evaluations, partially conducted according to wire surface finish and wire nominal tensile grade of the rope samples, it was not determined how these parameters affect the tension-tension behaviour of the ropes. For rope selection in applications with high tension-tension loading, e.g. anchor lines, it is desirable to know the influence of different rope specifications on the tensile fatigue performance under fluctuating load. In the following an investigation is reported in which 8-strand special wire ropes of different specifications (i.e. compaction, lay configuration, wire surface, wire nominal tensile grade) have been subjected to a range of tension-tension tests. The test results were evaluated in such a way so as to highlight the influence of the different rope specifications in a clear manner. Thus, an assessment of a rope specification is possible as regards its tension-tension behaviour.

### 1 INTRODUCTION

Much less tension-tension tests were performed until now than fatigue bending tests. Therefore the tension-tension behaviour is less researched than the bending fatigue behaviour. Feyrer 2000 has collected all relevant test results of various institutes and authors. Klöpfer 2002 has updated this collection with younger test results.

In the past tension-tension cycles were evaluated un-uniformly. The main reason therefore was that no convinceable evaluation method existed which allowed the evaluation of different test results. First suggests were made by Yeung und Walton 1985 and Matsukava 1985. They reduced number of influence data by defining a equivalent rope line pull. The background of that method is a simple Goodman-Transformation. With that the authors transformed the behaviour of steel specimen to the behavior of ropes. Feyrer 1995 contradicts the Goodman method in own tests and introduces the following regression equation:

$$\lg \bar{N} = a_0 + a_1 \cdot \lg \frac{2S_a}{d^2} + a_2 \cdot \frac{S_u}{d^2} + a_3 \cdot \left( \frac{S_u}{d^2} \right)^2 + a_4 \cdot \lg d \quad (1)$$

With that equation test results can be evaluated very well.

The average number of tension-tension cycles until failure  $\bar{N}$  is a function of amplitude of rope line pull  $2S_a$ , of the lower rope line pull  $S_u$  and of the rope diameter  $d$ . In Eq. (1) the specific amplitude  $2S_a/d^2$  and the rope diameter  $d$  are logarithmic elements. The specific lower load  $S_u/d^2$  is part of equation in 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> order. The constants  $a_i$  comes out from regression calculation.

Feyrer 2000 has evaluated with his method own test results as well as a hugh number of test results of other authors separately for each rope. Also he has estimated scale effect for standard ropes. On the basis of Feyrer's method Klöpfer 2002 has made a common evaluation of own test results of various rope of same construction and results of other authors. With that he has extended the knowledge of tension-tension behaviour that ropes. In his thesis he worked with rope constructions IVRC+6x36 WS and 1x37. For these rope constructions he could estimate the scale effect reliable.

The tension-tension behaviour of special wires ropes (e.g. compacted ropes, ropes with a double parallel design, ropes with a plastic coated core, etc.) are to a large extent unknown. In previous evaluations, partially conducted according to wire surface finish and wire nominal tensile grade of the rope samples, it was not determined how these parameters affect the tension-tension behaviour of the ropes. For rope selection in applications with high tension-tension loading, e.g. anchor lines, it is desirable to know the influence of different rope specifications on the tensile fatigue performance under fluctuating load.

In the following an investigation is reported in which 8-strand special wire ropes of different specifications (i.e. compaction, lay configuration, wire surface, wire nominal tensile grade) have been subjected to a range of tension-tension tests. The test results were evaluated in such a way so as to highlight the influence of the different rope specifications in a clear manner. Thus, an assessment of a rope specification is possible as regards its tension-tension behaviour.

### 2 ROPES

The tests were performed with four different rope constructions. They are Stratolift (un-compacted Filler-rope in double parallel design), Stratoplast (un-compacted Filler-rope with plastic coated steel core), Turbolift (compacted Warrington-Seale-rope in double parallel design) and Turboplast (compacted Warrington-Seale-rope with plastic coated steel

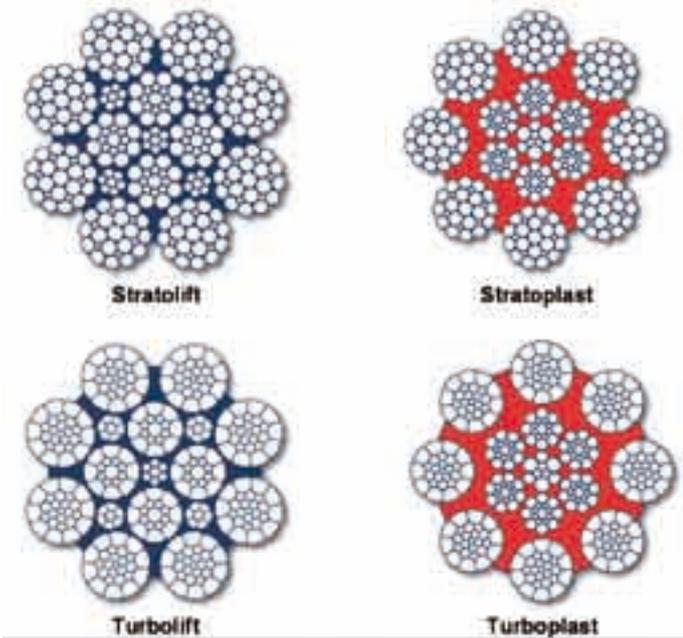


Fig. 1: rope cross sections

Rope construction	d [mm]	Ro [N/mm <sup>2</sup> ]	Wire surface	Lay	Tests
Stratolift	16	1960	bright	RHRL	14
Stratoplast	16	1960	bright	RHRL	19
Turbolift	16	1960	galvanized	RHRL	15
Turbolift	16	2160	galvanized	RHRL	17
Turbolift	14	2160	galvanized	RHRL	20
Turboplast	16	1960	galvanized	RHRL	17
Turboplast	16	1960	bright	RHRL	17
Turboplast	16	1960	bright	RHLL	19

Tab. 1: Rope specifications

core). In Figure 1 the rope cross sections are shown. The investigated ropes differ in nominal tensile grade (1960, 2160 N/mm<sup>2</sup>), wire surface (bright, galvanized), lay (regular lay, Langs lay) und in rope diameter (14, 16 mm). Tab. 1 shows the investigated rope specifications.

### 3 TESTS

Shown by Eq. (1) the number of tension-tension cycles mainly depends on the parameters lower load and amplitude. Both parameters were varied in wide ranges. The lower

loads were 2.5, 5, 10, 20, 30 and 40% und the amplitudes 25, 30, 35 und 40% of respective minimum breaking loads With eight ropes 138 tests in total were performed. A test is finished when at minimum one stand is broken.

### 4 EVALUATION

Test results were evaluated separately for each rope by Eq. (1). For each rope it leads – as expected – to a set of parabolic curves which are opened at the lower side. The correlation values are within a range of 80 to 90%. The logarithmic standard deviations are within 0.12 and 0.20.

In the diagrams of Feyrer 2000 and Klöpfer 2002 the maxima of tension-tension cycles of 6-stranded Warrington-Seale ropes are at a lower load of approx. 25% of minimum breaking load. This statement valid for all amplitudes because of used regression equation. The number of tension-tension cycles at the lower load  $S_u = 0$  is approx. 45% of respective maximum.

The lower load with the highest number of bending cycles will be calculated to

$$S_u(N_{max}) = -\frac{a_2}{2 \cdot a_3} \frac{d^2}{MBL} \quad (2)$$

$S_u$  gives the percentage of minimum breaking load if d in mm and MBL in N go into that equation. The ratio between number of tension-tension cycles at lower load of zero and maximum of number of cycles (relative number of tension-tension cycles) will be calculated to

$$\frac{N_0}{N_{max}} = 10^{\frac{a_2^2}{4 \cdot a_3}} \quad (3)$$

Regarding 8-stranded special wire ropes the maxima of number of tension-tension cycles are at lower loads between 19 und 26% of the respective minimum breaking load. The relative numbers of tension-tension cycles at the lower load zero are approx. 50% of the respective maximum.

Because of qualitative similarity of regression curves of regarded special wire ropes test results will be evaluated commonly. The regression equation is

$$\lg \bar{N} = \lg \bar{N}_0 + a_5 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} + \sum_{i=6}^9 (a_i \cdot X_i) \quad (4)$$

with  $\lg \bar{N}_0$  ... regression equation Eq., (1)  
 $R_0$  ... nominal tensile grade  
 $x_6 = 0/1$  ... 0 = bright / 1 = galvanized  
 $x_7 = 0/1$  ... 0 = regular lay / 1 = Langs lay  
 $x_8 = 0/1$  ... 0 = Strato- / 1 = Turbo-  
 $x_9 = 0/1$  ... 0 = -plast / 1 = -lift

Als a constant of scale effect the number  $a_4 = -1.43$  will be used which was found for Warrington-Seale ropes by Klöpfer 2002. The effect of nominal tensile grade will be described by the logarithmic ratio between the actual nominal tensile grade and 1770 N/mm<sup>2</sup> like Feyrer 1992 (number of bending cycles of ropes) und Briem 2000 (number of rotating bending cycles of wires) have done it. The regression variables  $X_i$  could have the value 0 or 1. Therefore the tension-tension behaviour for example of bright and galvanized ropes can be described by parallel curves or the difference of these ropes could be described by a constant factor.

Properly Turboplast- und Stratoplast- ropes cannot be compared with each other because the outer strands of Turboplast are Warrington-Seale strands but the outer strands of Stratoplast are Filler strands. Because both ropes are used in comparable applications, they will be compared in this investigation as representatives of compacted and un-compacted ropes.

Properly Lift- und Plast- ropes cannot be compared with each other too because the difference is not only plastic insert but also the whole design of the rope. The minimum breaking loads of Lift- ropes is approx. 7% higher than of the respective Plast- rope. Because both ropes are used in comparable applications, they will be compared in this investigation as representatives of ropes with and without plastic inserts.

**5 RESULTS**

The total regression gives once more a set of parabolic curves which are opened at the lower side. The correlation value is a bit more than 76%. The logarithmic standard deviation is 0.178. Data of total regression are shown in Tab. 2

Ropes	Tests	Regression constants	Correlation value	lg s
8	138	8	0.762	0.178

**Tab. 2:** Total regression

Conclusions of total regression are: the number of tension-tension cycles increase by 92% per step of nominal tensile grade. Galvanized ropes reach 87% higher number of tension-tension cycles than comparable bright ropes. Langs lay ropes reach 23% higher number of tension-tension cycles than comparable regular ropes. In opposition to that tests of standard ropes performed by Müller 1961 and evaluated by Feyrer 2002 show that regular ropes reach a littler higher number of tension-tension cycles than Langs lay ropes. Compacted (Turbo-) ropes reach 9% higher number of tension-tension cycles than uncompacted (Strato-) ropes and ropes in double parallel design (-lift) 19% higher number of tension-tension cycles than ropes with plastic inserts (-plast). The found factors are shown in Tab. 3.

	per step of nominal tensile grade	galvanized versus bright	Langs lay versus regular lay	Turbo-versus Strato-	-lift versus -plast
factor	1.92	1,87	1.23	1.09	1.19

**Tab. 3:** Factors

The factors given in Tab. 3 are first reference values only because of the low number of tests and test ropes. Nevertheless the tension-tension behaviour of different rope specifications is valueable.

The four investigated rope constructions in the same specification are compared in Fig. 2. Lower load and amplitude are related to the respective minimum breaking load. The rope with the lowest load – because of lowest minimum breaking load – leads to the highest number of tension-tension cycles. The maximum of cycles depends on the minimum breaking load only and will be reached within a range of 21 to 25% of the respective minimum breaking load. The relative number of tension-tension cycles at the lower load zero is 47%.

If ropes or rope specifications are compared for a certain load condition, the difference in minimum breaking load will be visible significantly. In Fig. 3 the four investigated ropes in the same rope specification are compared once more. Now the rope with the highest minimum breaking load reaches the highest number of tension-tension cycles. The maximum of cycles is at the same lower load for all regarded ropes. The relative number of tension-tension cycles at the lower load zero is 47% again.

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

Tel.: 0941 943-5163

Fax: 0941 943-1428

ulrich.briem@maschinenbau.fh-regensburg.de

All ropes failed by breakage of many strands or of the whole rope. The low number of broken wires at the outside is not enough to detect the rope condition as well as to detect the discard state. Klöpfer 2002 mainly reported of broken wires at the contact area between rope core and outer strands. This area is deactivated in 8-stranded special wire ropes because rope core and outer strands are parallel to each other or because of the plastic between rope core and outer strands. Therefore the numbers of tension-tension cycles are of 8-stranded special wire ropes are in a wide range significantly higher than of ropes with independent rope core. Nevertheless most of broken wires occur at the inside of the rope at the contact areas between all strands because the equivalent strain reaches the highest values.

**6 REFERENCES**

Briem 2000 – Briem, U.: Umlaufbiege-  
wechselzahl von Seildrähten. DRAHT  
3/2000, S. 73–77

Feyrer 1992 – Feyrer, K.: Einfluss der  
Drahtfestigkeit auf die Biege-  
wechselzahl von Drahtseilen. DRAHT 43  
(1992) 7/8, S. 663–666

Feyrer 1995 – Feyrer, K.: Seillebensdauer  
unter Zugschwellbelastung. OIPEEC  
Technical Meeting Stuttgart Sept.  
1995, pp. 2-1 to 2-10

Feyrer 2000 – Feyrer, K.: Wires Ropes:  
Measurement, Operation, Safety (in  
German). 2. Auflage, Berlin: Springer  
Verlag, 2000, ISBN 3-540-67829-8.

Klöpfer 2002 – Klöpfer, A.: Untersuchung  
zur Lebensdauer von zugschwell-beanspruch-  
ten Draht-  
seilen. Diss. University of Stuttgart 2002

Matsukava 1985 – Matsukava, A; Kamei, M.; Fukui, Y.  
and Sasaki, Y.: Fatigue; Resistance Analysis of Parallel  
Wire Strand Cables Based on Statistical Theory of  
Extreme. Stahlbau 54 (1985) 11, S. 326–335

Müller 1961 – Müller, H.: The properties of wire rope under  
alternating stresses.; Wire World International, Vol. 3  
No. 5 October 1961

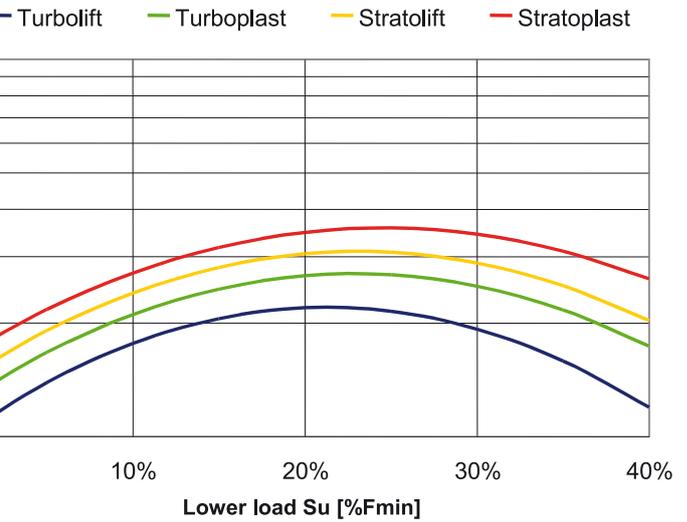


Fig. 2: number of tension-tension cycles at the same specific load

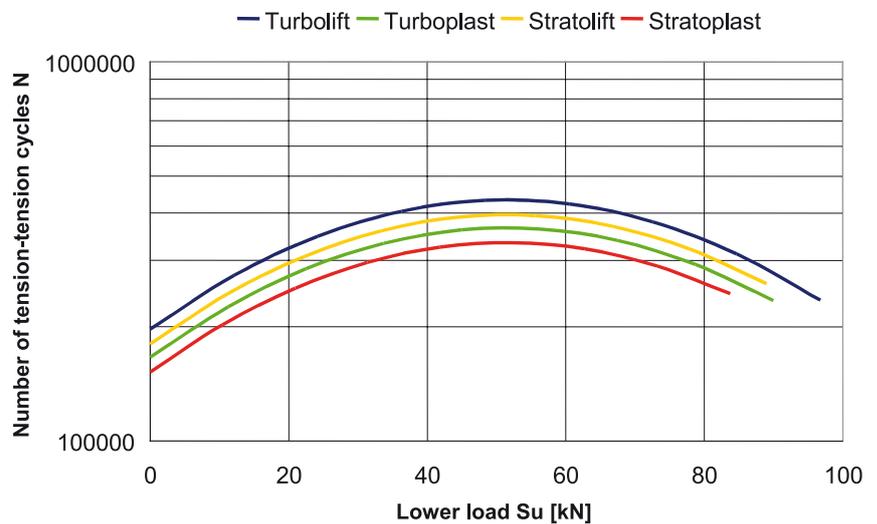


Fig. 3: number of tension-tension cycles at the same load

Yeung und Walton 1985 – Yeung, Y.T. and Walton, J.M.:  
Accelerated Block Tension; Fatigue Testing of Wire  
Ropes for Offshore Use, OIPEEC Round Table 1985,  
East Kilbride Glasgow, Scotland, pp. 2.5.1.-2.5.14

## RANDSCHICHTKONTROLLE IN FUSIONSEXPERIMENTEN DURCH DEN EINSCHUSS TIEFKALTER WASSERSTOFFPELLETS

### ZUSAMMENFASSUNG

Bisherige Untersuchungen [1] zeigen, dass in einem zukünftigen Fusionsreaktor der Energieabfluss aus dem Plasma starken zeitlichen Fluktuationen unterliegen kann. Die damit verbundene Konzentration des Energieeintrags in die Wandstruktur kann in den betroffenen Bereichen, infolge der lokalen Belastungsspitzen, zu Materialschäden führen. Ein Ansatz zur Reduzierung dieser Belastungen ist im Zusammenhang mit Experimenten zur Teilchennachfüllung entdeckt worden. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Auswirkungen starker Einzelereignisse durch eine Erhöhung ihrer Frequenz gemildert werden können. Die Frequenz wiederum kann durch den Einschuss von kleinen Pellets aus gefrorenem tiefkaltem Wasserstoff beeinflusst werden. Bislang wurden Untersuchungen mit Systemen durchgeführt, die für die Brennstoffnachfüllung ausgelegt und optimiert waren. Dadurch bedingt konnten die für die angestrebte Kontrolle des Energieflusses notwendigen Betriebsparameter nicht in vollem Umfang realisiert werden. Signifikante Verbesserungen der Untersuchungsmöglichkeiten sind durch spezielle Versuchsanordnungen erreichbar, die im Hinblick auf die Frequenzsteuerung von Einzelereignissen durch Einschuss tiefkalter Wasserstoffpellets optimiert sind. Der vorliegende Bericht beschreibt die erfolgreiche Entwicklung und Inbetriebnahme einer derartigen Versuchsanordnung. Entwickelt wurde dieses System vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Zusammenarbeit mit der Fakultät Maschinenbau der Fachhochschule Regensburg.

### 1 EINFÜHRUNG: KERNFUSION ALS POTENTIELLE ENERGIEQUELLE

Ziel der Fusionsforschung ist es, die Energieproduktion der Sonne in einem Kraftwerk auf der Erde nachzuvollziehen und aus der Verschmelzung von Atomkernen Energie zu gewinnen. Brennstoff ist ein dünnes ionisiertes Gas – ein „Plasma“ – aus den beiden Wasserstoffsorten Deuterium und Tritium. Zum Zünden des Fusionsfeuers wird der Brennstoff in einem Magnetfeldkäfig eingeschlossen und aufgeheizt. Ab einer Temperatur von 100 Millionen Grad beginnt das Plasma zu „brennen“: Die Wasserstoffkerne verschmelzen miteinander zu Helium, es werden Neutronen frei sowie große Mengen von Energie. Dass ein solches Energie lieferndes Fusionsfeuer möglich ist, soll mit 500 Megawatt erzeugter Fusionsleistung die internationale Testanlage ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) zeigen. Geplant wurde ITER mit den heute verfügbaren Materialien

und Technologien, die noch nicht vollständig für die Fusion optimiert sind. Dies ist Aufgabe eines parallelen Physik- und Technologieprogramms. Ziel der Arbeiten ist die Vorbereitung eines Demonstrationskraftwerkes.

Technische Realisierbarkeit, zu erwartende Sicherheits- und Umwelteigenschaften sowie Kosten eines künftigen Fusionskraftwerks wurden im Rahmen einer europäischen Kraftwerksstudie erörtert [2]. Aufbauend auf neuesten Ergebnissen aus Plasmaphysik, Technologie- und Materialforschung wurden verschiedene Kraftwerksmodelle entwickelt, die ein weites Spektrum physikalischer und technischer Möglichkeiten beleuchten. Deren Analyse hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Eigenschaften hat die günstigen Resultate früherer Untersuchungen bekräftigt. Demnach sind, nach heutigem Wissen, katastrophale Unfälle vom Ausmaß Tschernobyls in einem Fusionskraftwerk nicht möglich. Im Unterschied zur Kernspaltung ist eine Endlagerung der Abfallprodukte bei Rezyklierung nicht erforderlich.

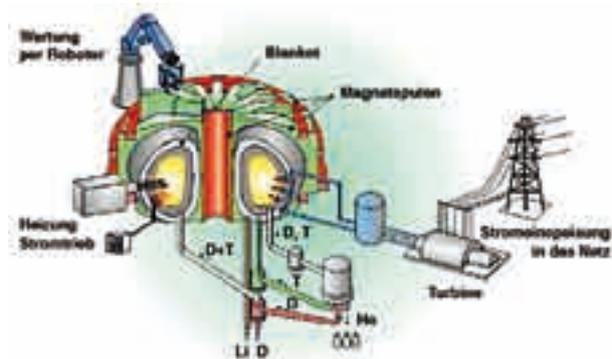


Bild 1: Schema eines Fusionskraftwerks vom Typ Tokamak

### 2 KOMPACTE REAKTORKONZEPTE UND RESULTIERENDE WANDBELASTUNG

In der Analyse zeigen sich Vorteile für eine kompakte Bauweise der Reaktoren. Mit abnehmender Reaktorgröße reichen immer kleinere Fusionsleistungen zur Erzeugung der Referenzleistung von rund 1500 Megawatt elektrischer Leistung aus, da immer weniger elektrische Leistung zur Eigenversorgung in das Kraftwerk zurückgespeist werden muss. Allerdings setzt dies auch das Erreichen und die Handhabung von immer höheren Leistungsdichten im Plasma voraus. Solche angestrebte Leistungsdichten können nur in besonderen Plasmazuständen, den sogenannten H-Mode

(Hochconfinement) Szenarien, realisiert werden. Diese Plasmazustände sind charakterisiert durch einen Bereich mit stark reduziertem Energie- und Teilchentransport an ihrem Rand. Als Konsequenz des reduzierten Randtransportes bilden sich am Plasmarand steile Gradienten der Dichte und Temperatur, wodurch Dichte und Temperatur auch im Plasmaintern stark ansteigen. Allerdings zeigt sich, dass dieser vorteilhafte Zustand dazu neigt, periodisch zu kollabieren. Randschichtinstabilitäten, als ELMs (Edge Localised Modes) bezeichnet, führen zu einem kurzzeitigen, nur wenige tausendstel Sekunden dauernden Zusammenbrechen der Randbarriere. Dadurch kommt es einem burstartigen Verlust heißer Teilchen aus dem eingeschlossenen Plasma, die auf die umgebenden Wandstrukturen treffen. Infolge der nunmehr intermittierend auftretenden Verluste kommt es zu einer starken zeitlichen und räumlichen Konzentration des Energieflusses. In seinen Leistungsspitzen kann dieser Energiefluss seinen Mittelwert bei weitem übertreffen, was kurzzeitige lokale Überlastungen der Wandstrukturen zur Folge hat. Bereits bei den größten gegenwärtigen Fusionsexperimenten werden dadurch Belastungen sehr nahe an tolerablen Grenzwerten erreicht, für ITER muss sogar mit deutlich darüber liegenden Werten gerechnet werden. Für Referenzszenarien ohne Kontrolle dieser ELMs würde dies mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer starken Erosion und einem vorzeitigen Ausfall entscheidender Wandkomponenten führen. Erfolgreicher Plasmabetrieb bei ITER mit der angestrebten kompakten Konfiguration und mit als erfolgreich und stabil erachteten Operationsszenarien setzt damit eine Milderung der ELMs zwingend voraus.

Eine erfolgversprechende Methode zur ELM Milderung konnte im Rahmen von Experimenten zur effektiven Teilchennachfüllung beobachtet werden. Wurden bei diesen Untersuchungen als Pellets bezeichnete kleine Würfel aus gefrorenem Wasserstoff-Brennstoff in ein H-Mode Plasma eingeschossen, so löste jedes einzelne von ihnen einen ELM aus. Dies bleibt auch so bei Steigerung der Pelletrate über die natürliche Frequenz der ELMs bis schließlich, bei einer Pelletrate von etwa dem 1,5 fachen der natürlichen ELM Frequenz, die ELMs vollständig von den Pellets kontrolliert werden. Wird die Pellet- und damit die ELM-Frequenz gesteigert so bleibt der gesamte durch die ELMs verursachte Energiefluss relativ unverändert – die in jedem ELM transportierte Energiemenge nimmt reziprok mit der Frequenz ab. Somit kann eine Milderung der ELM Intensität, bei ausreichend hohen Repetitionsraten, durch den Einschuss von Pellets gelingen.

So positiv die Entdeckung der ELM Milderung durch Pelletinjektion im Rahmen von Experimenten mit gänzlich anderer ursprünglicher Zielsetzung auch ist, konnten doch bislang entscheidende Untersuchungen noch nicht durchgeführt werden. Dies ist durch die technischen und physikalischen Randbedingungen der eingesetzten Pelletinjektoren bedingt, deren Operationsparameter den Erfordernissen der Teilchennachfüllung angepasst waren. Bei den Untersuchungen zur ELM Kontrolle führen die verwendeten relativ hohen Massen und Geschwindigkeiten zu einer starken Limitierung der Untersuchungsmöglichkeiten. Insbesondere kann keine ausreichend hohe Repetitionsrate erreicht werden um die für ITER vorgesehene Erhöhung der ELM Frequenz relativ zu ihrem natürlichen Wert zu demonstrieren.

Design, Entwicklung und Test von Systemen zur ELM Kontrolle und für die Untersuchungen der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse am Experiment ASDEX Upgrade ist Gegenstand der im folgenden beschriebenen Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und dem Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Regensburg.

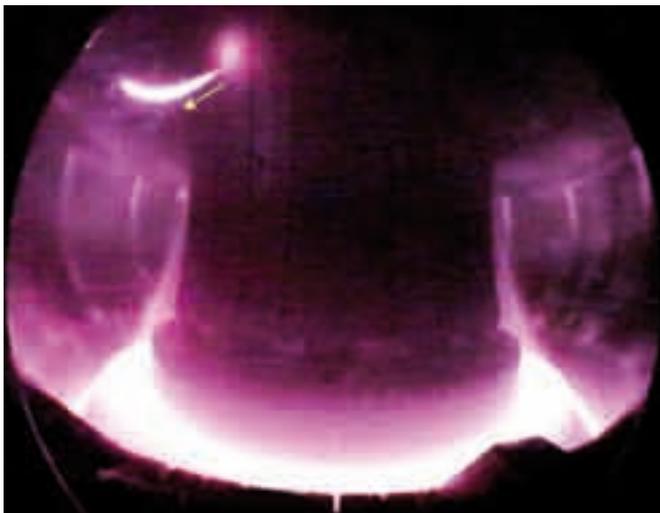
### 3 DAS EXPERIMENT ASDEX UPGRADE

Der Tokamak ASDEX Upgrade ist gegenwärtig die größte deutsche Fusionsanlage, er ging 1990 in Betrieb und untersucht Kernfragen der Fusionsforschung unter kraftwerksähnlichen Bedingungen. Dabei sind vor allem wesentliche Plasmaeigenschaften wie die Plasmadichte, der Plasmadruck und die Belastung der Wände den Verhältnissen in einem späteren Fusionskraftwerk angepasst.

Eines der Hauptprobleme ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen dem heißen Brennstoff und den umgebenen Wänden. Dabei wird einerseits die Wand der Plasmakammer beschädigt und andererseits das Plasma verunreinigt. Um dem entgegenzuwirken, untersucht ASDEX Upgrade eine spezielle Magnetfeldanordnung, einen Divertor. Der Divertor lenkt die äußere Randschicht des Plasmas auf Prallplatten ab, die Plasmateilchen treffen dort abgekühlt und vom heißen Zentrum entfernt auf und werden abgepumpt. Auf diese Weise werden auch störende Verunreinigungen aus dem Plasma entfernt, zugleich wird die Wand des Plasmagefäßes geschont und eine gute Wärmeisolation des Brennstoffs erreicht.

Gesamthöhe des Experiments	7 Meter
Großer Plasmaradius:	1,625 Meter
Kleiner Plasmaradius:	0,5 Meter
Masse des Plasmas:	3 Milligramm
Magnetfeld:	3,9 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	2 Megaampere
Heizleistung und Stromtrieb:	bis 26 Megawatt
Plasmatemperatur	50 Millionen °C
Brenndauer:	10 Sekunden

**Table 1:** Technische Daten ASDEX Upgrade



**Bild 2:** Blick in das Innere des ASDEX Upgrade während einer Plasmaentladung. Der Einschuss eines Pellets (Richtung durch Pfeil angegeben) aus festem Wasserstoff führt zu einer einem Kometen ähnelnder Verdampfungswolke.

Einen Blick in das Innere von ASDEX Upgrade zeigt Bild 2. Während einer Plasmaentladung wird ein Pellet zur Teilchennachfüllung eingeschossen und verdampft innerhalb einer tausendstel Sekunde. Das Leuchten in der charakteristischen roten Farbe des thermisch angeregten neutralen Wasserstoffs zeigt die relativ kalten (einige 10 000 Grad) Randzonen des Plasmas. Die heißen Regionen des zentralen Plasmas (einige 10 Millionen Grad) strahlen im Wellenlängenbereich der Röntgenstrahlung und bleiben daher in dieser Aufnahme dunkel. Die sehr hellen Bereiche kennzeichnen Gebiete mit starkem Teilchen- und/oder Ener-

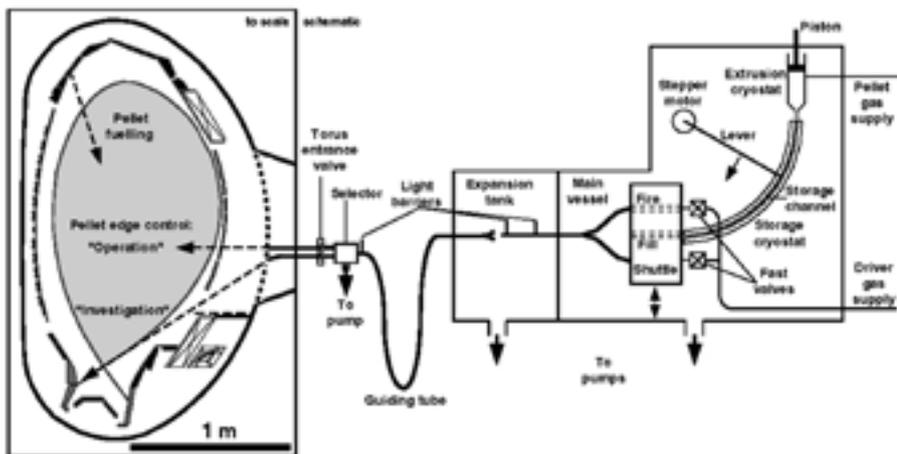
giefluss. So kann man deutlich das verdampfte Pelletmaterial im Plasma und bei der Nachfüllung aus dem Plasma verlorene und auf dem inneren Hitzeschild auftreffende Teilchen erkennen. Im unteren Teil zeigt sich die Wechselwirkung der ausfließenden Teilchen mit der Wand im trogartigem Divertor. Stärker belastete Strukturen an der äußeren Wand, wie etwa die Schutzlimiter der rechteckigen Heizantennen, treten ebenfalls deutlich hervor.

#### 4 SPEZIELLE PELLETTINJEKTOREN ZUR RANDSCHICHTKONTROLLE

Zur ELM- Kontrolle werden kleine Pellets mit moderater Geschwindigkeit aber hohe Repetitionsraten benötigt. Daher wurde ein neues, dafür adaptiertes System entwickelt. Es basiert auf dem Prinzip des Blasrohres, d.h. der Durchmesser des Projektils ist signifikant kleiner als der Durchmesser des Beschleunigungsrohres in dem das Pellet durch Reibung in einem Gasstrom beschleunigt wird („gas drag blower gun“). Dadurch wird einerseits die Handhabbarkeit kleiner Pellets erreicht, andererseits liegen die dabei erzielten Endgeschwindigkeiten reproduzierbar im gewünschten Zielbereich von wenigen hundert Metern pro Sekunde. Die Kombination von kleiner Pelletmasse und geringer Geschwindigkeit bedingt eine Teilchendeposition in lediglich randnahen Bereichen des Plasmas. Von dort können die Teilchen sehr schnell wieder aus dem Plasma herausdiffundieren und zeigen nur eine sehr geringe Effizienz in Bezug auf die Teilchennachfüllung. Der Effekt wird noch verstärkt durch den ausgelösten ELM, der charakterisiert durch den transienten Zusammenbruch der Randdiffusionsbarriere einen schnellen Teilchenverlust weiter begünstigt. In dieser Konstellation sehr ineffizient ausgelegt für ihre ursprüngliche Aufgabe der Teilchennachfüllung können Pellets nun speziell zur ELM Kontrolle verwendet werden ohne den für diesen Zweck sehr hinderlichen starken Teilcheneintrag. Dadurch wird es möglich, hohe Pelletraten zu verwenden ohne gleichzeitig einen unerwünscht starken Dichteanstieg des Plasmas hervorzurufen. Um zu solch hohen Repetitionsraten kommen zu können, wird das sequenzielle Laden und Abfeuern eines Laufes parallel für zwei Pellets in je einer separaten Magazinposition im Gegentakt durchgeführt.

#### 5 BLOWER GUN UND LEIDENFROSTPHÄNOMEN

Eine schematische Darstellung des Pelletsystems zeigt der rechte Teil der Abbildung 3. Es besteht im wesentlichen aus der Pelletquelle, der Beschleunigungseinheit (blower gun)



**Bild 3:** Schematischer Aufbau des Pelletsystems (rechter Teil) und Adaption an ASDEX Upgrade während der Experimentalkampagne 2006.

und den Führungsrohren hin zu den Diagnostikeinheiten (im Teststand) oder dem Torus wie im Bild dargestellt. Die Pelletquelle besteht aus zwei Kryostatensystemen, eines für die Extrusion und einen Vorratskryostaten. Beide werden mit flüssigen Helium gekühlt, der Verbrauch liegt dabei bei etwa 5 l/h. Jeder Kryostat besitzt eine autonome Kühl- und Temperaturkontrolle um Extrusions- und Vorratstemperatur getrennt einstellen zu können. Aus diesem Grunde sind beide Kryostaten auch räumlich separiert.

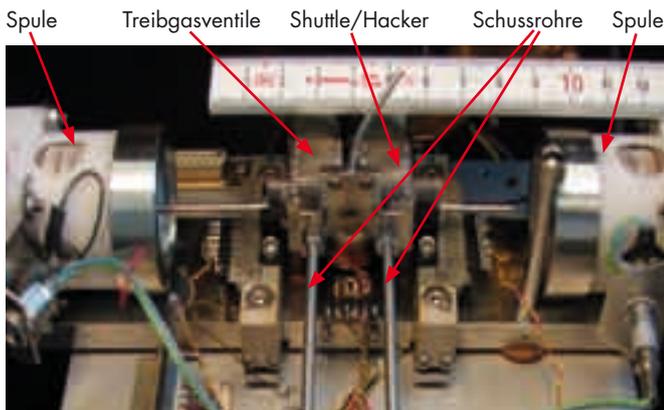
Sind beide Kryostaten auf ca. 5 K abgekühlt, wird das im Gasversorgungssystem bevorratete und in einem Reservoir in geeigneter Menge zwischengespeicherte Gas über ein Dosierventil bei ca. 1.4 bar in den Extrusionskryostaten eingelassen. Die Extrusionsdüse am unteren Ende ist dabei geschlossen. Das einströmende Gas kondensiert an den Wänden des Extrusionskryostaten zu kleinen polykristallinen Partikeln („Wasserstoffschnee“). Diese Partikel werden durch Kompression unter Einwirkung von Wärmepulsen kompaktifiziert („annealing“) und schließlich als Wasserstoffeis durch die nun geöffnete Düse extrudiert. Dies erfolgt bei einer Temperatur von etwa 15 K durch die kreisförmige Düse mit einem Durchmesser von 2 mm mechanisch durch einen Kolben (Fläche 6 mm<sup>2</sup>, Druck 14 bar), die Durchschnittsgeschwindigkeit des ausgeschobenen Eisstäbchens liegt dabei bei 1 mm/s. Eine Qualitätskontrolle des Eises erfolgt mittels Videobeobachtung im Spalt zwischen Extrusions- und Vorratskryostat. Homogenes klares Eis ist eine unverzichtbare Voraussetzung um eine ausreichende Stabilität der Pellets zu erhalten. Verunreinigungen im Eis oder eine unzureichende Verfestigung, die sich an einer dunklen Verfärbung und einer schuppigen Oberfläche erkennen lassen, führen zwangsläufig zu einer Fragmentierung der Pellets. Das Eisstäbchen

wird zur Bevorratung in den zu einem Viertelkreis gebogenen Vorratskryostaten geschoben bis die Lichtschranke am Ende des 124 mm langen Vorratsschachtes vollständige Füllung anzeigt. Im Vorratskryostaten kann das Eis bei einer Temperatur von ca. 5 K bis zu einer Stunde ohne signifikanten Massen- und Qualitätsverlust gehalten werden. Um das Eis zur Pelletproduktion verwenden zu können, wird der Vorratskryostat auf eine Temperatur von ca. 18 K gebracht. Dies kann nur unmittelbar vor einer Anforderung von Pellets erfolgen, da bei diesen Temperaturen nahe dem Tripelpunkt des verwendeten Wasserstoffisotops Deuterium das Eisreservoir binnen weniger Minuten ins umgebende Vakuum verdampft.

Wird nun ein Pellet aus der Quelle benötigt, wird das Stäbchen mittels eines durch einen Schrittmotor angetriebenen mechanischen Arms bis zur gewünschten Länge ausgeschoben. In den hier beschriebenen Experimenten war diese Länge auf 1 mm festgesetzt. Bei der Anordnung als Pelletquelle für die blower gun wird das Eisstäbchen direkt in eines der beiden Magazinpositionen des Shuttles geschoben. Das Shuttle stellt die zentrale Einheit zum Abschneiden und Beschleunigen der Pellets und damit das Herzstück des Injektorsystems dar. Seine Funktionsweise ist anhand der schematischen Darstellung (Bild 3) erkennbar. Durch die beiden Magazinpositionen und den zwei zugehörigen Beschleunigungsstrecken können Nachladen und Abfeuern gleichzeitig erfolgen. Ist die Magazinposition vor dem Extrusionskryostat gefüllt, wird das Shuttle in seine Alternativposition gefahren. Dabei wird ein Pellet der gewünschten Größe vom Eisstäbchen abgeschnitten und verbleibt im Magazin. Die gefüllte Magazinposition wird nun so zwischen einem schnellen Gasventil und der zugehörigen Beschleunigungsstrecke positioniert dass es den Lauf der blower gun kom-

plettiert und mit dem Öffnen des Ventil beschleunigt werden kann. Gleichzeitig wird dabei die andere Magazinposition wieder gefüllt.

Das in Bild 4 gezeigte Shuttle besteht aus einem Aluminiumrahmen mit einem Einschluss von Vespel®. Es ist auf einem Schlitten montiert und wird bewegt von zwei an seinem Ende positionierten Spulen, die jeweils im Gegentakt schieben bzw. ziehen. Zur exakten Fixierung in den beiden Schusspositionen und um starkes Prellen zu unterbinden befinden sich an den Kopfenden zusätzliche Inlays aus Neodym-Permanentmagneten.



**Bild 4:** Photo der Einheit zum Abschneiden und Beschleunigen der Pellets („Shuttle“)

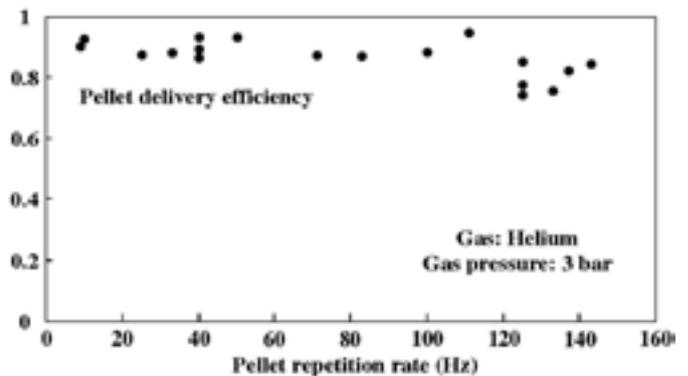
Da die Verweilzeit eines Pellets im Magazin bis zu einigen hundert ms betragen kann, muss das Shuttle gekühlt werden um Verdampfung und Beschädigungen des Pellets auszuschließen. Eine zu starke Abkühlung jedoch wirkt sich ungünstig auf die gleichmäßige und präzise Bewegung des Shuttles aus. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Shuttletemperatur von ca. 85 K erzielt. Bei dieser Temperatur kann eine reproduzierbare und gleichmäßige Qualität der beschleunigten Pellets erreicht werden ohne nennenswerte Massenverluste und/oder Zerstörungsraten in Kauf nehmen zu müssen.

Die Möglichkeit Pellets für einige Zeit unbeschadet in einem Magazin zu bevorraten dessen Temperatur weit jenseits der Verdampfungstemperatur von Wasserstoff liegt ergibt sich durch den Leidenfrost-Effekt. Dieser nach seinem Entdecker, dem Deutschen Wissenschaftler J.G. Leidenfrost (1715-1794) benannte Effekt bezeichnet das Schweben und Bestehen eines kalten Körpers über einer heißen Oberfläche. Dieses Verhalten rührt her von der Ausbildung einer

isolierenden Gasschicht zwischen Körper und Oberfläche und wurde erstmals erkannt bei über einer heißen Herdplatte schwebenden und nur sehr langsam verdampfenden Wassertropfen. Im hier vorliegenden Fall verhindert die sich um das Pellet herum ausbildende Wasserstoffgaswolke einen starken Wärmefluss von den umgebenden Wänden in das Pellet hinein und dämpfen die bei der Beschleunigung im und aus dem Shuttle auftretenden Beschleunigungen. Da dieser Effekt das angewandte Konzept erst ermöglicht, wird dieser Typ eines Pelletinjektors oft auch als Leidenfrost-Kanone bezeichnet.

**6 RESULTATE AUS DEM TESTSTAND**

Um das System zu testen, charakterisieren und auch optimieren zu können wurde es zunächst in einem Teststand betrieben. Als charakteristische Pelletparameter wurden gemessen: Pelletmasse  $m_P$ , Pelletgeschwindigkeit  $v_P$ , sowie die Verlässlichkeit der Pelletinjektion (intakt gelieferte Pellets/Anzahl Anforderungen). Vorgegeben wurden Repetitionsrate der Injektion sowie Spezies und Druck des zur Beschleunigung verwendeten Treibgases. Zur Verwendung kamen hier die Wasserstoffisotope Protium (Massezahl 1) und Deuterium (Massezahl 2) sowie das Edelgas Helium. Der Wert von  $v_P$  wurde aus einer Flugzeitmessung zwischen zwei direkt nach der Beschleunigungsstrecke installierten Lichtschranken bestimmt. Diese Lichtschranken lösen beim vorbeifliegen eines Pellet zusätzlich einen Laserblitz aus um sein Schattenbild auf einer CCD-Kamera aufzunehmen. Eine Methode der Massenbestimmung besteht im Vermessen und Vergleichen dieser Pelletfotos. Eine Referenz und Kontrollmessung ergibt sich durch den vom Pelletmaterial hervor-



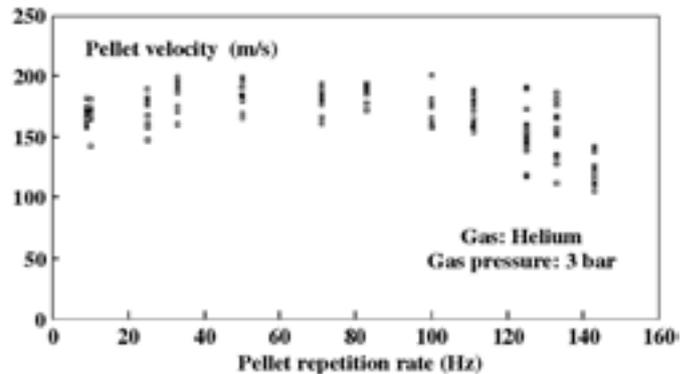
**Bild 5:** Verlässlichkeit der Pelletinjektion bei verschiedenen vorgegebenen Repetitionsraten, als Treibgas wurde hier Helium mit einem Druck von 3 bar verwendet.

gerufenen Druckanstieg in einen Kesselvolumen bekannter Größe. Dazu werden die Pellets auf einen Metallblock im Kessel gelenkt und dabei zerstört/verdampft. Ein akustischer Detektor im Metallblock registriert den Einschlag, Signalamplitude und -verlauf erlauben dabei Rückschlüsse auf Masse und Zustand (intakt, fragmentiert). Aus diesen Daten konnte auch die Verlässlichkeit der Pelletinjektion bestimmt werden.

Die Verlässlichkeit der Pelletinjektion bei verschiedenen vorgegebenen Repatitionsraten ist in Bild 5 gezeigt. In diesen Fall wurde als Treibgas Helium bei einem Druck von 3 bar verwendet. Das Ergebnis hängt aber nicht wesentlich von diesem Parameter ab. Es zeigt sich eine hohe Rate intakt beschleunigter Pellets bis zu Raten von 100 Hz, darüber sinkt die Verlässlichkeit (und auch die Qualität) der Pellets leicht ab. Oberhalb 143 Hz (Taktrate 7 ms) können reproduzierbar keine brauchbaren Pelletsequenzen mehr erzeugt werden. Die Ursache dieses Verhaltens erschließt sich beim Vergleich mit Bild 6, das die Geschwindigkeit der entsprechenden Pellets darstellt. Korreliert mit dem leichten Absinken der Verlässlichkeit oberhalb von 100 Hz sinkt auch die Geschwindigkeit der Pellets ab. Dies resultiert aus der zwangsläufig kurzen Öffnungszeit des Beschleunigungsventils. Da Verschiebung und Fixierung des Shuttels in einer Schussposition bereits einige ms benötigt, bleiben nur noch wenige ms für Beschleunigung und Nachfüllung. Für Taktzeiten von weniger als 10 ms beginnt bereits der nächste Zyklus und damit das Verschieben des Shuttles bevor der gesamte Treibgassatz das schnelle Ventil passiert hat. Eine unvollkommene und in ihrer Endphase damit unkontrollierte Pelletbeschleunigung führt zum beobachteten Absinken von Geschwindigkeit und Verlässlichkeit. Bei Zykluszeiten von weniger als 7 ms ist eine erfolgreiche Nachfüllung des Magazins nicht mehr möglich, das Pellet wird beim Abschneidevorgang zerstört.

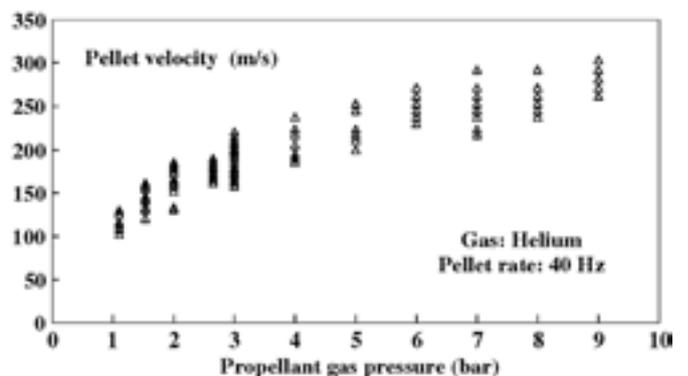
Verlässliche Betrieb des Injektors im gewünschten Parameterbereichen konnte bis zu 100 Hz demonstriert werden. Bei Raten bis zu 143 Hz ergeben sich geringe Einschränkungen. Damit übertrifft der neue Injektor das bislang verfügbare, zur Nachfüllung entwickelte System deutlich. Bei diesem konnte verlässlicher Betrieb bis ca. 60 Hz, eingeschränkter bis ca. 80 Hz erreicht werden. Der mit dem neuen System erweiterte Operationsbereich kommt zukünftigen Experimenten zur ELM Kontrolle zugute.

Der neben der höheren Repetitionsrate zweite entscheidende Vorteil der Leidenfrost-Kanone liegt in der niedrigen Geschwindigkeit der Pellets. Eine Einstellung der Pelletge-



**Bild 6:** Geschwindigkeit einzelner Pellets für die in Bild 5 gezeigten Sequenzen.

schwindigkeit kann dabei durch den Druck des Treibgases vorgenommen werden. Ein Beispiel dazu ist in Bild 7 gezeigt. Bei der Verwendung von Helium als Treibgas kann die Pelletgeschwindigkeit im Bereich von 100 bis 300 m/s eingestellt werden. Durch Verwendung anderer Treibgase lässt sich dieser Bereich aber sowohl nach oben als auch unten erweitern. Für den avisierten Einsatz jedoch besteht dafür keine Notwendigkeit. Höhere Pelletgeschwindigkeiten werden einerseits vom Nachfüllsystem abgedeckt und sind andererseits zur ELM-Kontrolle eher von Nachteil. Geringere Pelletgeschwindigkeiten lassen sich technisch bereits kaum mehr sinnvoll einsetzen. Das liegt vor allem am Rückstoß auf das Pellet durch die verbleibende Ablation. Bei geringen Geschwindigkeiten führt dies zu einer unkontrollierten Bewegung des Pellets und starker räumlicher Streuung der Pelletflugbahnen. Darüber hinaus bedingt der Ansatz zur ELM Kontrolle eine maximale Reaktionszeit des Injektionssystems.



**Bild 7:** Geschwindigkeit einzelner Pellets für verschiedene Treibgasdrücke.

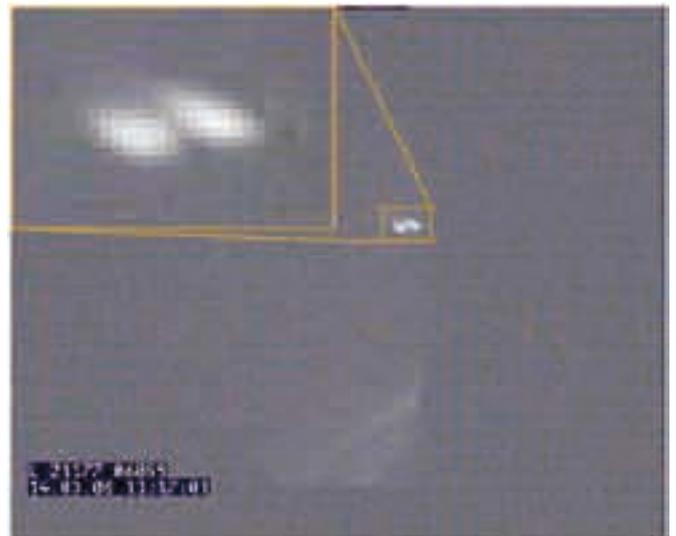
Diese würde bei zu geringer Geschwindigkeit und damit zu langer Flugzeit des Pellets im Transfersystem schließlich überschritten. Da die im Teststand erreichten Operationsparameter somit dem geplanten Einsatz adäquat waren, konnte das System an das Experiment ASDEX Upgrade gebracht und dort integriert werden.

**7 EINSATZ AM EXPERIMENT**

Die Konfiguration des an ASDEX Upgrade integrierten Pelletsystems wie es während der Experimentkampagne 2006 verwendet wurde ist in Bild 3 gezeigt. Ein Photo der Anlage montiert in der Peripherie des Tokamaks zeigt Bild 8. Da das System erst gegen Ende der Kampagne installiert wurde, konnten nur noch wenige Tests durchgeführt werden. Erfolgreich demonstriert wurde dabei die Integration in das Kontroll- und Sicherheitssystem von ASDEX Upgrade und der Einschuss einiger Pellets entlang der horizontalen Flugbahn.



**Bild 8:** Leidenfrost-Kanone und zugehöriges Pumpsystem installiert an ASDEX Upgrade.



**Bild 9:** Videobild (Integrationszeit 20 ms) mit zwei Pelletablationspfeilen, der vergrößerte Ausschnitt zeigt Ablationswolken wie sie für intakte Pellets charakteristisch sind.

Ein Beispiel dafür zeigt Bild 9. Hier wurde mit einer konventionellen Videobeobachtung der Pelleteinschuss beobachtet. Das gezeigte Bild ist ein Halbbild aus einer Videosequenz und hatte eine Belichtungszeit von 20 ms. Da zu diesem Zeitpunkt Pellets mit 100 Hz Repetitionsrate eingeschossen wurden sind dementsprechend auch zwei Pellets auf der Aufnahme zu finden. Die zigarrenförmigen Formen beider Ablationswolken (vergrößerter Ausschnitt) sowie auch die gemessenen Eindringtiefen und der durch die Pellets hervorgerufenen Dichtererhöhungen im Plasma weisen auf ihre intakte Konsistenz hin.

**8 AUSBLICK**

Für den Einsatz an ASDEX Upgrade während der Experimentphase wird das System von Beginn an zur Verfügung stehen. Dabei soll es dezidiert verwendet werden zur Kontrolle der ELM Frequenz und für Untersuchungen der dabei zugrunde liegenden Physik. In einem ersten Schritt ist die Injektion in horizontaler Richtung mittels der entsprechenden Führungsrohre geplant. Hierbei wird vor allem auf hohe Verfügbarkeit und Verlässlichkeit Wert gelegt. Des Weiteren soll Gebrauch gemacht werden von der Option des Einschusses mit einem gegenüber der Horizontalen geneigten Pfad. Hierbei wird das Pellet die Plasmarandschicht tangential durchqueren. Bezogen auf die radiale Plasmaachse wird das Pellet dabei eine

**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kauke**

Tel.: 0941 943-5158

Fax: 0941 943-1428

gerhard.kauke@maschinenbau.fh-regensburg.de

geringe bis verschwindende Geschwindigkeitskomponente aufweisen und als Konsequenz relativ zu diesem Parameter eine hohe räumliche Auflösung erzielen. Da für die geplanten Anwendungen mit maximaler Pelletrepetition die erwarteten Nachfülleffekte noch immer eine Analyse beeinträchtigen werden, ist eine weitere Reduktion der Pelletgröße geplant. Allerdings sind solche Wasserstoffpellets mit Dimensionen im sub-mm Bereich technisch nur sehr schwer zu handhaben. Dies resultiert aus dem immer größer und damit ungünstiger werdendem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (entspricht etwa dem Verhältnis Verlustrate/Wärmekapazität) und einer damit stark abnehmenden Stabilität der Pellets.

**REFERENZEN UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR**

- [1] F. Federici, "Assessment of erosion of the ITER divertor targets during type I ELMs", in "Plasma Physics Controlled Fusion", Band 45 (2003), Seite 1523 ff.
- [2] „A conceptual study of commercial fusion power plants“; final report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)

*Einführung in die Fusionsforschung:*

„Kernfusion – Berichte aus der Forschung“, Download unter <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/>

*Christian Dorner*

„Inbetriebnahme und Charakterisierung der Leidenfrost Gaskanone beim Testbetrieb am Fusionsexperiment ASDEX Upgrade“

Diplomarbeit an der Fachhochschule Regensburg (Studiengang Maschinenbau), IPP Report 1/336 (Juli 2006)

*Christian Wittmann*

„Installation und Inbetriebnahme eines Führungsrohrsystems für den repetierenden Einschuss fester Deuterium-Pellets zur Teilchennachfüllung in das Fusionsexperiment ASDEX Upgrade“

Diplomarbeit an der Fachhochschule Regensburg (Studiengang Maschinenbau, Oktober 2001)

*P.T. Lang, P. Cierpka, S. Kalvin, G. Kocsis, T. Szepesi, C. Wittmann*

(Vorgetragen von C. Dorner)

„Ein Hochfrequenz Pellet Injektor zur Kontrolle der ELM-Aktivität in Fusionsplasmen“

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Augsburg 2006, P 4.7.

*P.T. Lang, P. Cierpka, J. Harhausen, M. Kaufmann, J. Neuhauser, C. Wittmann, ASDEX Upgrade Team, G. Kocsis, J. Sarközi, T. Szepesi, C. Dorner, G. Kauke*

„A pellet launcher tool optimized for the control of edge localized modes in ASDEX Upgrade H-mode plasmas“  
24th SOFT, Warsaw, 11.-15.9.2006, P2-C-310; Proceedings in "Fusion Engineering and Design", im Druck

*P.T. Lang, P. Cierpka, J. Harhausen, J. Neuhauser, C. Wittmann, ASDEX Upgrade Team, K. Gal, S. Kalvin, G. Kocsis, J. Sarközi, T. Szepesi, C. Dorner, G. Kauke*

„Cryogenic pellet launcher adapted for controlling of tokamak plasma edge instabilities“  
Rev. Sci. Instrum., vol. 78, 023504 (2007).

## SYSTEMTECHNISCHE OPTIMIERUNG DER SELEKTIVEN KATALYTISCHEN REDUKTION (SCR) VON STICKOXIDEN FÜR DEN EINSATZ IN KRAFTFAHRZEUGEN: ENTWICKLUNG NEUER ANALYSEMETHODEN

### 1 MOTIVATION FÜR DEN EINSATZ DER SCR-TECHNOLOGIE BEI PKW UND LKW

#### 1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Bei der Entwicklung von Otto- und Dieselmotoren stehen derzeit große Herausforderungen an: bei Ottomotoren ist das Ziel die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei verbesserten Fahrleistungen, die Dieselmotoren sehen sich mit den verschärften Abgasemissionsgrenzwertstufen Euro5 und Euro6 für Partikel- und NO<sub>x</sub>-Emissionen konfrontiert.

Beim Ottomotor bietet die Benzindirekteinspritzung in Verbindung mit Schichtladeverfahren in Kombination mit Abgasurboaufladung bei gleichzeitigem Downsizing des Grundmotors großes Kraftstoffverbrauchsreduktions-Potenzial. Zur Abgasnachbehandlung während des verbrauchsgünstigen Schichtladebetriebes ist für die Reduktion der Stickoxide (NO<sub>x</sub>) ein neues Verfahren erforderlich, da wegen des mageren Gemisches keine NO<sub>x</sub>-Reduktion über den Dreiwegekatalysator möglich ist.

Beim Dieselmotor versucht man einerseits durch innermotorische Maßnahmen wie z.B. durch Homogenisierung des Gemisches die Rohemissionen von Partikel und NO<sub>x</sub> zu reduzieren. Jedoch kann zur Zeit davon ausgegangen werden, dass für Euro6 im Jahr 2014 beim Dieselmotor neben dem Partikelfilter noch eine Abgasnachbehandlungstechnik zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung benötigt wird.

Sowohl bei Otto- und Dieselmotoren befindet sich derzeit das SCR-System zur Reduktion der Stickoxide im mageren Abgas in Entwicklung.

#### 1.2 Einsatz der SCR-Technologie – Rückblick und Ausblick

Seit Beginn der 1980er Jahre wird in Europa zur Entstickung von Abgasen fossil befeuerter Kraftwerke auch das sog. SCR-Verfahren eingesetzt (Selective Catalytic Reduction). Bei diesem Verfahren werden an einem katalytisch aktiven Kontakt die Stickoxide (NO<sub>x</sub>) des Abgases mit dem Reduktionsmittel Ammoniak (NH<sub>3</sub>), das zusätzlich eingedüst wird, in Verbindung gebracht und zu unschädlichem Wasser (H<sub>2</sub>O) und Stickstoff (N<sub>2</sub>) umgesetzt. Im Kraftwerksbereich sind dadurch NO<sub>x</sub>-Verminderungsraten von 95 % möglich [Eid97].

Der wesentliche Vorteil des SCR-Systems liegt darin, dass die NO<sub>x</sub>-Reduktion mit dem Reduktionsmittel Ammoniak in Gegenwart von Sauerstoff erfolgen kann (im Gegensatz zum bekannten Verfahren mit Dreiwegekatalysator und Lambda-1-Regelung).

Bereits 1991 schlossen sich im Hinblick auf die Diskussionen um zukünftige Emissionsgrenzwerte insbesondere der NO<sub>x</sub>-Emissionen für Lkw-Dieselmotoren die Nutzfahrzeughersteller MAN Nutzfahrzeuge AG, Mercedes-Benz AG und Iveco Motorenforschung AG unter der Systemführerschaft der Siemens AG zu einem Konsortium zusammen, um gemeinsam das aus dem Kraftwerksbereich bekannte SCR-System für einen mobilen Einsatz unter dem Namen „SINOx“ zu entwickeln. Als Ammoniakquelle fungiert dabei eine 32,5 %ige wässrige Harnstofflösung, die in einem Thermo-Hydrolyse-Prozess das Reduktionsmittel Ammoniak bereitstellt [Frä97].

Neben diesem Lkw-System wurde von der Siemens AG ein für Pkw taugliches System entwickelt. Wesentliches Merkmal dabei war, dass auf die Druckluftunterstützung zur Zerstäubung der wässrigen Harnstofflösung verzichtet wurde [Tos96]. Mit mehreren Fahrzeugen konnte gezeigt werden, dass mit diesem System NO<sub>x</sub>-Reduktionsraten im MVEG-Testzyklus von bis zu 65 % möglich waren und damit die Euro4-Emissionsgrenzwerte für NO<sub>x</sub> (bei Euro3-zertifizierten Fahrzeugen) erfüllt werden konnten. Der Einsatz bei mager betriebenen Ottomotoren war ebenso bereits Gegenstand der Untersuchungen [Rab99].

Seit 2006 sind nun erste Lkw in Serie (z.B. MAN, Mercedes-Benz, Volvo), die bereits heute die ab 2009 gültige Abgasgesetzgebungsstufe Euro5 erfüllen. Gerade für Spediteure sind diese Fahrzeuge wirtschaftlich interessant, da die eingesetzten Motoren im Kraftstoffverbrauch optimiert sind und in vielen europäischen Ländern staatliche Vergünstigungen existieren, wie beispielsweise bei der deutschen Lkw-Maut.

Auch bei Pkw wird über einen Einsatz der SCR-Technologie diskutiert. Beispielsweise hat die DaimlerChrysler AG angekündigt, im Jahr 2008 bereits ein Modell mit dem „Bluetec“ genannten SCR-System in Europa und USA anzubieten. Weitere Modelle sollen vor allem zuerst in den USA eingeführt werden.

### 2 SCR-GRUNDLAGEN

#### 2.1 Stand der Technik: Systemübersicht und Funktionsweise

Die Abbildung 1 zeigt das bereits 1996 für Pkw vorgestellte SINOx-System, das die Basis darstellt für weitere Entwicklungsschritte. Die wesentlichen Komponenten sind

- SCR-Katalysator
- Dosiersystem für wässrige Harnstofflösung
- Bevorratungssystem für wässrige Harnstofflösung
- Elektronisches Steuergerät

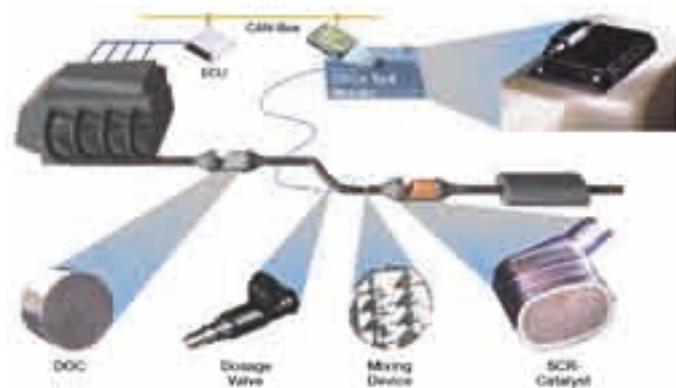


Abbildung 1: SCR-System am Beispiel des SINOx-Systems

Stromauf des SCR-Katalysators wird mittels eines Dosierventils die wässrige Harnstofflösung unmittelbar in das Abgas eingespritzt. Die Berechnung der eingespritzten Reduktionsmittelmenge erfolgt dabei in einem elektronischen Steuergerät unter Berücksichtigung wichtiger Parameter wie NO<sub>x</sub>-Konzentration und Katalysatorwirkungsgrad. Die Regelung des Einspritzdruckes, die Erkennung des Tankfüllstandes und die Selbstdiagnose sind weitere Aufgaben des Steuergerätes.

## 2.2 Festlegung der verfahrenstechnischen Teilschritte

### 2.2.1 Dispergierung des Reduktionsmittels

Es hat sich gezeigt, dass zur Erzielung höchster Umsatzraten gerade die Dosierung und die Aufbereitung der wässrigen Harnstofflösung von entscheidender Bedeutung sind. Um das Optimierungspotenzial zu identifizieren, wird der bisherige Gesamtprozess aufgebrochen und in eine allgemeine Funktionsstruktur zerlegt. Somit werden vier charakteristische Teilschritte für den bisher global als „Dispergierung des Reduktionsmittels“ bezeichneten Prozess erkennbar:

- Dosieren
- Zerstäuben
- Verdampfen und Thermo-Hydrolyse
- Mischen

Einen detaillierten Blick auf die physikalisch/chemische Ebene der verfahrenstechnischen Teilschritte ermöglicht die folgende Abbildung 2.

Darauf basierend können Anforderungen, Randbedingungen und Qualitätsmerkmale in einem systematischen Requirements Engineering Prozess ermittelt werden.

Mit Festlegung der physikalisch/chemischen Ebene kann die Bauartebene abgeleitet werden. Eine Zuordnung der Mög-

lichkeiten auf Bauartebene zu den verfahrenstechnischen Teilschritten ist in der Abbildung 3 zu erkennen.

- **Dosieren**
  - ⇒ Einbringen von Flüssigkeit in Abgas (Druckdifferenz)
  - ⇒ Dosiermenge: max. 1000 ml/h (für 330 g NO/h)
  - ⇒ Dosierdynamik für "kontinuierliche" Dosierung: max. 250 ml/(h s)
- **Zerstäuben (Flüssigphase in Gasphase, diskontinuierlich)**
  - ⇒ Erzeugung von kleinen Flüssigkeitströpfchen (Oberflächenspannung)
  - ⇒ Zerstäubungsgüte (Tropfengröße, -verteilung)
  - ⇒ Spraygeometrie
- **Verdampfen**
  - ⇒ Verdampfen der Flüssigkeitströpfchen (Stoff-, Wärmeübergang)
  - ⇒ Verdampfungsgüte, Verdampfungsgeschwindigkeit (Verweilzeit, Dosierdynamik, Verdampfungstemperatur, Tropfengröße)
- **Mischen von liquid in gas bzw. gas in gas**
  - ⇒ Verteilen über Rohrquerschnitt gemäß Mischgüteeanforderung
  - ⇒ Ausgleich der Dichteunterschiede durch Diffusion und Turbulenz
- **Thermo-Hydrolyse**
  - ⇒ Erzeugung von Ammoniak
  - ⇒ Abgastemperatur, Wasserdampf, Verweilzeit

Abbildung 2: Festlegung der verfahrenstechnischen Teilschritte auf der physikalisch/chemischen Ebene

- ◆ **Dosieren (Zumessen)**
  - elektromagnetisches Dosierventil
- ◆ **Zerstäuben (Flüssigphase in Gasphase)**
  - Primärzerfall: Druck-, Fliehkraft-, Drall-, Ultraschall-, Elektrostatik-Zerstäuber
  - Sekundärzerfall: Drall-, Turbulenzerzeugung durch Einbauten
- ◆ **Verdampfen**
  - an Kontaktelementen: elektr. Heizung, Heizkat, uncoated Oxi-Kat
  - ohne Kontakt: Strahlungsbeheizung
  - Beheizung durch Enthalpie des Abgases
  - Vorheizung (Flashboiling)
- ◆ **Mischen von f in g bzw. g in g**
  - stat./dyn. Mischer, Turbolader, teilweise uncoated Oxi-Kat, Bypass
- ◆ **Thermo-Hydrolyse**
  - Heizung, Hydrolysekat

Abbildung 3: Zuordnung auf Bauartebene zu den verfahrenstechnischen Teilschritten

### 2.2.2 Reaktionskinetik der SCR-Reaktion

Die ablaufenden Reaktionen im SCR-Katalysator richten sich im wesentlichen nach dem vorliegenden Rohemissionsniveau der Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und der Temperatur.

Falls nur Stickstoffmonoxid (NO) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) vorliegen, findet die sogenannte Standard-SCR nach folgender Gleichung statt.



Falls zusätzlich Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) im Abgas enthalten ist (z.B. durch Konvertierung von NO in NO<sub>2</sub> unter Anwesenheit von O<sub>2</sub> am Oxidationskatalysator) läuft zusätzlich die sog. schnelle SCR-Reaktion statt.



Bei dieser Reaktion ist ein 1:1-Verhältnis von NO zu NO<sub>2</sub> nötig. Der wesentliche Vorteil der schnellen SCR-Reaktion besteht darin, dass die Umsetzung von NO<sub>x</sub> im Gegensatz zur Standard-SCR schon bei niedrigeren Temperaturen stattfindet, da hier die Reaktionsgeschwindigkeit höher als bei der Standard-Reaktion ist.

Falls ein NO<sub>2</sub>-Überschuss im Abgas vorhanden ist, kommt es zur NO<sub>2</sub>-SCR nach folgender Gleichung:



Diese Reaktion sollte aufgrund des erhöhten Reduktionsmittelverbrauchs (NH<sub>3</sub>:NO<sub>x</sub>=4:3 im Gegensatz zu 1:1 bei Standard- und Fast-SCR) vermieden werden.

### 2.3 Abgeleitete Analysemethoden zur Beurteilung der Teilprozesse

Mit der Zerlegung des Gesamtprozesses in verfahrenstechnische Teilschritte, der Prozessbetrachtung auf physikalisch/chemischer Ebene und der Kenntnis der technischen Anforderungen an den jeweiligen Teilprozess können nun differenzierte Methoden zur Analyse entwickelt werden, die gezielt zur systemtechnischen Optimierung eingesetzt werden können.

In der Abbildung 4 ist die Verknüpfung der Prozessschritte mit den neu entwickelten bzw. geplanten Analysemethoden dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass jeder Prozessschritt durch eine Analysemethode und zwar sowohl durch Simulation als auch Experiment bewertet werden kann.

Die entwickelten Simulationen basieren auf physikalisch/chemischen Zusammenhängen. Damit ist sichergestellt, dass die experimentell gewonnenen Ergebnisse einerseits richtig gedeutet aber auch andererseits mit den validierten Modellen richtige Vorhersagen getroffen werden können.

## 3 SIMULATION DER REDUKTIONSMITTELAUFBEREITUNG UND TROPFEN- BEOBACHTUNG IM ABGASSTROM

### 3.1 Thermodynamik der Tropfenverdampfung im Abgasstrom

Die Wärmemenge zur vollständigen Verdampfung eines Tropfens setzt sich zusammen aus der Wärmemenge zur Aufheizung des Tropfens auf Siedetemperatur und der Wärmemenge zur Verdampfung.

1. Tropfen auf Siedetemperatur aufheizen:  $Q_{Auf} = c_{p,Wa} \cdot m_{Tr} \cdot \Delta T_{Auf}$
2. Tropfen vollständig verdampfen:  $Q_{Ver} = (h^* - h') \cdot m_{Tr}$   
Die Wärmemenge, die dem Tropfen in einer Zeitspanne zugeführt wird, ist proportional der treibenden Temperaturdifferenz und dem örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten:
3. Wärmezufuhr an den Tropfen:  $\Delta Q_{Abg} = \alpha \cdot A_{Tr} \cdot \Delta T_{Abg} \cdot \Delta t$

Ranz/Marshall [Ram52] haben für die Nusselt-Zahl eines umströmten Tropfens folgenden Zusammenhang in Abhän-

		Untersuchungsmethode				
		Simulation der Reduktionsmittelaufbereitung	Tropfen-Beobachtung im Abgasstrom	Temperaturverteilung über Katalysatorquerschnitt	Simulation der Katalyse	Modellabgasuntersuchungen
Prozessschritt	Zerstäuben <sup>1)</sup>		(ja)			
	Verdampfen	ja	(ja)			
	Mischen	(ja)	(ja)	ja		
	Thermo/Hydrolyse	(ja)				(ja)
	Reaktionskinetik				(ja)	ja

**Abbildung 4:** Zuordnung der Untersuchungsmethode zum Prozessschritt

<sup>1)</sup> nicht im Focus der Optimierung  
ja bereits realisiert  
(ja) Realisierung vorgesehen

gigkeit von der Reynolds- und der Prandtl-Zahl gefunden (die Prandtl-Zahl ist bei konstantem Druck nur temperaturabhängig).

$$Nu_{ein} = 2 + (0,6 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr})$$

Diese Nusselt-Zahl bezieht sich auf einen Einzeltropfen. Nach Mayinger [May82] kann auf die Nusselt-Zahl geschlossen werden, die bei einer Tropfenschar zutrifft (wobei  $b$  der mittlere Tropfenabstand ist).

$$Nu_{ges} = Nu_{ein} \left( 0,42 \cdot \left( \frac{b}{\varnothing} \right)^{\frac{1}{8}} + 0,41 \right)$$

Mit Kenntnis der Nusselt-Zahl kann der lokale Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu$$

Der Betrag der Wärmemenge ist somit abhängig von:

- Tropfendurchmesser (ist im Quadrat in der Tropfenoberfläche enthalten);
- Relativgeschwindigkeit (ausschlaggebend für Wärmeübergangskoeffizienten);
- Abgastemperatur

### 3.2 Aerodynamik des Tropfens im Abgas

Da für die Bestimmung der vom Abgas zugeführten Wärmeenergie die Relativgeschwindigkeit (in der Reynolds-Zahl) von Bedeutung ist, muss sie für jeden Schritt neu bestimmt werden.

Der Strömungswiderstand, also die Kraft, die ein Gasstrom einem Körper entgegensetzt, bezieht sich auf eine turbulente Strömung:

$$F_R = \frac{\rho_{Gas} \cdot c_w \cdot A_{Tr} \cdot (v_{rel})^2}{2}$$

Der Tropfen wird näherungsweise als kugelförmiger Festkörper angenommen, d.h. es sind keine Verformungen des Tropfens berücksichtigt.

Der Strömungswiderstand  $F_R$  hängt somit ab von:

- Dichte des strömenden Gases  $\rho_{Gas}$
- Strömungswiderstandskoeffizient  $c_w$
- Projizierte Fläche des Tropfens  $A_{Tr}$
- Relativgeschwindigkeit des Tropfens  $v_{rel}$

Wobei  $\rho_{Gas}$  der Dichte des Abgases entspricht. Der  $c_w$ -Wert wird zu 0,45 gewählt (entspricht dem  $c_w$ -Wert einer Kugel). Für die projizierte Fläche wird der Tropfenquerschnitt herangezogen.

### 3.3 Modellarchitektur: 2-dimensionale Betrachtung

Die Einspritzung kann in einem Winkel  $\alpha$  zur Strömungsrichtung des Abgases erfolgen. Zur Bestimmung der beiden Geschwindigkeitskomponenten in  $x$ - und  $y$ -Richtung wird folgende Abbildung 5 zur Hilfe genommen:

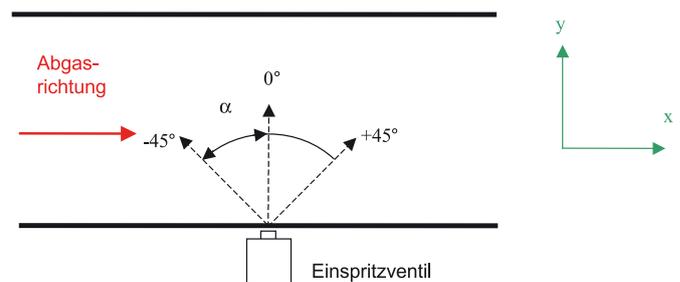


Abbildung 5: Festlegung der Einspritzrichtung

Es ist das Abgasrohr dargestellt, es wird von links nach rechts vom Abgas durchströmt. Die Einspritzrichtung ist in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  mit Hilfe der Koordinaten  $x$  und  $y$  dargestellt, wobei die  $x$ -Koordinate die axiale Richtung und die  $y$ -Koordinate die radiale Richtung (quer zum Rohr) wiedergibt. Die Abgasgeschwindigkeit wirkt nur in einer Richtung, nämlich in  $x$ -Richtung. In der ersten Modellphase wird angenommen, dass die Abgasgeschwindigkeit über dem Rohrquerschnitt konstant ist. Es wird also kein Ablösungsbereich der Strömung berücksichtigt, der in Wandnähe auftritt. Der Winkel  $\alpha$  wird positiv, wenn in Abgasrichtung eingespritzt wird, und negativ, wenn dagegen eingespritzt wird.

Bei senkrechter Einspritzung (also  $\alpha = 0^\circ$ ) wird die Tropfengeschwindigkeit in  $x$ -Richtung zu Beginn Null. Bei  $\alpha \neq 0^\circ$  wirkt zu Beginn in beide Richtungen ein Teil der Tropfengeschwindigkeit.

Die Tropfengeschwindigkeit nach der Einspritzung lässt sich berechnen zu:

$$\begin{aligned} x\text{-Richtung, axial:} & \quad v_{Tr,x} = v_{Ein} \cdot \sin \alpha \\ y\text{-Richtung, radial:} & \quad v_{Tr,y} = v_{Ein} \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

Die Relativgeschwindigkeit des Tropfens im Abgas wird für den 2-dimensionalen Fall wie folgt bestimmt:

Für die axiale Richtung (x-Richtung):

$$v_{rel,x} = |v_{Abg} - v_{Tr,x}|$$

Für die radiale Richtung (y-Richtung):

$$v_{rel,y} = v_{Tr,y}$$

Nach einiger Zeit wird aber der Tropfen in x- und y-Richtung unterschiedlich verzögert, da in beide Richtungen unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten vorliegen.

Über die Strömungswiderstandskraft  $F_R$  kann auf die Verzögerung bzw. Beschleunigung des Tropfens im Abgas geschlossen werden. Dies muss für beide Richtungen getrennt voneinander betrachtet werden:

$$F_{R,x,y} = m_{Tr} \cdot a_{x,y}$$

$$\Rightarrow a_{x,y} = \frac{F_{R,x,y}}{m_{Tr}} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$F_{R,x,y} = \frac{\rho_{Abg}}{2} \cdot c_w \cdot \frac{(\varnothing_{Tr})^2}{4} \cdot \pi \cdot (v_{rel,x,y})^2$$

$$m_{Tr} = \rho_{Wa} \cdot \frac{(\varnothing_{Tr})^3}{6} \cdot \pi$$

$$\Rightarrow a_{x,y} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_{Gas}}{\rho_{Wa}} \cdot (v_{rel,x,y})^2 \cdot c_w \cdot \frac{1}{\varnothing_{Tr}}$$

Mit Einführung der Konstante

$$C = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_{Gas}}{\rho_{Wa}} \cdot c_w$$

kann die Verzögerung berechnet werden:

$$a = C \cdot \frac{(v_{rel})^2}{\varnothing_{Tr}}$$

Die Verzögerung  $a$  ist also von zwei sich im Zeitverlauf ändernden Größen abhängig:

- Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$  (wird mit der Zeit immer geringer)
- Tropfendurchmesser  $\varnothing_{Tr}$  (beim Aufheizen konstant, bei der Verdampfung mit der Zeit immer geringer)

In den nächsten Zeitschritten (Zeitschritt:  $1\mu s$ ) wird die Relativgeschwindigkeit des Tropfens jeweils neu bestimmt:

$$v_{rel,x,y,neu} = v_{rel,x,y} - a_{x,y} \cdot 1 \cdot 10^{-6}$$

Die resultierende Relativgeschwindigkeit ist im Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  enthalten. Sie muss für jeden Schritt berechnet werden, da sich die durch das Abgas bereitgestellte Wärmemenge von Schritt zu Schritt ändert:

$$v_{rel} = \sqrt{(v_{rel,x})^2 + (v_{rel,y})^2}$$

Die Verzögerung des Tropfens ist aus zwei Gründen wichtig:

1. Zur Bestimmung der aktuellen resultierenden Relativgeschwindigkeit des Tropfens (ist im Wärmeübergang vom Abgas auf den Tropfen enthalten)
2. Zur Bestimmung des zurückgelegten Weges in axialer und radialer Richtung

### 3.4 Ergebnisse

Für den Verlauf eines Tropfens im Abgasrohr ist der Winkel von Bedeutung, mit dem eingespritzt wird. Wird gegen die Abgasrichtung eingespritzt, erhöht sich die Relativgeschwindigkeit, dadurch vergrößert sich der Wärmestrom auf den Tropfen.

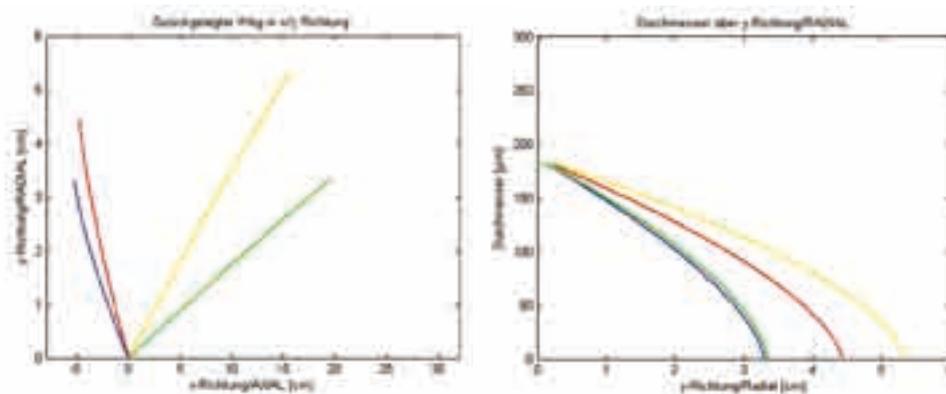
Es stellte sich heraus, dass es von Vorteil ist, gegen die Abgasrichtung einzuspritzen, da dadurch der geringste Auflösungsweg der Tropfen erreicht wird (siehe nachfolgendes Diagramm). Der genaue Winkel ist noch von weiteren Einspritzparametern abhängig. Es ist ferner zu beachten, dass die Tropfen nicht auf die Rohrwand auftreffen, bevor sie sich auflösen.

In der nachfolgenden Abbildung 6 ist exemplarisch Weg der Tropfen bei vier verschiedenen Einspritzwinkeln (jeweils 2 mit und gegen den Abgasstrom) bis zur vollständigen Auflösung gezeigt.

### 3.5 Ausblick

Das Modell wurde bereits um die Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofil der Abgasströmung erweitert.

Derzeit erfolgt die Validation des Modells, indem mit einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera die Flugbahn der Tropfen experimentell detektiert werden kann.



**Abbildung 6:**  
Trajektorien des Tropfens

Einspritzwinkel °	-65	-55	70	80
Farbe im Diagramm	Blau	Rot	Gelb	Grün

#### 4 MESSUNG DER TEMPERATURVERTEILUNG ÜBER KATALYSATORQUERSCHNITT ZUR BEURTEILUNG DER MISCHGÜTE

##### 4.1 Experimenteller Aufbau

Zur Detektion der Mischgüte wurde ein Ersatzsystem aufgebaut, das so nah wie möglich an der tatsächlichen Abgasanlagenkonfiguration bleibt. Als Einsprühmedium wurde Wasser verwendet, da es ähnliche Stoffwerte wie wässrige Harnstofflösung besitzt und keine Zerfallsprodukte bildet. Durch den Einsprühvorgang in das heiße Abgas verdampfen einerseits die Wassertropfchen und im Gegenzug kühlt sich das Abgas je nach Verteilung der Wassertropfchen ab. Dadurch ergibt sich ein Temperaturprofil über dem Querschnitt, das Rückschlüsse auf die Verteilung der Wassertropfchen zulässt.

Da besonders die Temperaturverteilung über dem Katalysatorquerschnitt von Interesse ist, wurde stromab der Eindüsestelle eine 2 cm dicke Katalysatorscheibe verwendet, auf die von der Rückseite eine Wärmebildkamera gerichtet ist (Abbildungen 7 und 8).

Um die Wärmebildkamera nicht den heißen Abgasen auszusetzen und ein Entweichen der Motorabgase in die Umgebung zu verhindern, wurde ein Messtunnel angefertigt, der als Beruhigungsstrecke des Abgases dient und an den die Absaugung der Laborlüftung angeschlossen wird. Durch einen stirnseitigen Ausschnitt wurde die Katalysatorscheibe mit der Abgasstrecke des Motors angeschlossen und durch einen gegenüberliegenden zweiten Ausschnitt konnte die Optik der Wärmebildkamera von außen in die Box und auf die Oberfläche der Katscheibe gerichtet werden.



▼ **Abbildung 7:**  
Anschluss der Abgasanlage an die Katalysatorscheibe und den Beruhigungstunnel



**Abbildung 8:** Anordnung der Wärmebildkamera am Beruhigungstunnel

4.2 Ergebnisse

Mit dieser Untersuchungsmethode können nun verschiedene Konfigurationen (Injektoren, Eindüsepositionen- und richtungen, Mischereinbauten) im Hinblick auf ihre Mischgütebeeinflussung untersucht werden.

Die Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Abkühlung der Katalysatorscheibe nach dem Beginn der Dosierung. In der Mitte des Querschnittes ist gegenüber den Randbereichen eine deutlich stärkere Abkühlung zu erkennen, was auf eine ungenügende Vermischung schließen lässt.

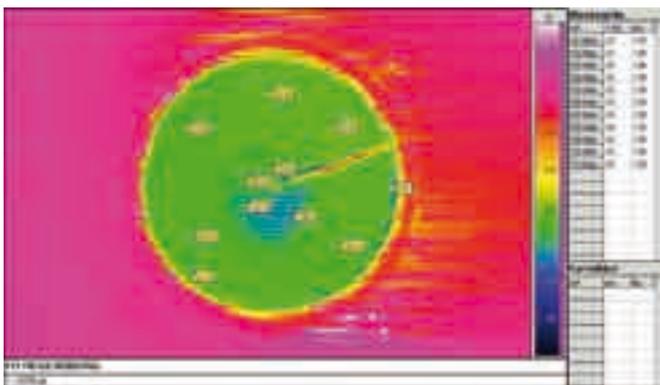


Abbildung 9: Abkühlung der Katalysatorscheibe

Grundsätzlich kann mit diesem Versuchsaufbau die Mischgüte sehr einfach qualitativ und durch Anwendung statistischer Verfahren auch quantitativ bewertet werden. Damit kann auf die Effektivität der Einspritzstelle bestimmt und auf den Umsetzungsgrad bzw. Wirkungsgrad eines Katalysators geschlossen werden.

5 SIMULATION DES ABGASKATALYSATORS

5.1 Thermisches Verhalten des Abgaskatalysators

Um das instationäre Verhalten eines Abgaskatalysators simulieren zu können, ist in einem ersten Schritt erforderlich, das thermische Verhalten sowohl in der Aufheiz- als auch in der Abkühlphase zu beschreiben. Um das Temperaturverhalten des Katalysators bei unterschiedlichen Motorbetriebspunkten aufzuzeigen, müssen folgende Eingangsgrößen variabel gestaltet werden:

- Abgasmassenstrom
- Abgastemperatur

- Katalysatortemperatur zu Beginn
- Abgaszusammensetzung

Die für die Temperaturentwicklung notwendigen Stoffwerte unter Berücksichtigung der geltenden Gesetzmäßigkeiten der Strömungsmechanik und der Wärmeübertragung wurden aus der Literatur herausgearbeitet. Das entscheidende Fluid bildete hierbei ein Gasgemisch aus  $N_2$ ,  $O_2$  und  $H_2O$ . Dies sind die drei Hauptvertreter der Rohemissionsgase eines Verbrennungsmotors. Durch die noch relativ langen Rechenzeiten wurde auf die Berechnung des gesamten Monoliths (mit Kanälen durchzogene Trägersubstanz für die katalytische Schicht) verzichtet und stattdessen einzelne repräsentative Kanäle betrachtet, deren Orte im Monolith beliebig sein können.

5.2 Aufstellen der Energiebilanz

Der Ansatz der Simulation beruht auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Demnach bleibt in einem System die Summe aller Energien konstant. Bei der Anwendung wird unterschieden zwischen der in einem System gespeicherten Energie und der Energie, die während eines Prozesses die Systemgrenze überschreitet. Das Prinzip von der Erhaltung der Energie führt schließlich zu einer Energiebilanz, die die Änderung der im System gespeicherten Energie mit der Energie verknüpft, die während des Prozesses als Wärme  $Q$  die Systemgrenze überschreitet (Abbildung 10).

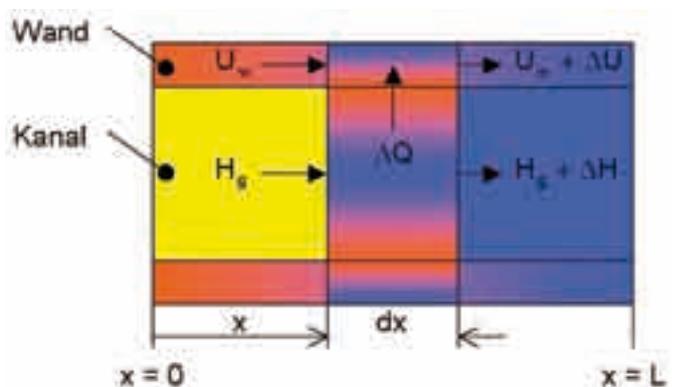


Abbildung 10: Energiebilanz in einer durchströmten Rohrleitung

Das heiße Gas gibt in einem entsprechenden Zeitraum  $\Delta t$  Energie in Form von Wärme  $Q$  an die Kanalwand ab. Unter der Annahme, dass dieser Vorgang verlustfrei abläuft, erhöht sich die innere Energie der Kanalwand  $U_w$ , während sich die Enthalpie des Gases  $H_g$  um den gleichen Betrag

vermindert. Mit den nachfolgenden Gleichungen ist es nun möglich, die Temperaturen der Kanalwand  $T_w$  und des Gases  $T_g$  für den Zeitpunkt  $t_1$  neu zu berechnen, wobei gilt:  $t_1 - t_0 = \Delta t$ .

$$T_w(t_1) = T_w(t_0) + \frac{\dot{Q} * \Delta t}{m_w * c_w}$$

$$T_g(t_1) = T_g(t_0) - \frac{\dot{Q} * \Delta t}{m_g * c_g}$$

$\dot{Q}$  ist hierbei der zuvor berechnete Wärmestrom.

$$\dot{Q} = \alpha * A_{wü} * (T_g - T_w)$$

Dabei ist der Wärmestrom abhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , von der wärmeübertragenden Fläche  $A_{wü}$ , sowie von der momentanen Temperaturdifferenz zwischen Gas und Wand.

### 5.3 Modellarchitektur: 1-dimensionale Betrachtung

Durch eine Abfrage während der Simulation ist es dem Benutzer gestattet, den Kanal im Katalysator selbst zu wählen, für welchen die Temperaturentwicklung berechnet werden soll. Danach wird für den ausgewählten Kanal zunächst die Strömungsform berechnet, mit der das Gas in den Kanal eintritt, und im Anschluss daran die örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten über der Länge des entsprechenden Kanals bestimmt (Abbildung 11).

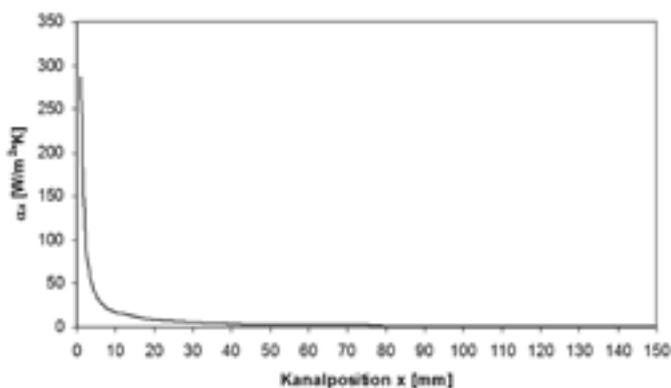


Abbildung 11: Verlauf des örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten

Um die thermische Entwicklung in solch einem Kanal mit gewisser Auflösung betrachten zu können, wird der Kanal in 15 gleichlange Teile mit der Länge  $\Delta x$  zerlegt. Bei einer

angesetzten Kanallänge von 150 mm ergeben sich demnach Teilstücke der Länge  $\Delta x = 10$  mm. Durch eine entsprechende Rechenschleife im Programm wird nun für jedes dieser Teilstücke der jeweils aktuelle Wärmeübergang, und die daraus resultierenden Temperaturen  $T_w$  (Wandtemperatur) und  $T_g$  (Gastemperatur) berechnet. Somit ergibt sich für den Kanal ein örtlicher Temperaturverlauf zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  ms. Durch eine weitere Schleife wird genau dieser Vorgang der örtlichen Temperaturberechnung zu weiteren Zeitpunkten mit den Schritten  $\Delta t$  beschrieben. Bei gleich bleibenden Teillängen von 10 mm ist der Zeitschritt  $\Delta t$  von der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids abhängig. Das Ende der Berechnung gibt der Benutzer durch eine vorherige Abfrage selbst an.

Um die Temperatur im Kanal abhängig von Ort und Zeit zu bestimmen, bedarf es der eindeutigen Indizierung, wie in Abbildung 12 beispielhaft zum Zeitpunkt  $t_1$  dargestellt ist.

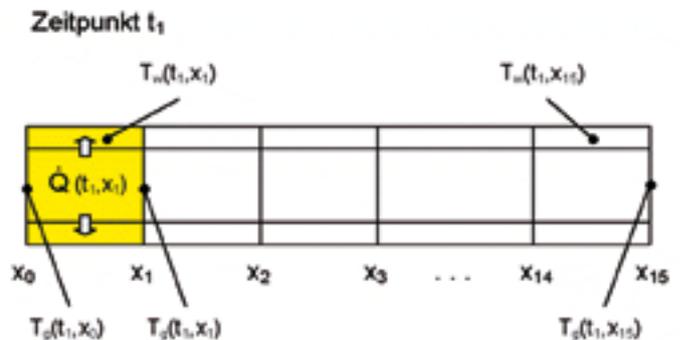


Abbildung 12: Formalismus zum Zeitpunkt  $t_1$

Die berechneten Werte werden durch das Programm in entsprechenden Matrizen abgelegt, deren Spalten den Ort im Kanal darstellen und deren Zeilen die einzelnen Zeitpunkte markieren.

### 5.4 Ergebnisse

Für die Darstellung der Ergebnisse bedient sich das Programm der zuvor erstellten Matrizen. Um den zeitlichen Verlauf sichtbar zu machen, werden die entsprechenden Graphen (Wärmeübergang und Temperatur) über der Kanallänge zu verschiedenen Zeitpunkten abgebildet, wobei die Differenz zweier aufeinander folgender Zeitpunkte konstant ist. Durch die Legende in jedem Diagramm kann so zu jedem Verlauf der entsprechende Zeitpunkt entnommen werden. Rechts unten werden die Anfangsbedingungen der durchgeführten Simula-

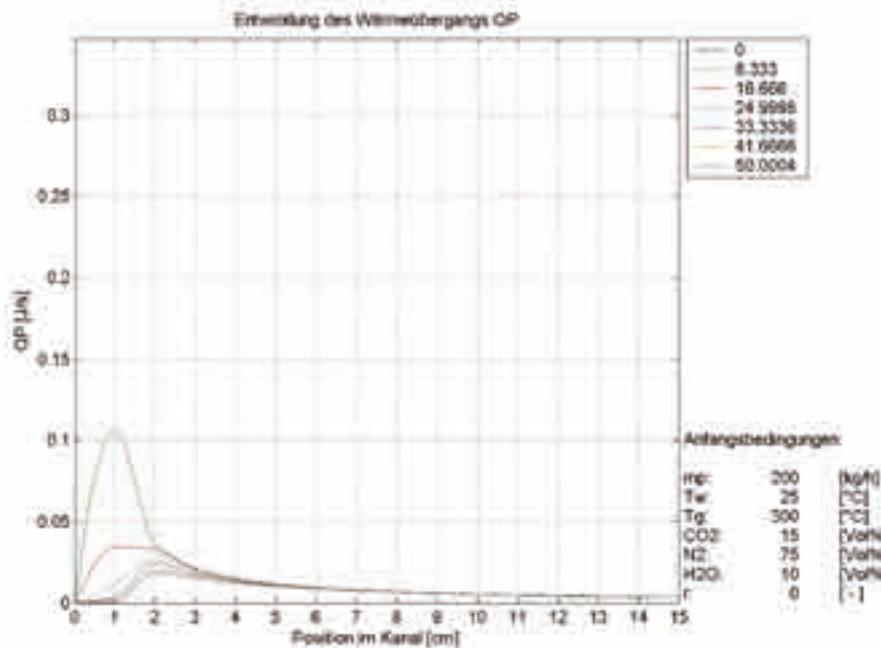


Abbildung 13: Wärmeübergang während der Aufheizphase

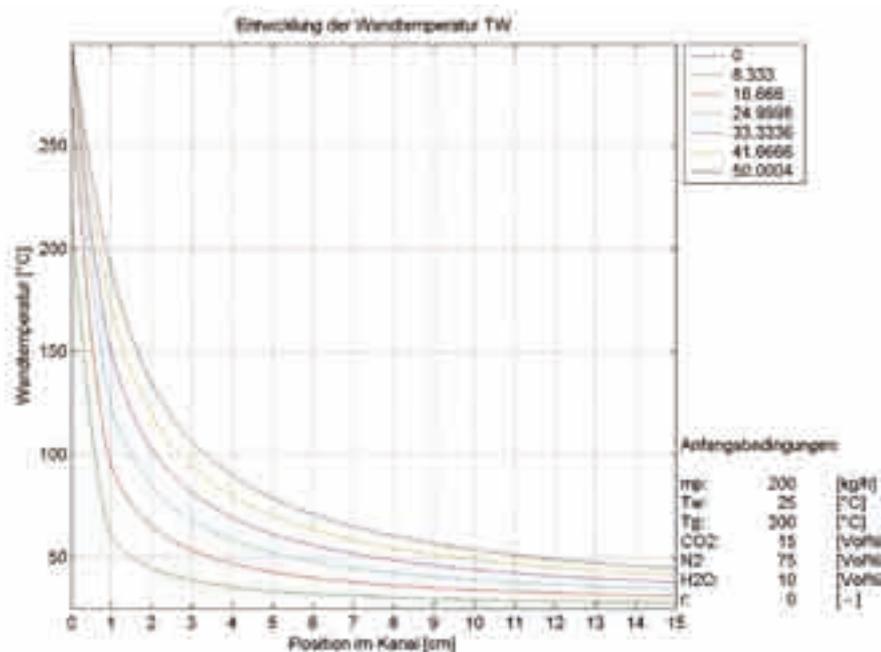


Abbildung 14: Wandtemperatur während der Aufheizphase

tion festgehalten. Dies soll zu einem verbesserten Überblick verhelfen. In der Abbildung 13 ist die Entwicklung des Wärmeübergangs während der Aufheizphase über 50 s zu erkennen, die letztendlich zur Wandtemperatur während der Aufheizphase über 50 s (Abbildung 14) führt.

### 5.5 Ausblick

Mit dem aufgestellten Modell kann der Temperaturverlauf an der Oberfläche eines Katalysators beim Aufheizen bzw. Abkühlen durch die Einwirkung des Abgases auf einfache Weise ermittelt werden. Neben der Darstellung des zeitlichen Temperaturverlaufs ist dieses Programm zudem in der Lage, den exakten Zeitpunkt des Erreichens einer Temperatur an bestimmter Stelle zu ermitteln. Durch die Variationsmöglichkeit der Randbedingungen können hierbei verschiedene Motorbetriebspunkte oder Einbaulagen simuliert werden. Basierend auf diesem Modellansatz wird jetzt in einem nächsten Entwicklungsschritt die Reaktionskinetik eines SCR-Katalysators ergänzt werden. Wichtige reaktionskinetische Parameter werden dabei mit Modellabgasuntersuchungen identifiziert.

## 6 MODELLABGAS-UNTERSUCHUNGEN

### 6.1 Reaktionskinetische Untersuchungen am SCR-Katalysator

Die Untersuchung der Reduktion von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) an einem Eisenzeolithkatalysator zur Bestimmung der Reaktionskinetik erfordert die Durchführung von Versuchsreihen am Motorenprüfstand. Ziel der Messungen ist es, neben den maximalen Umsatzraten eine Aussage über die Reaktionsgeschwindigkeit treffen zu können.

Diese Parameter stellen die Grundlage einerseits für die Simulation des SCR-Katalysator (vgl. Kap. 5) und andererseits für die Steuerung des SCR-Katalysators in der Motorsteuerung dar.

## 6.2 Versuchsaufbau

Der entworfene Versuchsaufbau ermöglicht die Bestimmung aller relevanten Abgas- und Katalysatortemperaturen sowie Abgaskonzentrationen, die im dynamischen Fahrbetrieb auftreten können. In den Abbildungen 15 und 16 ist der Aufbau des Prüfstandes dargestellt.

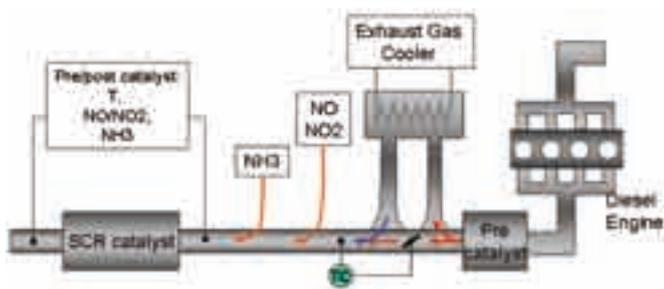


Abbildung 15: Anlagen-Schema des Modellabgas-Motorprüfstandes



Abbildung 16: Ansicht des Modellabgas-Motorprüfstandes

Wird bei einem Motor der Lastpunkt geändert, so verändern sich in der Folge der Abgasvolumenstrom, die Abgastemperatur und die Abgaskonzentration. Dies erschwert die Durchführung gezielter Katalysatorversuche. Deshalb wurde der Prüfstandsaufbau grundlegend erweitert, um einerseits die Abgaskonzentration und andererseits die Abgastemperatur einzustellen.

Die Erzeugung des Rohabgases für die Versuchsreihen erfolgt weiterhin über einen Verbrennungsmotor und zwar

mit einem 4-Zylinder-Dieselmotor mit 2 l-Hubraum. Zur Beeinflussung der Abgaszusammensetzung werden nun in das Abgas zusätzliche N-Spezies beigefügt wie Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). Die Zudosierung dieser Komponenten erfolgt stromabwärts des Oxidationskatalysators mittels modifizierter Einspritzventile. Vorversuche zeigten, dass die geforderte zeitlich konstante Zumischung der Modellgase NO, NO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub> zum Abgas mit den intermittierend einspritzenden Ventilen möglich ist.

Um die gewünschte SCR-Katalysator-temperatur einzustellen, wird stromaufwärts des ein AGR-Wärmetauscher der MAN Nutzfahrzeuge AG eingesetzt. Damit ist es möglich, ein breites Temperaturfenster abzufahren.

Um eine Beeinflussung der Thermo-Hydrolyse von Harnstoff auszuschließen, wurde als Reduktionsmittel der Stickoxide gasförmiges Ammoniak gewählt.

Die Messung der Abgaskonzentrationen erfolgte mit Hilfe eines Massenspektrometers vom Typ Airsense.net der MS4 Analysetechnik GmbH. Für die Entnahme der Abgasprobe wird je eine Messstelle vor dem Katalysator und eine danach vorgesehen. So kann das Rohemissionsniveau sowie die umgesetzten Schadstoffe der Komponenten NO, NO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub> gemessen werden. Zusätzlich werden im Abgasstrang drei NO<sub>x</sub>-Sensoren angeordnet, die es ermöglichen, instationäre Vorgänge zu erfassen. Diese NO<sub>x</sub>-Sensoren weisen jedoch aufgrund ihres Messprinzips eine Querempfindlichkeit gegenüber NH<sub>3</sub> auf. Durch diesen Aufbau war es möglich, durch den ersten Sensor die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen des Motors zu messen. Weiter stromabwärts erfolgte die Eindosierung des Reduktionsmittels NH<sub>3</sub>, so dass ein weiterer Sensor, nach Eindüsstelle angebracht, zusätzlich zu den Stickoxiden auch Ammoniak mit aufnahm. Der dritte NO<sub>x</sub>-Sensor war stromabwärts nach dem SCR-Kat angebracht und erfasste neben dem umgesetzten NO<sub>x</sub> auch einen eventuell auftretenden NH<sub>3</sub>-Durchbruch. Im Vergleich mit den aufgenommenen Messwerten durch das MS kann somit eine Aussage über die Höhe der Querempfindlichkeit der NO<sub>x</sub>-Sensoren gegenüber NH<sub>3</sub> getroffen werden.

Die Aufzeichnung der Messdaten und die Ansteuerung der Injektoren erfolgt mittels eines Rapid-Prototyping-Systems von DSpace. Sämtliche digitale und analogen Signale wurden mit einer Autobox eingelesen bzw. ausgegeben. Die Software ControlDesk gestattet es, alle relevanten Motorgrößen, sowie die Signale von Temperatursensoren, Massenspektrometer, NO<sub>x</sub>-Sensoren zentral in einem Messfile zu speichern.

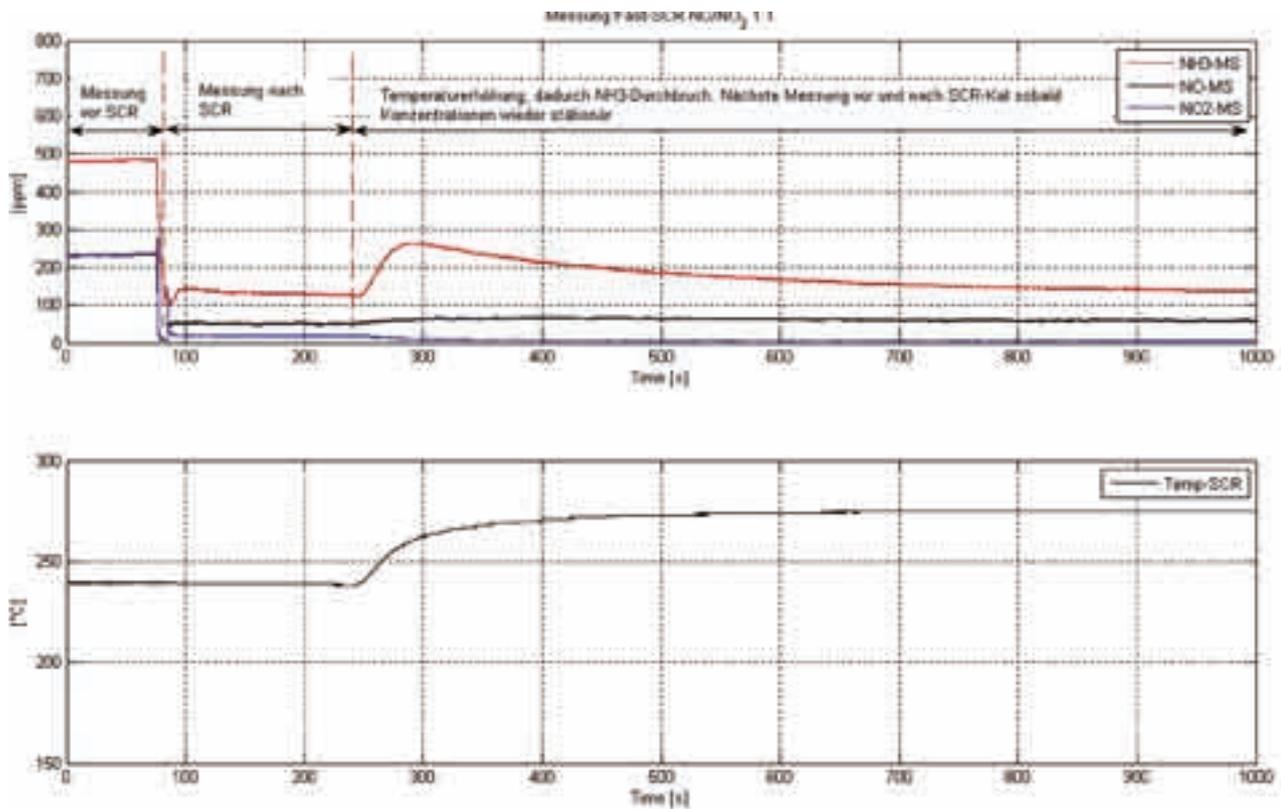


Abbildung 17: Darstellung des Messergebnisses bei einem NO/NO<sub>2</sub>-Verhältnisses von 1/1

### 6.3 Ergebnisse

Basierend auf den chemischen Reaktionen (vgl. Kap. 2.2.2) wurde ein Messprogramm aufgestellt, mit dem jeweils eine der drei Reaktionen untersucht werden konnte. So wurde für die Standard-SCR ein Motorbetriebspunkt gewählt, bei dem nur NO im Rohabgas enthalten ist (hohe Temperaturen am Oxi-Kat um eine Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub> zu vermeiden). Anschließend wurde bei diesem Betriebspunkt eine Messreihe aufgezeichnet, in der die Temperatur in 10 K-Schritten im Bereich von T<sub>max</sub> bis ca. 100°C innerhalb des SCR-Katalysators mit Hilfe des Wärmetauschers variiert wurde (Abbildung 17).

Messungen der Abgaskonzentrationen sowie der Temperatur vor und nach dem SCR-Katalysator lassen Rückschlüsse auf die Abhängigkeiten der Reaktionsgeschwindigkeit zu. Das gleiche Verfahren wurde zur Untersuchung der Fast- und NO<sub>2</sub>-SCR angewandt. Hierbei wurde das gewünschte NO zu NO<sub>2</sub>-Verhältnis durch gezielte Zudosierung von NO<sub>2</sub> eingestellt.

### 6.4. Ausblick

Der vorliegende Prüfstands Aufbau ermöglicht eine gezielte Steuerung der Versuchsparameter zur Bestimmung der Reaktionskinetik des verwendeten SCR-Katalysators. Durch gezieltes Zudosieren von NO und NO<sub>2</sub> kann Einfluss auf die Zusammensetzung des Rohemissionsniveaus genommen werden. Verschiedene Temperaturprofile können durch einen Wärmetauscher in kurzer Zeit eingestellt werden. Die Variation des Verhältnisses von Reduktionsmittel zu reduzierendem Stoff zwischen 0,5 und 1,3 deckt alle im dynamischen Fahrbetrieb auftretenden Werte ab.

Die gewonnenen Messdaten bilden nun die Grundlage für die Bedatung eines Simulationsmodells. Dieses beschreibt, basierend auf formalkinetischen Ansätzen, die maximale Reaktionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur und der vorliegenden Eingangskonzentrationen der Stickoxide. Hieraus wiederum kann der potentielle Umsatzgrad und NH<sub>3</sub>-Verbrauch berechnet werden.

## 7 ANALYSE DER SYSTEMROBUSTNESS

### 7.1 Versuchsaufbau

Um die Robustness der verwendeten Reduktionsmittelinjektoren zu untersuchen, wurden Langzeittests durchgeführt. Am Abgasstrang eines 4-Zylinder-Dieselmotors, wurden an drei Positionen Injektoren angebracht. Dadurch konnten unterschiedliche Testbedingungen gleichzeitig realisiert werden. Der Temperaturbereich des Abgases erstreckte sich von 250 °C bis über 400 °C. Außerdem konnte die Frequenz der Einspritzimpulse sowie der Einspritzdruck am jeweiligen Injektor variiert werden. Der durch die Eindüsung von wässriger Harnstofflösung durch Thermo/Hydrolyse entstandene Ammoniak wird mit Hilfe von Oxidationskatalysatoren wieder oxidiert. Somit konnte ein Ausstoß des giftigen Gases in die Umwelt vermieden werden.

Die Analyse der Injektoren zielte zum einen auf die generelle Funktionsfähigkeit ab. Hierbei wurde überprüft, ob die Injektoren sowie die verwendeten Materialien der mechanischen bzw. thermischen Dauerbelastung standhalten.

Der Schwerpunkt der Tests liegt jedoch auf der Untersuchung der Auswirkungen durch den Betrieb mit wässriger Harnstofflösung. Aufgrund der chemischen Eigenschaften besteht die Gefahr, dass Ablagerungen die Funktionsfähigkeit des Injektors nachhaltig beeinflussen.

Durch Rückstände an der Injektorspitze können die Öffnungen teilweise verschlossen sein, wodurch die Reduktionsmittelaufbereitung gestört und somit der Wirkungsgrad des SCR-Systems negativ beeinflusst werden könnte.

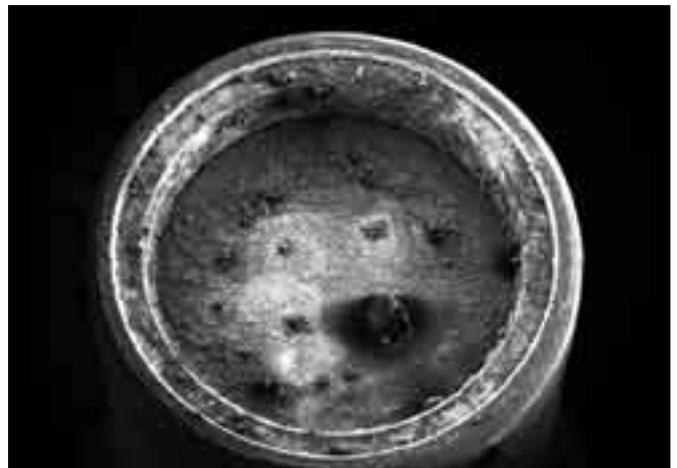
Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Effizienz des SCR-Systems ist der Durchmesser der Harnstofftropfen im Abgas. Die Gefahr von Ablagerungen in den Injektoröffnungen besteht in der Beeinträchtigung des Strahlzerfalls, wodurch verhältnismäßig große Tropfen eingedüst werden können, die wiederum den Verdampfungsprozess erheblich verlangsamen.

### 7.2 Analysemethoden

Um diese Effekte zu analysieren, wurden verschiedene Analysemethoden entwickelt und erprobt.

Direkt nach dem Dauertest am Motor werden die Injektoren mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop untersucht. Dadurch kann festgestellt werden, ob die Öffnungen des Injektors

ganz bzw. teilweise verstopft oder frei von Ablagerungen waren. Außerdem ist es möglich, die Ablagerungen auf ihre chemische Elementarzusammensetzung zu untersuchen. Durch den Elektronenstrahl des REM werden kernnahe Elektronen im Atom des zu untersuchenden Materials von ihrer Position geschossen. Die dabei entstehende Lücke wird durch ein energiereicheres Elektron aus einem höheren Orbital ersetzt, wobei die Energiedifferenz in Form eines Röntgenquants emittiert wird. Durch die Detektion dieser Röntgenstrahlung, die für jedes Element charakteristisch ist, kann somit auf die chemische Beschaffenheit des Materials geschlossen werden. Dadurch ist es nicht nur möglich, Ablagerungen auf der Injektoroberfläche zu identifizieren, sondern es kann auch deutlich zwischen Rückständen von Russpartikeln und Harnstoffablagerungen unterschieden werden.



**Abbildung 18:** REM-Aufnahme eines Injektors mit Russpartikelrückständen

Um den Einspritzstrahl visuell darzustellen und zu beurteilen, wird eine Hochgeschwindigkeits-Kamera eingesetzt. Der Vorteil dieser sog. CCD-Kamera besteht in der hohen Auflösung und der extrem kurzen Belichtungszeit. Die Aufnahmen ermöglichen eine präzise Darstellung des Sprays. Dadurch können genaue Aussagen über die Auswirkungen von Harnstoffablagerungen auf die Strahlcharakteristik gemacht werden. Durch die Möglichkeit, jede Einspritzung des Injektors gezielt zu betrachten, kann nicht nur ein durch Ablagerungen blockierter Strahl nachgewiesen, sondern auch ein „frei schießen“ von verstopften Injektoröffnungen visualisiert werden. Damit lassen sich Aussagen treffen, ob bestimmte Ablagerungen als kritisch anzusehen sind, oder von geringerer Bedeutung.



Abbildung 19: Strahlbildaufnahme mit CCD-Kamera

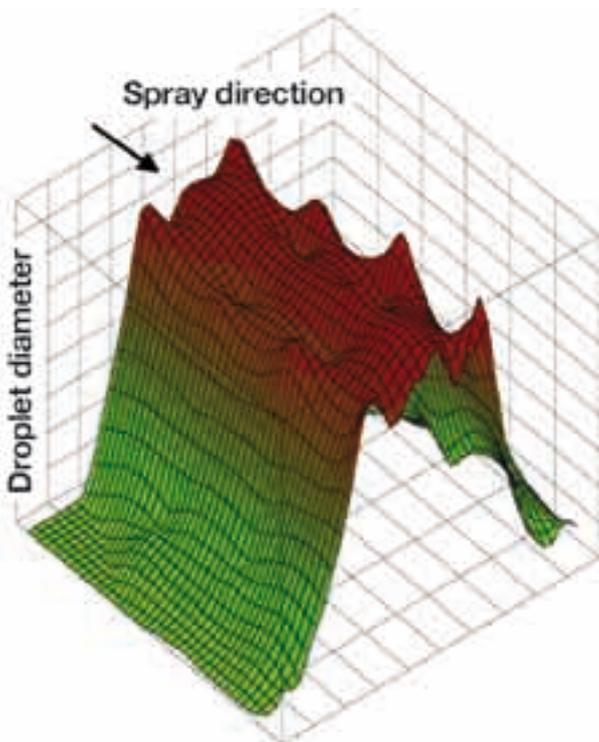


Abbildung 20: Verteilung der Tropfengröße im Spray mit Hilfe der Laserbeugung

Die Analyse der Tropfengröße ist mit Hilfe eines Laser-Beugungs-Messgeräts von MALVERN durchgeführt worden. Dabei werden die Strahlen des Injektors durch einen Heli-

um-Neon-Laser geführt. Beim Durchgang eines Tropfens durch den Laser wird das Licht gebeugt und trifft dann auf einen der 32 konzentrischen Detektorringe. Der Abstand zwischen Ringmittelpunkt und dem auftreffenden, gebeugten Licht ist ein Maß für die Tropfengröße, wobei große Tropfen kleine Streuwinkel hervorrufen und umgekehrt. Außerdem ist indirekt über die Intensität des ungebeugten Lichts eine Aussage über die Tropfenkonzentration möglich. Es lässt sich durch statistische Berechnung die Tropfengrößenverteilung ermitteln.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Selektive Katalytische Reduktion (SCR) ist eine sehr wirkungsvolle und sehr effektive Methode, um Stickstoffoxide im Abgas von Verbrennungsmotoren bei Anwesenheit von Überschuss-Sauerstoff zu reduzieren. Eine erste Serienanwendung bei Lkw ist bereits erfolgt, bei Pkw ist eine Einführung im Jahr 2008 bei einzelnen Modellen geplant.

Gerade vor dem Hinblick einer weiteren Verschärfung der Abgasgrenzwerte und der Forderung nach effizienten Antriebssystemen ist eine weitere Optimierung des SCR-Systems erforderlich. Im Labor für Verbrennungsmotoren und Abgasnachbehandlung der Fakultät Maschinenbau beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe mit dem Thema der Optimierung des SCR-Systems. In diesem Aufsatz ist das Ergebnis dieser Arbeitsgruppe zusammengefasst.

Es wurden einerseits neue Untersuchungsmethoden entwickelt oder bereits bestehende verfeinert und andererseits wurden auf den physikalisch/chemischen Grundlagen basierende Modelle abgeleitet. Die Ziele dieser Modelle sind die Gewinnung fundierter Erkenntnisse, die umfangreiche Interpretation der Messergebnisse, das Aufzeigen und Erkennen vorhandenen Optimierungspotenzials.

Zu jedem verfahrenstechnischen Teilschritt der Reduktionsmitteldispersierung wurde eine experimentelle und simulative Untersuchungsmethode entwickelt und zugeordnet.

Für die Strömung und Verdampfung des Reduktionsmitteltropfens wurde ein Simulationsmodell entworfen, das im nächsten Entwicklungsschritt um die Thermo-Hydrolyse der Harnstoff-Wasserlösung erweitert wird. Zur Validation dieses Modells wird ein Strömungsprüfstand realisiert, in dem die Flugbahn der dispergierten Tropfen optisch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera verfolgt werden kann.

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

Tel.: 0941 943-5164

Fax: 0941 943-1428

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

Ganz wesentlich für eine optimale Konvertierungsrate am Katalysator ist die Mischgüte des Reduktionsmittels im Abgasstrang. Dazu wurde eine Prüfeinrichtung entwickelt, die durch Messung der Temperaturverteilung am Katalysator auf die Mischgüte des Reduktionsmittels schließen lässt.

Die Reduktionsreaktionen am SCR-Katalysator lassen sich auf dem kombinierten Motor- und Modellabgasprüfstand untersuchen, der es ermöglicht, die Abgastemperatur und die Abgaskonzentrationen gezielt und unabhängig voneinander zu variieren. Die gefundene Reaktionskinetik wird mit dem bereits entwickelten Katalysatortemperaturmodell in einer nächsten Entwicklungsstufe kombiniert.

Zur Bestimmung der Robustness der SCR-Komponenten wurde ein spezieller Dauerlaufzyklus definiert. Die Beeinflussung der Einspritzventile durch diesen Zeitraffertest kann durch Spray-Untersuchungen, Tropfengrößenbestimmungen und REM-Messungen quantitativ beurteilt werden.

**9 LITERATUR**

- [Eid97] Eidloth, S.: Stickoxidminderung mit moderner Technik. Verfahrenstechnik 31 (1997) Nr 7-8.
- [Frä97] Fränkle, G.; u.a. SINOx – Ein Abgasnachbehandlungssystem für Nutzfahrzeuge. 18. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1997.
- [Tos96] Tost, R.; u.a.: Ein geregeltes Abgasnachbehandlungssystem zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte bei Pkw-Dieselmotoren. 17. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1996.
- [Rab99] Rabl, HP; u.a.: SINOx - Ein Abgasnachbehandlungssystem auf SCR-Basis für Diesel-Pkw. Abgasreinigung von Dieselmotoren. Haus der Technik, 15.-16. Juni 1999, Essen.
- [Ram52] Ranz, W.E.; Marshall, W.R., Chem. Eng. Prog., Vol. 48, 1952, S. 173 – 180.
- [May82] Mayinger, F.: Strömung und Wärmeübergang in Gas-Flüssigkeits-Gemischen, Springer, Wien, 1982

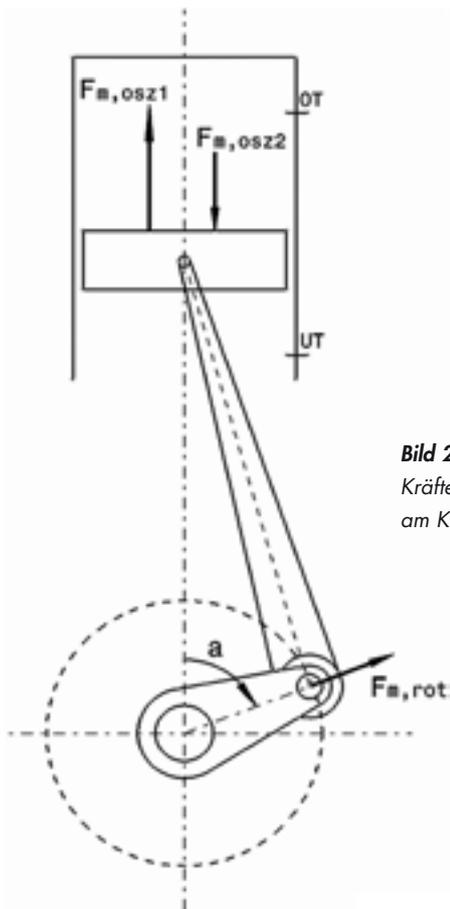
**DANKSAGUNG**

Die Autoren bedanken sich ausdrücklich bei

- der PCO AG, Kelheim, für die Unterstützung bei den Strahlbildaufnahmen mit der CCD-Kamera
- der MAN Nutzfahrzeuge AG, Nürnberg, für die Überlassung des AGR-Kühlers

- den Herrn Prof. Dr. Elsner, Prof. Dr. Hammer, F. Fleischmann und P. Bräu, FH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, für die messtechnische Unterstützung
  - der Siemens AG, Siemens VDO Automotive, für die finanzielle Unterstützung
  - Herrn Dr. Ketterl, Siemens AG, Siemens VDO Automotive, für die wichtigen Anregungen.
- Sie alle haben maßgeblich zum Gelingen dieser Veröffentlichung beigetragen.





**Bild 2:**  
Kräfte  
am Kurbetrieb

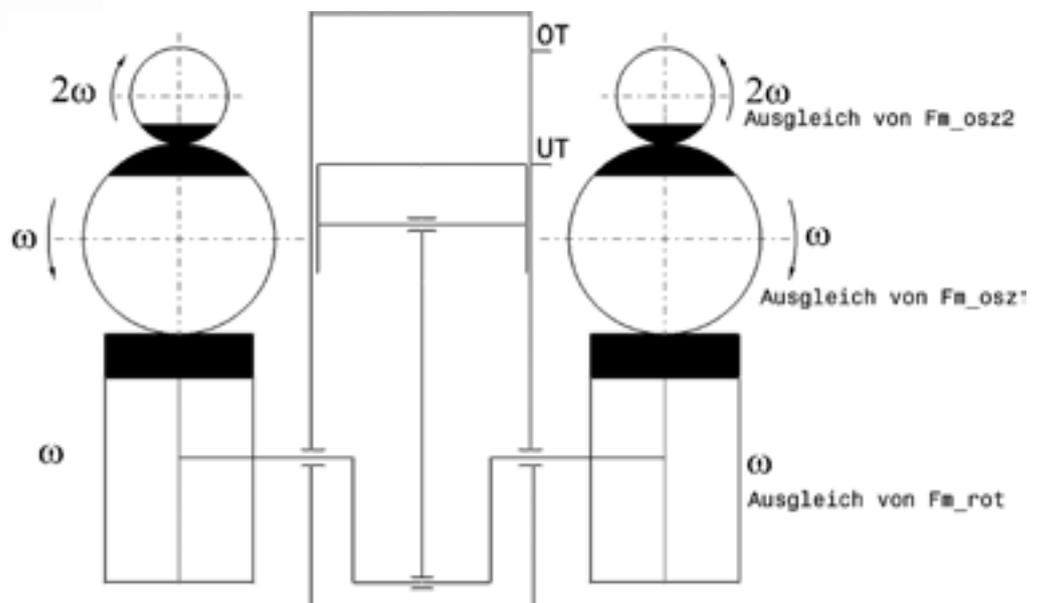
### 1.2. Massenausgleich

Für die rotierenden Unwuchtkräfte ist es eine gängige Lösung, diese durch ein auf der Kurbelwelle angeordnetes Gegengewicht auszugleichen. Hierbei kompensiert die Fliehkraft des Gegengewichtes die rotierende Unwuchtkraft aus Gl. (1).

Für den Ausgleich der Kräfte aufgrund der oszillierenden Massen werden zwei gegenläufig rotierende Wellenpaare verwendet – der sogenannte Lanchesterausgleich. Dabei übernimmt ein Wellenpaar den Ausgleich 1. Ordnung (Gl. (2)) und das andere den der 2. Ordnung (Gl. (3)). Dabei besitzen erstgenannte Wellen dieselbe Drehzahl wie die Kurbelwelle. Im Gegensatz dazu müssen die Wellen für den Ausgleich der 2. Ordnung mit doppelter Kurbelwellendrehzahl betrieben werden. In Bild 3 sind alle unwuchterzeugenden Massen sowie deren Abhängigkeit von Drehzahl und Drehrichtung dargestellt.

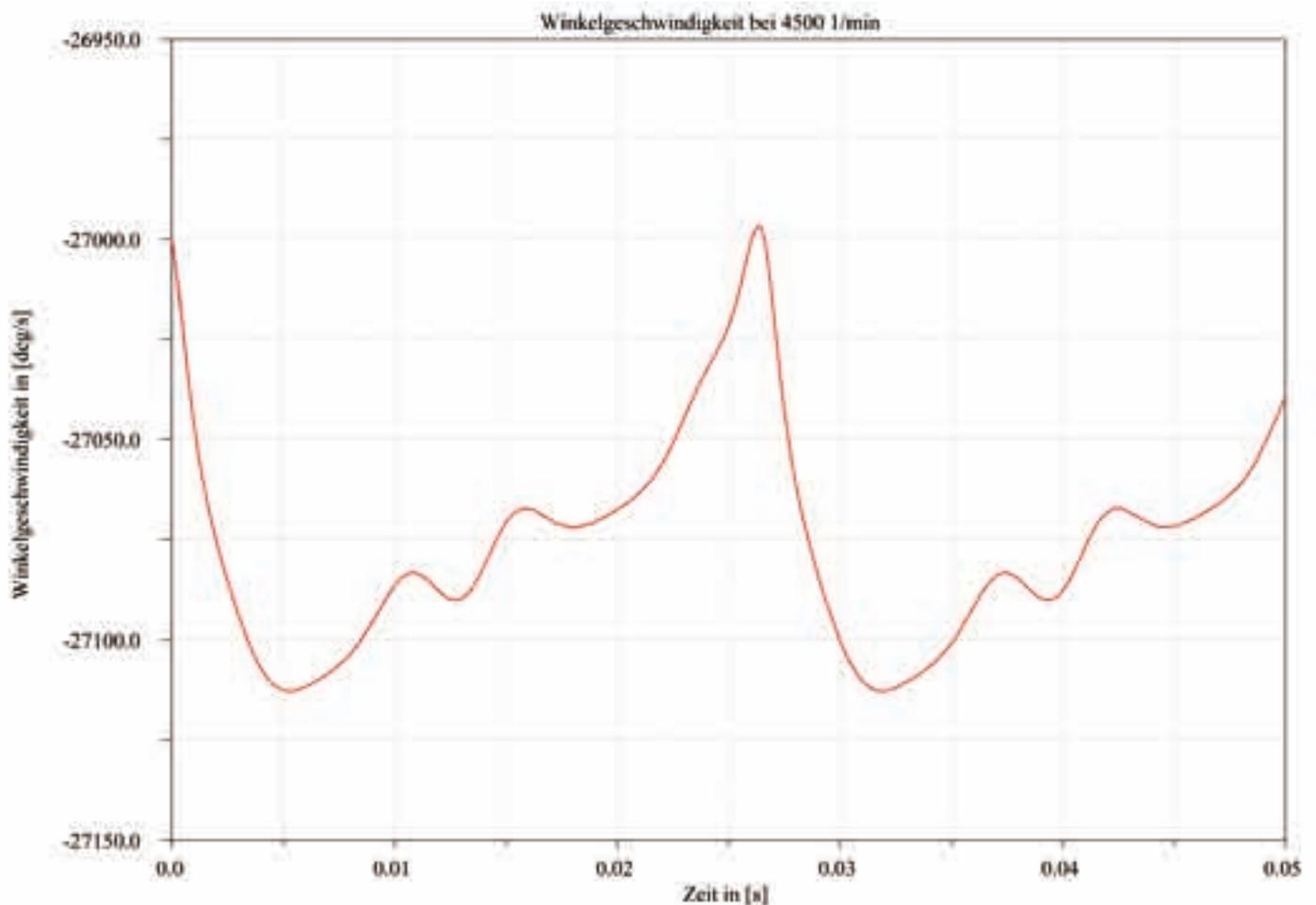
### 1.3. Schwungscheibe

Bei einem Verbrennungsmotor erfüllt die Schwungscheibe die Funktion eines Energiespeichers. Dabei nimmt dieser Speicher im Expansionszyklus Energie auf und gibt diese in den restlichen Zyklen wieder ab. Daraus resultiert eine



**Bild 3:** Darstellung aller  
Ausgleichsgewichte

■ Gegengewichte für den Ausgleich der rotierenden Kräfte  
◐ Gegengewichte für den Ausgleich der oszillierenden Kräfte



**Bild 4:** Winkelgeschwindigkeitsverlauf bei einer Drehzahl von 4500 1/min

Ungleichförmigkeit im Winkelgeschwindigkeitsverlauf welcher in seinem typischen Verlauf in Bild 4 zu betrachten ist. Als Maß für die Geschwindigkeitsänderung dient der Ungleichförmigkeitsgrad

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} \quad (4).$$

## 2. ENTWICKLUNGSABLAUF

Im nachfolgenden wird auf die wesentlichen Arbeitsschritte des Entwicklungsablaufes eingegangen.

### 2.1. Kurbelwelle

Zuerst wird die Kurbelwelle anhand von diversen Randbedingungen definiert, die sich insbesondere aus dem Prüfstandmotor-Konzept ergeben. Im Detail bedeutet das, dass bei vielen Bauteilen (z. B. Hauptlager, Pleuel, Kolben u. dgl.) aus wirtschaftlichen Gründen versucht wird, bereits bestehende Komponenten zu verwenden. Dabei stellen beispielsweise die Hauptlager ein Problem dar, da übliche Motoren mit weitaus geringeren Spitzendrücken betrieben werden. Unter Beachtung dieser Randbedingungen wurde ein erster Grobentwurf der Kurbelwellengeometrie erstellt und

	Vorteile	Nachteile
Kette	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Lebensdauer</li> <li>große Achsabstände überbrückbar</li> <li>geringe Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>schlechte Akustik</li> <li>Drehrichtungsumkehr erfordert Umlenkrad</li> <li>Drehzahlbeschränkung aus max. zulässigen Kettengeschwindigkeiten (bei Ausgleich 2. Ordnung)</li> <li>Översorgung erforderlich (Spanner, ggf. Spritzdüsen)</li> <li>Mindestachsabstand (Kettenführungsschienen)</li> </ul>
Zahnriemen	<ul style="list-style-type: none"> <li>gute Akustik</li> <li>große Achsabstände überbrückbar</li> <li>geringe Kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>niedrige Lebensdauer</li> <li>Drehrichtungsumkehr erfordert zweiseitig verzahnten Riemen und Umlenkrad</li> <li>Zusätzliche Abdichtungen für Wellendurchtritte</li> </ul>
Zahnrad	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Lebensdauer</li> <li>Drehrichtungsumkehr</li> <li>als Unwuchtträger nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>schlechte Akustik</li> <li>Beschränkungen im Achsabstand</li> <li>große Masse</li> <li>hohe Kosten</li> </ul>

**Table 1:** Vor- und Nachteile verschiedener Antriebsarten für Ausgleichswellen [1]

der Massenausgleich mit Hilfe eines Excel-Sheets bestimmt. Diese Kontur wurde unter Zuhilfenahme eines FEM-Programms mehrfach optimiert.

### 2.2. Ausgleichswellen

Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe der Gleichungen (2) und (3) die Größe der exzentrischen Massen der Ausgleichswellen ermittelt und im CAD-System entsprechend modelliert. Zum Antrieb dieser Wellen sind verschiedene Übertragungsarten (z. B. Steuerkette, Riementrieb oder Stirnradgetriebe) möglich. Gewählt wurde die zwar in der Anschaffung teurere Variante des Stirnradgetriebes, welche allerdings aus wartungstechnischer Sicht sowie aufgrund der einfacheren Drehrichtungsumkehrung deutliche Vorzüge bietet. Eine differenziertere Betrachtung hierzu ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Das in der Tabelle 1 erwähnte Kriterium der Akustik ist für den Prüfstandbetrieb nicht entscheidend. Daher fiel die Wahl auf geradzahnte Zahnräder, welche den zusätzlichen Vorteil einer nahezu axialkraftfreien Wellenlagerung bergen. Um eine symmetrische Anordnung der Ausgleichswellen bezüglich der Kurbelwellenachse zu erreichen, ist es nötig, eine Zwischenwelle einzufügen. Durch diese symmetrische Anordnung der Ausgleichswellen entsteht kein zusätzliches Kippmoment.



**Bild 5:** Ausgleichswelle 1. Ordnung mit „Austauschmassen“

### 2.3. Variabilität

Das Prüfstandkonzept sieht vor, jede Unwuchtmasse (Gegengewicht der Kurbelwelle, Gewichte an den Ausgleichswellen) so zu gestalten, dass auf geänderte Randbedingungen (z. B. anderer Kolben, anderes Pleuel) entsprechend reagiert werden kann. Die zentrale Überlegung hierfür ist ein möglichst einfaches Handling der variablen Gewichte. Im Detail wurde dies durch axiale Bohrungen bewerkstelligt, in die Zylinder mit unterschiedlichen Massen eingesetzt werden können (vgl. Bild 5).

Die Variabilität bei den Massen dieser Einsteckzylinder wird erreicht durch eine im Durchmesser veränderliche Mittenbohrung und/oder durch Verwendung von Werkstoffen anderer Dichte. Der Vorteil an diesem Konzept ist die stets gleiche Schwerpunktlage des veränderlichen Gewichts im Bezug zur jeweiligen Wellenachse.

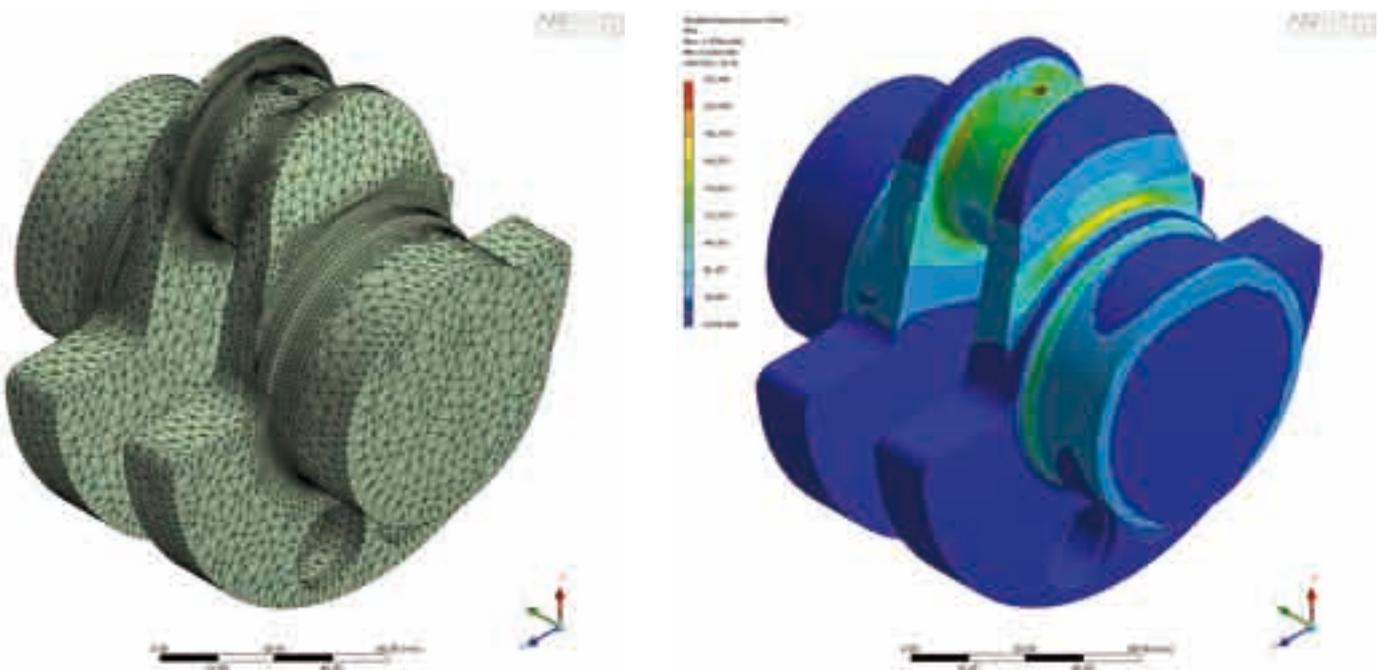
**2.4. Schwungscheibe**

Der letzte Schritt des Entwicklungsprozesses umfasst die Auslegung der Schwungscheibe. Hierbei sind insbesondere zwei gegenläufige Anforderungen zu erfüllen. Zum einen muss die Schwungscheibe ein möglichst großes Massenträgheitsmoment aufweisen. Zum anderen muss die Schwungscheibenverschraubung so dimensioniert werden, dass sie bei einem Notstopp die auftretenden Momente ohne Beschädigung der Schrauben erträgt. Aufgrund der Abmessungen des verwendeten Dichtrings im Kurbelgehäuse ist allerdings der maximal mögliche Teilkreis und somit auch die Anzahl und die Größe der einsetzbaren Schrauben sehr eingeschränkt. Mit dem getroffenen Kompro-

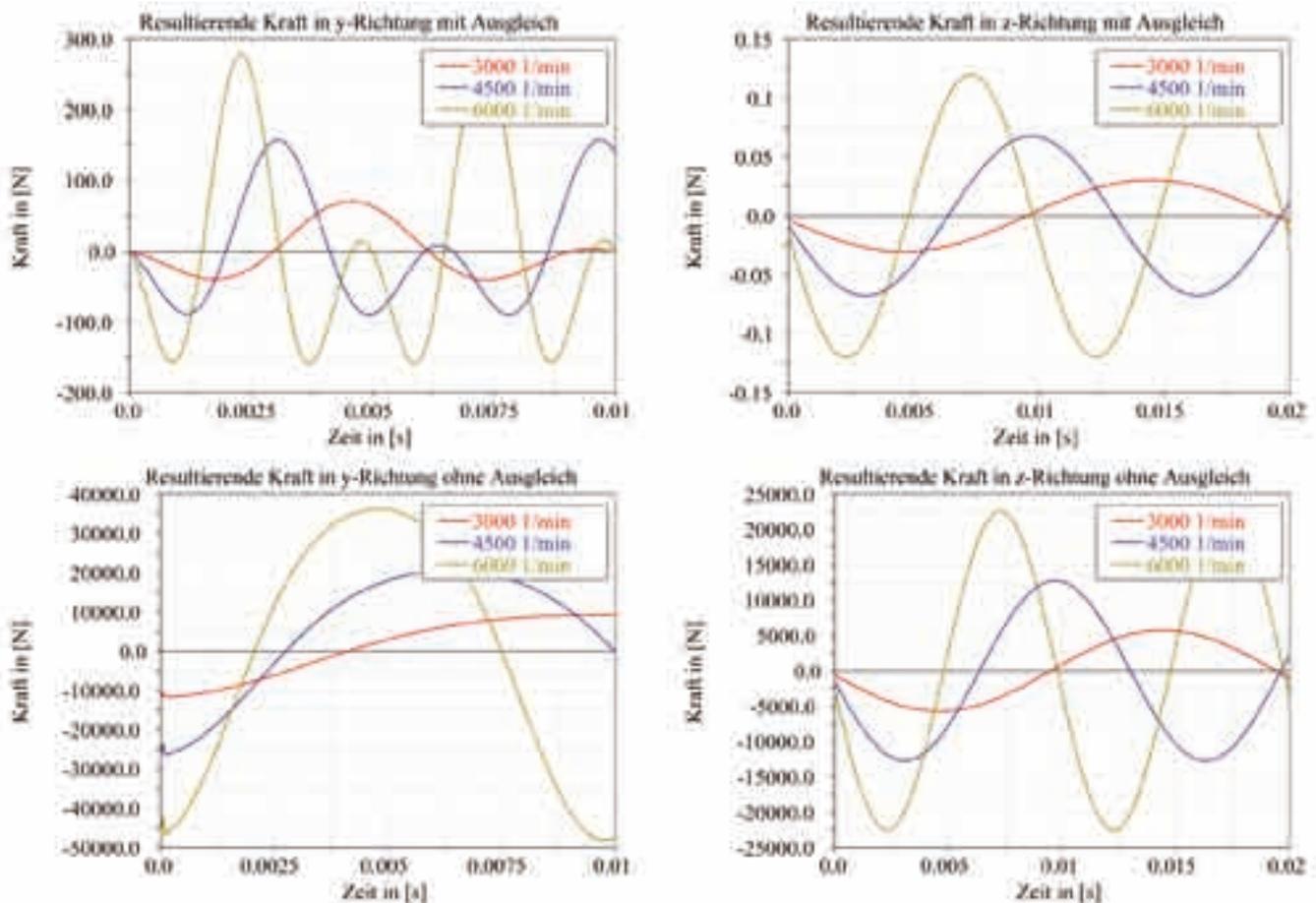
miss konnte ein Ungleichförmigkeitsgrad  $\delta = 1/233$  bei 4500 1/min erreicht werden. Vergleicht man nun diesen Ungleichförmigkeitsgrad mit Werten aus der Literatur [2], welche in einem Bereich zwischen 1/150 und 1/300 für Fahrzeugmotore liegen, so zeigt sich eine relativ hohe Güte des erreichten Ungleichförmigkeitsgrads für diesen Prüfstandmotor. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass im realen Prüfstandbetrieb ein besserer Ungleichförmigkeitsgrad erwartet werden kann, da weitere mitrotierende Massen, wie z. B. die Wirbelstrombremse, den Ungleichförmigkeitsgrad positiv beeinflussen.

**3. VERWENDETE BERECHNUNGSVERFAHREN**

Bereits zu Beginn der Konstruktion der Kurbelwelle, können mit Hilfe von ersten FE-Analysen die hoch belasteten kritischen Bereiche der Kurbelwelle ermittelt werden. So besteht die Möglichkeit, Schwachstellen bereits sehr früh zu erkennen und durch entsprechende Modifikation der Geometrie zu beheben. Es zeigt sich, dass bei den gegebenen Randbedingungen der kritische Bereich am Pleuelzapfen liegt (Bild 6).



**Bild 6:** Ergebnisse der FEM-Analyse



**Bild 7:** Resultierende Kräfte an der Motoraufhängung mit und ohne Ausgleich bei unterschiedlichen Drehzahlen

Angesichts der unveränderlichen Vorgaben, können die hohen Spannungen nur durch hochfeste Werkstoffe bei einer geeigneten Wärmebehandlung ertragen werden. Auch zeigt sich bei der Betrachtung der zulässigen Festigkeiten ein signifikanter Einfluss der Oberflächenbehandlung auf den Sicherheitsfaktor.

Um auch den dynamischen Problemstellungen gerecht zu werden, wurde während der Konstruktionsphase das Mehrkörpersimulationsprogramm MSC.Adams eingesetzt. So konnte die relativ grobe Auslegung der Gegen- und der Ausgleichsmassen mit Hilfe des Excel-Sheets, durch den Einsatz des MKS-Programmes, optimiert werden. Das Ergebnis der Optimierung der resultierenden Kräfte auf die Motoraufhängung in y- und in z-Richtung (siehe Bild 1) vor und nach dem Massenausgleich zeigt sich in Bild 7. Hierbei sind vor allem die verminderten Amplituden der Kräfte zu beachten.

Bei der Ermittlung der Ausgleichsmassen ist es ausreichend, den gesamten Kurbeltrieb über einen Antrieb mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im MKS-Programm anzutreiben. Im Gegensatz dazu muss zur Auslegung der Schwungscheibe der Druckverlauf eines Diesellaggregates berücksichtigt werden. Dieser Druckverlauf simuliert den vollständigen Zyklus eines 4-Takt-Motors und verursacht somit die Schwankungen in der Winkelgeschwindigkeit. Damit ist es möglich, den Ungleichförmigkeitsgrad zu ermitteln.

**4. ZUSAMMENFASSUNG**

Bei der Entwicklung des Kurbelwellentriebs für einen Einzylinder-Prüfstandmotor kommt durch Anwenden des Lanchester-ausgleichs eine deutlich erhöhte Laufruhe des Motors zustande. So konnte die Kraftamplitude in Querrichtung (y-Richtung)

von ca. 20400 N auf 160 N und in vertikaler z-Richtung von 12700 N auf 0,1 N bei einer Drehzahl von 4500 1/min reduziert werden. Dies wird sich vor allem für den Einsatz der Messtechnik am Motor als sehr förderlich erweisen. Dabei liegt vor allem in der zusätzlichen Variabilität des ausgelegten Massenausgleichs der große Vorteil. Der Prüfstandmotor kann mit anderen Kolben- und/oder Pleuelgeometrien betrieben werden, ohne dass dabei, bei entsprechender Anpassung, die Laufruhe darunter leidet. In Tabelle 2 ist der Variationsbereich der rotierenden bzw. oszillierenden Massen angegeben. Dabei sind die Werte der oszillierenden sowie rotierenden Massen stets auf den Pleuelzapfen reduziert. Für diese Bereiche kann ein vollständiger Massenausgleich realisiert werden. Damit wird sichergestellt, dass dieser Prüfstand auch für zukünftige Jahre gerüstet ist.

	Min.	aktuelle Masse	Max.
<b>Rotierende Massen</b>	-192 g	1291 g	+432 g
<b>Oszillierende Massen</b>	-147 g	1124 g	+271 g

**Tabelle 2:** zulässiger Bereich der rotierenden und oszillierenden Gesamtmassen

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer**

Tel.: 0941 943-5179

Fax: 0941 943-1428

thomas.schaeffer@maschinenbau.fh-regensburg.de

**Prof. Gernot Langeloth**

Tel.: 0941 943-5174

Fax: 0941 943-1428

gernot.langeloth@maschinenbau.fh-regensburg.de

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

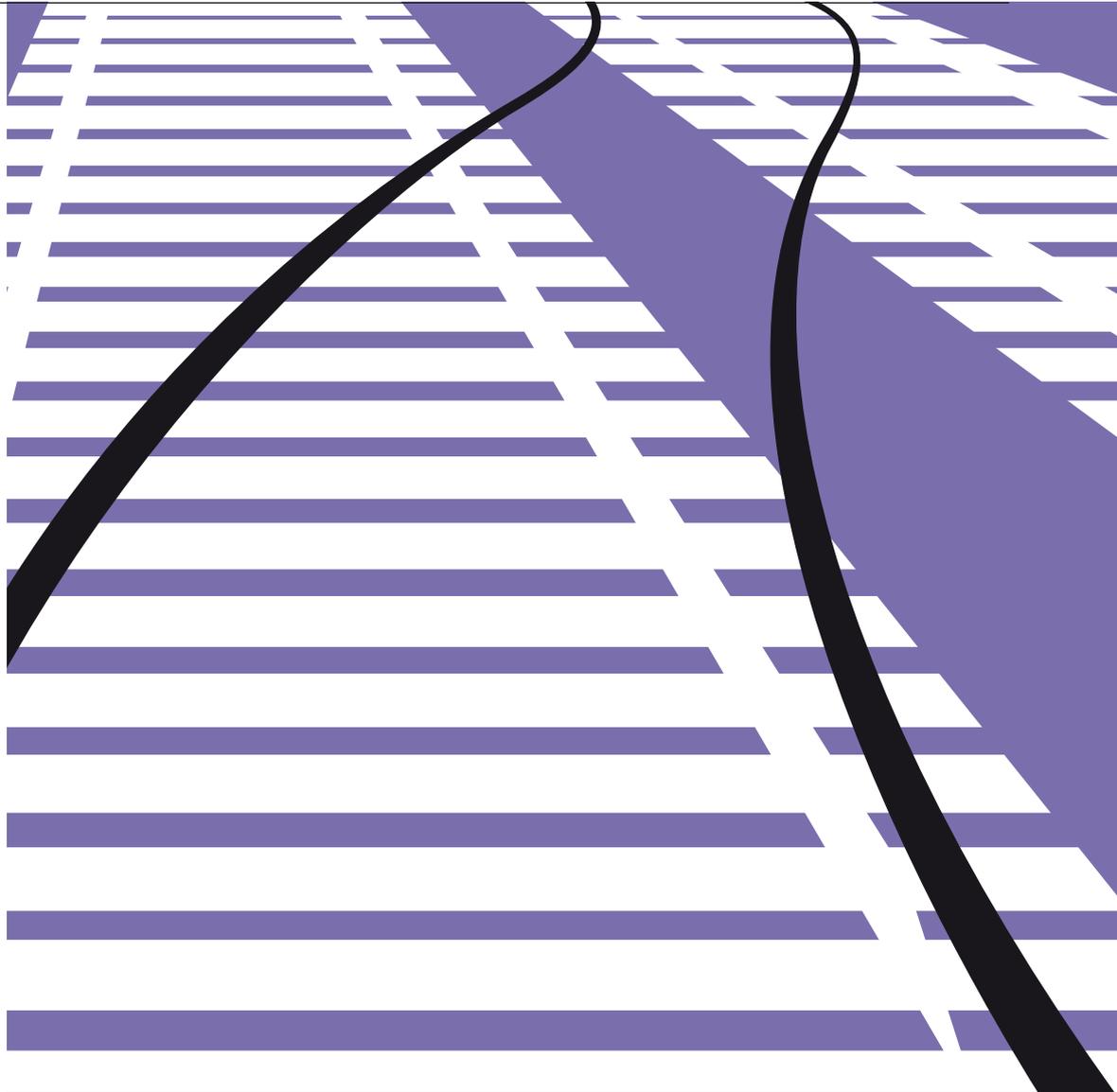
Tel.: 0941 943-5164

Fax: 0941 943-1428

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

**5. SCHRIFTTUM**

- [1] Die Entwicklung von Massenausgleichseinrichtungen für Pkw-Motoren, in MTZ, 05/2003, S. 2 ff.
- [2] A. Meyer-Eschenbach: Schubkurbeltriebe, Technische Universität Berlin, Vorlesungsskript



## Die richtigen Weichen stellen

... für eine sichere Zukunft. Sie haben Freude daran, Ihr Wissen und Ihre Kreativität in ein weltweit tätiges Unternehmen einzubringen, das in der Abfüll- und Verpackungstechnik die Trends setzt.

Erleben Sie, dass Sie mit Begeisterung eine Menge bewegen können. Einmal den richtigen Weg eingeschlagen, stellt KRONES sicher, dass Ihre Fähigkeiten gefördert und Ihre Leistungen gewürdigt werden.



>>> **DIE KOMPETENZ  
UNSERER MITARBEITER  
BESTIMMT DEN ERFOLG  
DES UNTERNEHMENS**

Nähere Informationen über Praktika und  
aktuelle Diplomarbeitsthemen finden Sie unter  
[www.bhs-corrugated.de](http://www.bhs-corrugated.de)

>>> *Because we love what we do.*

BHS CORRUGATED .. MASCHINEN- UND ANLAGENBAU GMBH .. PERSONALABTEILUNG

Paul-Engel-Strasse 1  
92729 Weiherhammer

/ PHONE .. + 49.9605.919-660  
/ FAX .. + 49.9605.919-675

/ MAIL .. [human\\_resources@bhs-corrugated.de](mailto:human_resources@bhs-corrugated.de)  
/ WEB .. [www.bhs-corrugated.de](http://www.bhs-corrugated.de)

**Seit über 55 Jahren  
Ihr leistungsstarker Partner**



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

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

-  Reinigung und Hygiene
-  Industriewartung
-  Umweltpflege
-  Sicherheitsdienst
-  Personalleasing
-  Catering
-  Technisches Gebäudemanagement

**Götz-Gebäudemanagement RSL  
GmbH & Co KG**  
Hofer Straße 10, 93057 Regensburg  
Tel. (09 41) 64 04-0, Fax: (09 41) 64 04-190  
[www.goetz-dienste.com](http://www.goetz-dienste.com), [goetz@goetz-dl.de](mailto:goetz@goetz-dl.de)

# FE-SIMULATION UND MESSUNG DER MECHANISCHEN BEANSPRUCHUNGEN AN BAUELEMENTEN BEIM TRENNVORGANG VON BESTÜCKTEN LEITERPLATTEN

## 1 EINLEITUNG

Elektronische Schaltungen auf Leiterplatten werden in so genannten Nutzen bestückt, gelötet und geprüft. Im weiteren Produktionsprozess werden die Nutzen mechanisch voneinander getrennt. Zur Untersuchung der unterschiedlichen Trennverfahren hinsichtlich der eingeleiteten Belastungen wird eine geeignete Messmethode benötigt.

Die Entwicklung und Qualifikation des Verfahrens zur Strukturanalyse wird im Rahmen einer Diplomarbeit wie folgt durchgeführt:

1. Ermittlung möglicher Gefahrenquellen und Einflussfaktoren, die eine Gefährdung der Baugruppe beim Nutzentrennen darstellen könnten.
2. Recherche über in Betracht kommende Methoden und ihre Beurteilung hinsichtlich ihrer Eignung.
3. Durchführung der Messungen mit einer ausgewählten Messmethode und Auswertung der Messergebnisse.
4. Unterstützend werden mit der Finite-Elemente-Methode Simulationen zur Berechnung des Beanspruchungszustandes in der Leiterplatte und dem Bauelement durchgeführt. Die Berechnungen wurden für quaderförmige Bauelemente, wie z.B. Keramik-Bauelemente durchgeführt. Als Stoffwerte für die FE-Simulation wurden die Daten bekannter Hersteller (z. B. Murata) herangezogen. Das mechanische Verhalten des Keramikwerkstoffs entspricht dabei weitgehend den Werkstoffmodellen für spröde Körper. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm besteht demnach nur aus einem linear-elastischen Bereich. Folglich treten keine plastischen Verformungen auf, und der Werkstoff ist unfähig, mechanische Spitzenbeanspruchungen durch lokale plastische Verformungen abzubauen.

## 2 AUSWAHL DER UNTERSUCHUNGSMETHODE

Aus der Vielzahl der in die Betrachtung einbezogenen Methoden und Sensoren – wie z.B. Reisslack, Hochgeschwindigkeitsbildaufzeichnung, Spannungsoptik, Beschleunigungs-

<sup>1)</sup> Dipl.-Ing.(FH), Absolvent der FH Regensburg, Studiengang Maschinenbau

<sup>2)</sup> Dipl.-Ing., Siemens VDO AG

<sup>3)</sup> Prof. Dr.-Ing., FH Regensburg, Fakultät Maschinenbau

sensoren, Laservibrometer, Dehnungsmessstreifen – wird aufgrund der Untersuchung der Einflussfaktoren, die beim Nutzentrennen die Bauteile schädigen können, ein geeigneter Sensor ausgewählt.

### Anforderung an das Messverfahren:

- Messung von Dehnungen, die beim Nutzentrennen auf das Bauelement wirken.
- Hohe Abtastfrequenz des Sensors, um auch die impulsartigen Belastungsspitzen erfassen zu können.
- Sensoren mit geringer Masse um die Ergebnisse nicht durch die Eigenmasse des Sensors zu verfälschen.
- Kleine Messsensoren vgl. mit der Größe des Bauelementes.
- Korrelation des Messwertes zur Belastung des Bauteils muss gegeben sein.

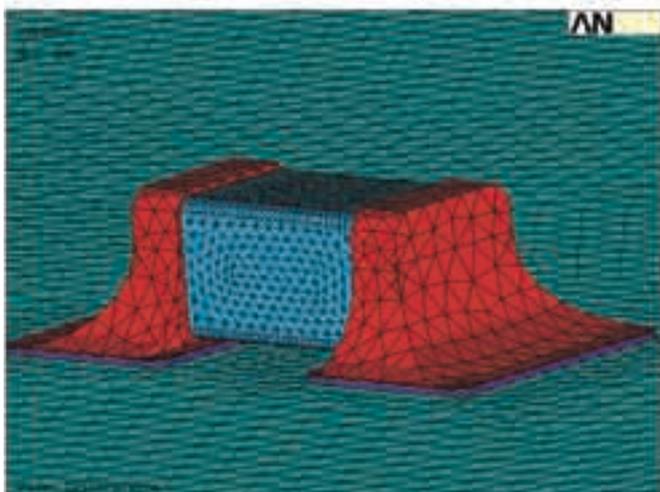
Da die in Frage kommenden Messverfahren die gestellten Anforderungen nicht in vollem Umfang erfüllen können, wird für die Untersuchungen eine Kombination aus DMS-Messtechnik und FEM-Simulation angewendet. Dabei wird zunächst eine auf Biegung beanspruchte Leiterplatte mit einem Bauelement und seinen Baugruppen mit der Finite-Elemente-Methode analysiert. Die durch die Simulation gewonnenen Erkenntnisse werden für die Auswahl der DMS-Applikationsstelle herangezogen. Durch Anpassung der Simulationsergebnisse an die DMS-Messwerte an diskreten Messorten kann dann für die Umgebung, die für eine DMS-Applikation nicht zugänglich ist, eine Aussage für den Spannungs- und Verzerrungszustand gemacht werden. Nach der Validierung der Analyseverfahren im Biegeversuch kann mit den gewonnenen Erkenntnissen das eigentliche Problem, die Analyse des Trennvorgangs sowohl mit der DMS-Messung als auch mit der FE-Simulation vorgenommen werden.

## 3 FE-SIMULATION DER LEITERPLATTENBIEGUNG

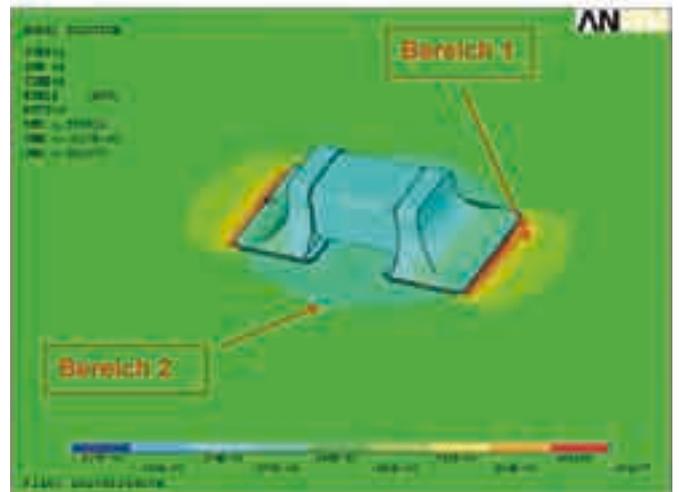
Durch eine FE-Simulation wird das Biege-Bruchverhalten der Bauelemente analysiert. Als Simulationsmodell wird eine Leiterplatte, die mit einem Bauelement bestückt ist, betrachtet. Das 3D-Solid Modell umfasst die in der Tabelle aufgeführten Baugruppen, die entsprechend ihrer geometrischen Abmessungen mit unterschiedlich großen Elementkantenlängen diskretisiert werden (Bild 1 und 2).



**Bild 1:** Gesamtmodell des Bauelements auf Leiterplatte



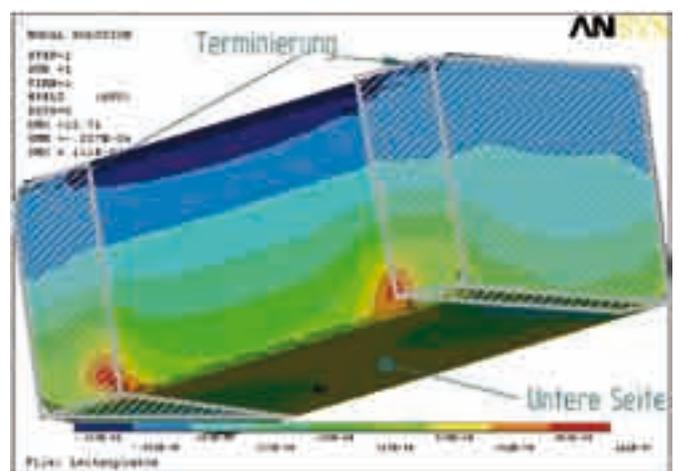
**Bild 2:** FE-Diskretisierung



**Bild 3:** Längs-Dehnungsverlauf (Z-Richtung) an der Leiterplattenoberfläche

Die Positionierung der Randbedingungen wird in Bild 1 dargestellt. Die Belastungsaufbringung erfolgt durch Verschieben der beiden inneren Auflagerpunkte in y-Richtung, was zu einer Verbiegung der Leiterplatte führt. Die daraus resultierenden Dehnungen an der Oberfläche der Platte werden ausgewertet und in Bezug zur berechneten Beanspruchung im Bauelement und den weiteren Baugruppen gesetzt.

Baugruppen	ANSYS Elementtyp	ESIZE – Elementkantenlänge [mm]
Bauelement	solid95	0,1
Lot	solid95	0,1
Kupferpad	solid95	0,1
Leiterbahn	solid92	0,5
Platine	solid92	3,0



**Bild 4:** Längsdehnungen (Z-Richtung) am Grundkörper des Bauelements

Als wesentliche Erkenntnisse aus den Simulationen lassen sich zusammenfassen:

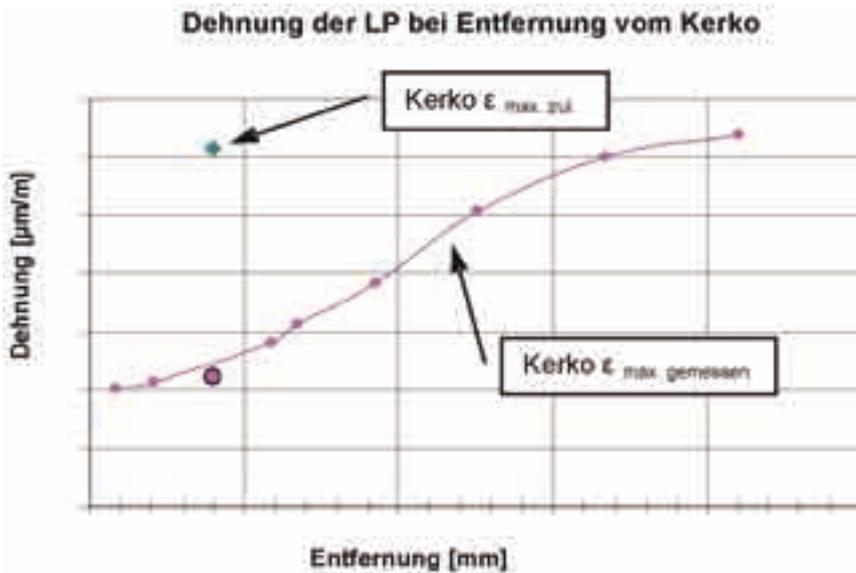
Das Bauelement bewirkt eine lokale Erhöhung der Steifigkeit der Leiterplatte. Dadurch ändern sich ebenfalls lokal die Dehnungen im Bereich des Bauelementes. Es können zwei Bereiche unterschieden werden (Bild 3). Bereich 1: Höhere Dehnungen der Leiterplatte in der Längsrichtung oberhalb und unterhalb des Bauelementes, sinkend mit zunehmendem Abstand vom Bauelement. Bereich 2: Geringere Dehnungen seitlich vom Bauelement.

In Bild 4 wird die Dehnung des Grundkörpers eines Bauelementes nach Ausblendung der Terminierung dargestellt. Die

obere Seite des Bauelementes wird geringfügig zusammengedrückt. Die Grundfläche erfährt eine Dehnung, die zum äußeren Rand der Terminierung hin ansteigt.

Die Schlifffbilder beschädigter Bauelemente bestätigen die Ergebnisse der FE- Simulation.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Biege-Bruchverhaltens der Bauelemente lassen auf den Ort der Applikation des DMS schließen. Die Anordnung der Baugruppe mit dem Bauelement auf der Dehnseite der gebogenen Leiterplatte bewirkt die maximale Belastung des Bauelementes. Die Bereiche mit den maximalen Belastungen befinden sich an

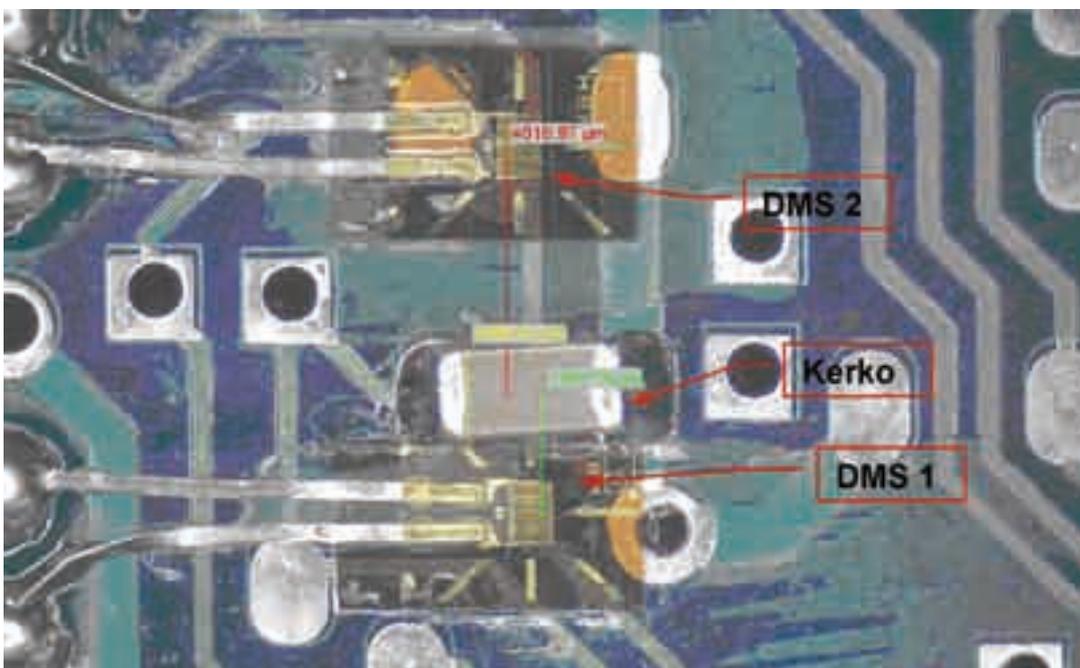


**Bild 5:** Ergebnisse aus der FE-Simulation und der DMS-Messung

den unteren Rändern des Keramikelements, die zum Rand der Terminierung hin ansteigen. Einen Sensor an dieser Stelle zu applizieren ist aber nicht möglich, da die Fläche nicht eben und zu klein ist. Der Ort, der eine Applikation ermöglicht, ist neben dem Bauelement auf der Leiterplatte. Um die Belastung, die dann tatsächlich am Bauelement wirkt, erfassen zu können, wird die in Bild 5 dargestellte Funktionslinie mit der FE-Simulation erstellt.

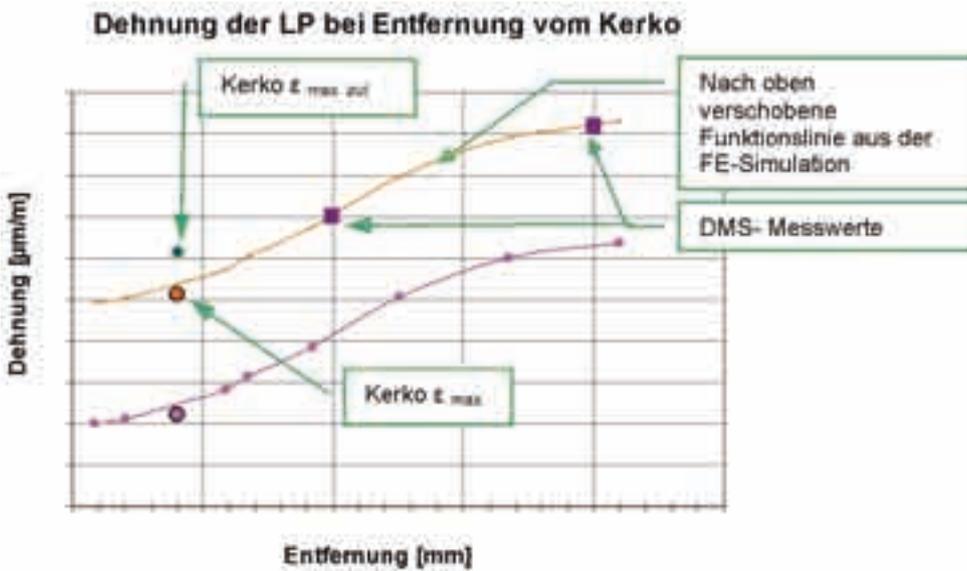
#### 4 DMS-MESSUNG DER LEITERPLATTENBIEGUNG

Basierend auf den Erkenntnissen aus der FE-Simulation können die Orte für die Applikation der Dehnungsmessstreifen (DMS) festgelegt werden (Bild 6). Für die Messungen werden DMS in unterschiedlichen Abständen seitlich vom Bauelement appliziert (DMS 1 und 2). Ein dritter DMS wird als Referenz auf der Leiterplatte außerhalb des Einflussbereiches



**Bild 6:** DMS-Applikationsstellen auf der Leiterplatte

**Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann**  
 Tel.: 0941 943-5160  
 Fax: 0941 943-1428  
 claus.schliekmann@maschinenbau.fh-regensburg.de



**Bild 7:** Dehnung der Leiterplatte vs. Entfernung vom Bauelement

des Bauelements aufgebracht. Durch die Verbiegung der Leiterplatte in der Vier-Punkt-Aufnahme lässt sich eine gleichmäßige Dehnung der Oberfläche erzielen. Die Übertragung der spezifischen Funktionslinie (Bild 5) auf die DMS-Messwerte ergibt die tatsächliche Funktionslinie in Bild 7.

maximal zulässigen Beanspruchungen der Komponenten erfolgen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass mit der FE-Simulation Beanspruchungen an den Stellen im Bauteil ermittelt werden können, die für eine DMS-Applikation nicht zugänglich sind.

**6 ZUSAMMENFASSUNG**

Ziel der Untersuchungen ist die Analyse des Trennvorgangs von bestückten Leiterplatten. Dabei wurde ermittelt, wie hoch die mechanischen Beanspruchungen für die nahe der Trennlinie positionierten Keramikcondensatoren werden können. Es wurde ein Verfahren entwickelt, das geeignet ist, Aussagen über den Beanspruchungszustand zu machen. Für die Ermittlung der Beanspruchungen an den Komponenten wurde ein kombiniertes Verfahren aus FE-Simulation und DMS-Messung angewandt und die Dehnung als Beanspruchungsgröße verwendet. Durch sie kann eine direkte Zuordnung des gemessenen bzw. berechneten Wertes zu den

# UNTERSUCHUNG DES SCHWINGUNGSVERHALTENS VON MITTELSCHNELL-LAUFENDEN GROSSDIESELMOTOREN IM HINBLICK AUF DIE LAGE DER EIGENFREQUENZEN UND SCHWINGFORMEN IN MESSUNG UND BERECHNUNG

## 1 EINLEITUNG

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Grundlagenforschung zur Anpassung der Berechnungsmodelle an die bei Messungen ermittelten Schwingformen und Eigenfrequenzen von Großdieselmotoren während des Motorbetriebs. Eine Optimierung der FE-Modelle ist notwendig, um bereits während der Entwicklungsphase verlässliche Aussagen zu den auftretenden Eigenfrequenzen zu ermöglichen.

Im Zuge der Anforderungen, die ein Schiff erfüllen muss, fällt der Blick unausweichlich auch auf die Antriebsaggregate. Es werden höchste Ansprüche an die mechanischen Eigenschaften, die Leistungsdaten und die Emissionen gestellt. Zu den Emissionen gehört nicht nur der Schadstoffausstoß sondern auch die Schwingungsemission. Die hohen Komfortansprüche auf Passagierschiffen und die Verbesserung der Arbeitsbedingungen auf Frachtschiffen stellen große Anforderungen an das Können der Ingenieure. Eine besonders kritische Situation der Schwingungsanregung ergibt sich im Zusammenhang mit den Eigenfrequenzen von Schiffsteilen und des Motors. Liegt eine Eigenfrequenz des Motors im Betriebsdrehzahlbereich, so werden die Erregerkräfte dynamisch überhöht in das Fundament eingeleitet. Dies kann dazu führen, dass die Eigenfrequenzen von Schiffswänden, Schiffstrukturen etc. besonders stark angeregt und zum Schwingen gebracht werden, was wiederum zu unangenehmen Geräuschen oder Vibrationen an Bord des Schiffes führt. Werden solche Resonanzen besonders stark angeregt, kann dies auch zu Schäden am Motor, an Motorbauteilen oder an der Schiffstruktur führen [5].

Um diesen Fall zu vermeiden, werden die Motoren bzgl. ihres Schwingungsverhaltens messtechnisch untersucht. Die Messtechnik nimmt auf dem Gebiet der Schwingungstechnik einen hohen Stellenwert ein. Mit den heute zur Verfügung stehenden modernen Messmitteln kann das real auftretende Schwingungsverhalten aufgezeichnet und untersucht werden.

Durch die Unterstützung moderner Rechner und entsprechender Software kann eine Untersuchung des Schwingungsverhaltens ebenfalls vorab an Motormodellen am PC durchgeführt werden.

## 2 GRUNDLAGEN

Bei den untersuchten Motoren handelt es sich um mittelschnelllaufende Viertakt Dieselmotoren der Firma MAN Diesel SE in Augsburg. Die Motoren haben ihr Einsatzgebiet im Bereich der Schiffsantriebe, der Energieversorgung an Bord von Schiffen, sogenannten GenSets und im Bereich von Dieselmotoren. Mit diesen Großdieselmotoren kann eine Leistung von 450 KW bis 23850 KW bereitgestellt werden. Je nach Motor, Einsatzzweck bzw. Einsatzort und Kundenwunsch kommen unterschiedliche Lagerungsarten zum Einsatz.

### Lagerarten:

- Elastische Lagerung: Bei dieser Art der Lagerung wird der Motor auf eine Vielzahl elastischer Elemente, z.B. Gummielemente, gesetzt. Die Anbindung zum darunter liegenden Fundament ist sehr weich, dadurch ist der Motor weitestgehend vom Fundament abgekoppelt. [1]
- Halbelastische Lagerung: Die halbelastische Lagerung wurde von der starren Lagerung abgeleitet. Der Motor steht dabei auf Stahlelementen mit genau definierter Vertikalsteifigkeit. Durch die halbelastische Lagerung ist eine gezielte Verschiebung von Eigenfrequenzen möglich.
- Starre Lagerung: In diesem Fall wird der Motor starr mit dem Fundament verbunden. Dies geschieht in der Regel durch die Verschraubung des Motors mit dem Fundament.

## 3 MESSTECHNISCHE ERMITTLUNG VON MOTOREIGENFREQUENZEN

Zur Ermittlung der Eigenfrequenzen wird eine sog. Betriebschwingungsanalyse durchgeführt. Der Motor und die Aufladegruppe wird dazu mit Messaufnehmern, sogenannten Schwinggeschwindigkeitsaufnehmern, versehen. Diese zeichnen die Geschwindigkeiten an den jeweiligen Messpunkten innerhalb eines Zeitintervalls auf. Eine Variation der Anregungsfrequenz wird durch die Regulierung der Drehzahl erreicht. Man unterscheidet dabei zwischen Leerlauf- und Propellerregulierung. Bei der Leerlaufregulierung wird der Motor nicht durch ein Moment belastet, während bei der Propellerregulierung der Motor mit einer Last beaufschlagt wird. Ein Tiefpassfilter sorgt dafür, dass alle Frequenzen größer 1,0 kHz herausgefiltert werden. Die Kanalabstastfrequenz sollte dabei mindestens viermal so groß sein wie die Filterfrequenz, um Aliasing-Effekte zu vermeiden. [2]

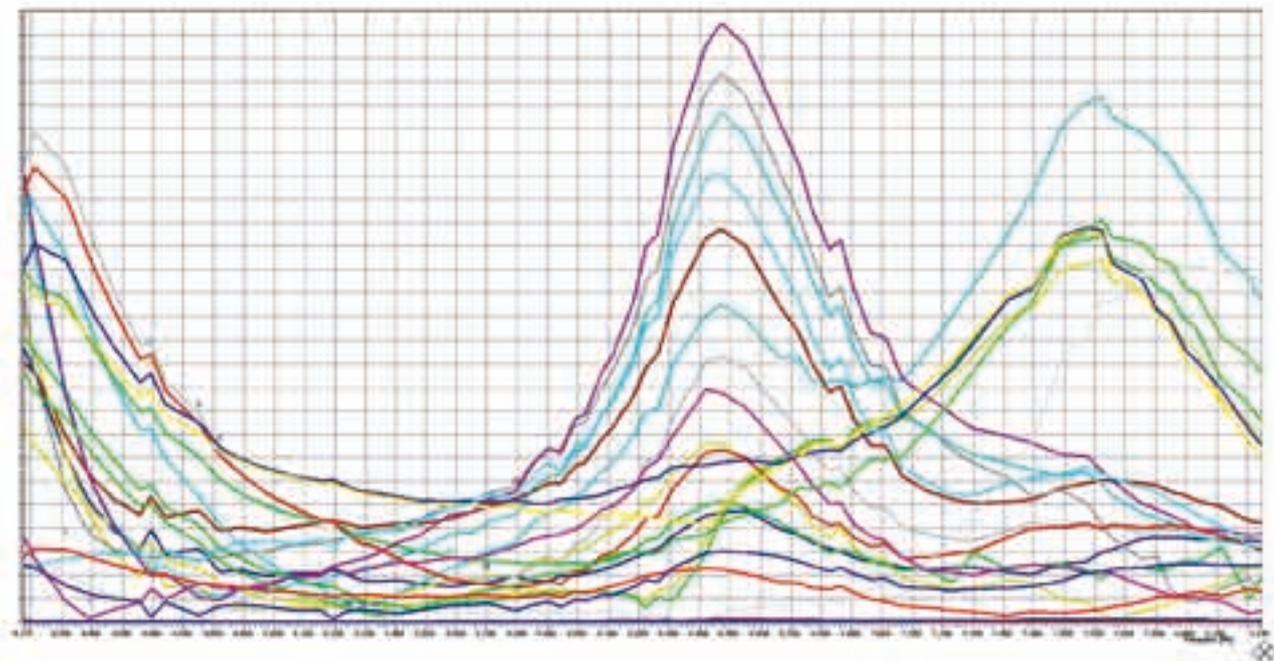
Die aufgezeichneten Zeitsignale werden mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) in eine Fourierreihe entwickelt.

<sup>1)</sup> Dipl.-Ing. (FH), Absolvent der FH Regensburg

<sup>2)</sup> Dr.-Ing., MAN Diesel SE, Augsburg

<sup>3)</sup> Dipl.-Ing., MAN Diesel SE, Augsburg

<sup>4)</sup> Prof. Dr.-Ing., FH Regensburg, Fakultät Maschinenbau



**Bild 1:** Diagramm – Geschwindigkeit über die Frequenz  $v(f)$

Die auf diese Art und Weise entstandenen Diagramme (Bild 1) werden dazu verwendet, um Eigenfrequenzen in Form von Resonanzpeaks der Amplitudengänge zu lokalisieren. Allerdings ist zu beachten, dass nicht jeder Anstieg eine Eigenfrequenz bedeutet. Diese Überhöhung kann auch durch plötzliche Laständerung oder ordnungsspezifisches Verhalten entstehen.

#### 4 FE-MODELLE DER MOTOREN

Das Schwingungsverhalten von elastischen Systemen wird grundsätzlich von drei Parametern beeinflusst [3]:

- die Systemsteifigkeit  $c$
- die Systemmasse  $m$
- die Systemdämpfung  $d$

Die Größen  $c$  und  $m$  haben großen Einfluss auf die Lage der Eigenfrequenz. Der Parameter  $d$  hat hauptsächlich Auswirkungen auf die Schwingungsamplitude und die Breite

des Resonanzgebietes. Da eine Berechnung für ein so kompliziertes System wie ein Motorgestell nicht mehr mit den einfachen Methoden der Mechanik möglich ist, wird auf die Berechnung mittels FEM zurückgegriffen.

Um die Erstellung und Vernetzung der Modelle nicht unnötig zu erschweren und die Berechnungszeit zu optimieren, weisen die FE-Modelle einen angepassten Idealisierungsgrad im Hinblick auf geometrische Details auf. Sie bestehen ausschließlich aus Schalenelementen und sind nicht bis ins letzte Detail modelliert. Die Lagerung, d.h. elastisch, halbbelastisch oder starr, wird bei der Modellierung ebenfalls berücksichtigt. Diese Modelle sind ausreichend, um gute Ergebnisse für die Schwingungsberechnung zu erhalten. Eine große Herausforderung stellt die Modellierung der Fundamente dar. Die Probestandfundamente sind meist sehr komplex aufgebaut, und die Geometrien und Steifigkeiten der Schiffsfundamente sind normalerweise nicht bekannt. Anhand der Modelle wird dann mit Hilfe des Programms

Ansys eine rechnerische Modalanalyse durchgeführt. Von den so ermittelten Eigenfrequenzen sind nur die mit einer Frequenz <100 Hz relevant. Die so entstandenen Daten werden anschließend mit der CAE Software FEMtools (siehe unten) bezüglich ihrer Schwingformen untersucht.

### 5 VERGLEICH DER GEMESSENEN UND BERECHNETEN EIGENFREQUENZEN

Insgesamt wurden 18 verschiedene Motoren untersucht, die sich durch folgende Kriterien unterscheiden:

- Bauart
- Zylinderzahl
- Zylinderanordnung (Reihen- oder V-Anordnung)
- Messstandort
- Lagerungsart

Die für jeden Motor erlangten Ergebnisse bezüglich Lage der Eigenfrequenzen aus Messung und Berechnung wurden miteinander verglichen. Die Kriterien dafür waren die Frequenzabweichung zwischen der gemessenen und berechneten Eigenfrequenz sowie die Ähnlichkeit der Schwingformen.

Eine Abhängigkeit der Frequenzunterschiede von der Anzahl der Zylinder oder der Zylinderabmessungen, ist beim Vergleich zwischen gemessener und berechneter Resonanzfrequenz nicht festzustellen. Allerdings kann für die unterschiedlichen Lagerungsarten eine Regelmäßigkeit festgestellt werden.

Je mehr der Motor durch die Lagerung vom Fundament abgekoppelt wird, desto geringer werden die Frequenzabweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Resonanzfrequenzen.

Die Lage der Resonanzfrequenzen ist stark abhängig von der Steifigkeit des Fundamentes und der Steifigkeit der Verbindungselemente zwischen Motor und Fundament. Eine Abhängigkeit vom Messstandort ist insofern gegeben, dass sich die Steifigkeiten der Probestände und Schiffsfundamente voneinander unterscheiden.

### 6 VERGLEICH DER SCHWINGFORMEN AUS MESSUNG UND BERECHNUNG MIT FEMTOOLS

FEMtools ist ein Programm der Firma DDS (Dynamic Design Solutions) und ist im Bereich der CAE-Anwendungen angesiedelt. FEMtools dient dazu, Mess- und Rechenergebnisse miteinander zu vergleichen oder auch Pre/Post Processor und Solver bedarfsspezifisch anzupassen.

*Grundbegriffe:*

MAC: Modal Assurance Criterion

Mode Shape: Modenform

Mode Shape Pair: Modenpaar

Node/Point Pairs: Knoten/Punkte-Paare

#### Der MAC-Wert

Der MAC-Wert ist ein Maß für die Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Schwingformen. Gebildet wird der MAC-Wert aus dem quadratischen Kosinus des Winkels zwischen zwei Modenformen. Die Formel dafür lautet [4]:

$$MAC(\psi_a, \psi_e) = \frac{|(\psi_a)^t \psi_e|^2}{(\psi_a)^t \psi_a (\psi_e)^t \psi_e}$$

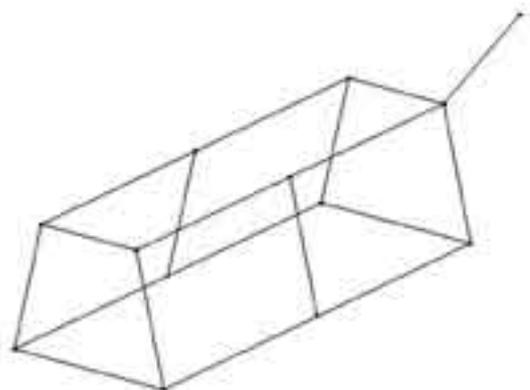
mit a: analytisch

e: experimentell

$\psi$ : Eigenvektor

t: transponiert

Der MAC-Wert beruht auf dem mathematischen Prinzip des Skalarprodukts. Die Auslenkungsvektoren aus dem Messmodell (Bild 2) und dem Rechenmodell werden auf diese Weise miteinander verknüpft. Ist das Skalarprodukt Null, dann stehen die Vektoren senkrecht aufeinander. Nimmt das Skalarprodukt den Wert eins an, so sind die beiden Vektoren parallel zueinander. Dies bedeutet wiederum eine ideale Korrelation zwischen den Schwingformen. Der MAC-Wert wird in % angegeben. Ein Wert von 100% bedeutet folglich eine optimale Korrelation. Gebildet wird der MAC-Wert aus allen Auslenkungsvektoren (FHG's) aller beteiligten Punkte eines Modenpaares.



**Bild 2:** Struktur des Messmodells

**Vorgehensweise in FEMtools**

Um die Daten der Messungen und Berechnungen mit FEMtools einlesen zu können, müssen sie in kompatiblen Formaten gespeichert werden. Das FE-Modell mit den dazugehörigen Eigenfrequenzen aus Ansys wird im CDB-Format abgelegt. Die Struktur der Messpunkte mit den hinterlegten Messdaten wird als UFF-File gespeichert.

- 1.Schritt: Einlesen des FE-Modells und der Resonanzfrequenzen in FEMtools.
- 2.Schritt: Einlesen der Messpunktstruktur.
- 3.Schritt: Bilden von sogenannten Node/Point Pairs. Hierbei werden entsprechende Punkte aus dem FE-Modell und dem Messmodell zusammengeführt, welche die gleiche Position repräsentieren.

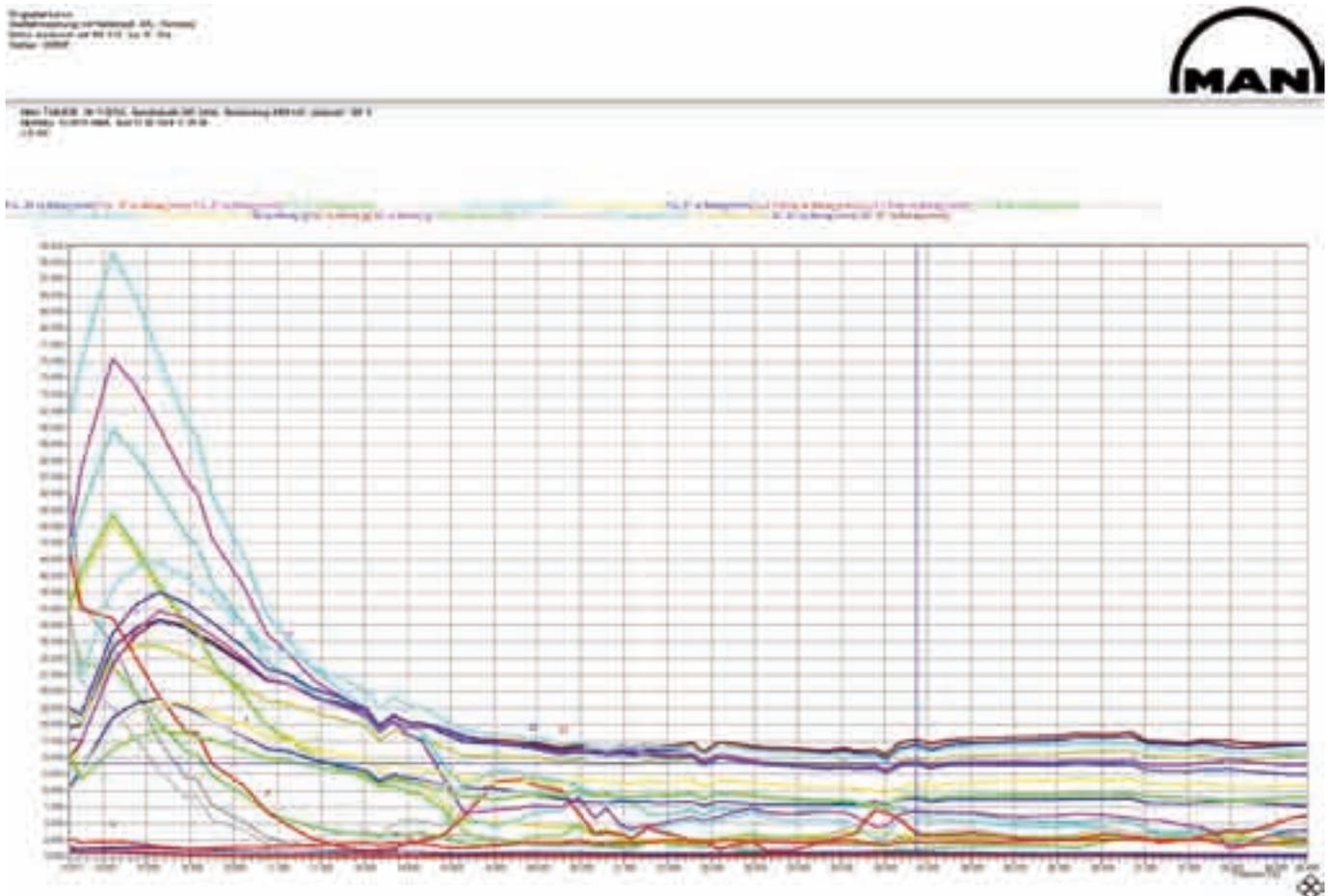
4.Schritt: Bilden von sogenannten Mode Shape Pairs. Hier werden diejenigen Schwingformen zu einem Paar zusammen gefasst, die sich laut der MAC-Wert Berechnung am ähnlichsten sind.

**Einflüsse auf den MAC-Wert**

Die Höhe des MAC-Wertes, der sich beim Vergleich von Mess- und Berechnungsdaten ergibt, kann durch verschiedene Gegebenheiten beeinflusst werden.

*a) Lokale Einflüsse*

Da die Messpunktstruktur meist aus 8-10 Punkten besteht und jeder einzelne Punkt zum MAC-Wert beiträgt, kann ein einzelner Punkt den MAC-Wert stark beeinflussen. Wird zusätzlich zur Haupteigenfrequenz des Motorgestells noch eine Eigenfrequenz eines Bauteils oder einer Bau-



**Bild 3:** Überlagerung zweier Eigenfrequenzen bei einm Mittelschnellläufer in der 3,5ten Ordnung

gruppe lokal angeregt, so kann diese lokale Schwingform Einfluss auf den MAC-Wert nehmen. Ein entscheidender Faktor ist hier die Aufladegruppe, bestehend aus Konsole, Turbolader und Ladeluftkühler.

Nimmt die Aufladegruppe negativen Einfluss auf den MAC-Wert, so kann durch Ausschluss der betroffenen Messpunkte aus der Vergleichserstellung eine verbesserte Korrelation der Gestellschwingformen erreicht werden. Die Aufladegruppe muss dann allerdings gesondert untersucht werden.

#### b) Störung durch benachbarte Eigenfrequenzen

Liegen zwei oder mehrere Eigenfrequenzen nahe zusammen, so können sie sich gegenseitig beeinflussen. Dabei kommt es zu einer Überlagerung mehrerer Schwingformen. Ist die Anregung einer benachbarten Eigenfrequenz bei der eigentlich zu untersuchenden Resonanzfrequenz noch ausreichend groß, so kann die Korrelation zwischen gerechneten und gemessenen Moden negativ beeinflusst werden. Hieraus ergibt sich ein schlechter MAC-Wert.

In Bild 3 ist ein Auszug aus der Ordnungsanalyse des Programms MANalyzer zu sehen. MANalyzer ist ein Programm zur Auswertung und Verarbeitung von Messdaten. Position 1 zeigt eine Eigenfrequenz des Ladeluftkühlers bei 15,1 Hz. An Position 2, bei einer Frequenz von 15,6 Hz, ist eine Eigenfrequenz des Motorgestells zu finden. Die Anregung der Ladeluftkühler-Eigenfrequenz ist an dieser Stelle noch so groß, dass sie zu einer deutlichen Veränderung der Ladeluftkühlerbewegung in der Schwingform der Gestell-Resonanzfrequenz führt. Im Gegensatz zu Punkt a) handelt es sich hier nicht um unterschiedliche Schwingformen der Aufladegruppe, sondern um eine Überlagerung zweier Schwingformen, die zusammen zu einer neuen Bewegung der Aufladegruppe führen. Diese Veränderung wird im MAC-Wert sichtbar, allerdings kann allein aus dem MAC-Wert nicht auf eine Überlagerung zweier Eigenfrequenzen geschlossen werden. Hierzu muss die Ordnungsanalyse aus Bild 3 herangezogen werden.

#### c) Anregung einer Schwingform in verschiedenen Ordnungen

Die Eigenfrequenz einer bestimmten Schwingform wird oft in mehreren verschiedenen Motorordnungen angeregt. Hierbei spielt die anregende Ordnung bezüglich der Schwingformen eine wichtige Rolle. Wird eine Schwingform, z.B. Torsion, in verschiedenen Ordnungen angeregt, so können sich die Schwingformen im Vergleich durchaus etwas unterscheiden.

#### d) Anregungsstärke einer Resonanzfrequenz

Eine Eigenfrequenz einer bestimmten Schwingform wird oft in unterschiedlichen Ordnungen verschieden stark angeregt.

Die Stärke der Anregung spielt beim Vergleich in FEMtools normalerweise keine Rolle, da die Schwingformen zuvor normiert werden. Liegen allerdings zwei Eigenfrequenzen, die in derselben Ordnung angeregt werden, nahe zusammen, so spielt das Verhältnis der Anregungsstärken durchaus eine Rolle. Wird die eine Eigenfrequenz sehr stark angeregt, die andere dagegen nur sehr schwach, so ist der Einfluss der weniger stark angeregten Resonanzfrequenz eher gering. Die gegenseitige Beeinflussung wird deutlich größer, wenn beide Eigenfrequenzen ähnlich stark angeregt werden.

## 7 MODEL UPDATING

Mit dem Programm FEMtools besteht die Möglichkeit, ein Model Updating durchzuführen. Dazu können verschiedene Baugruppen, Elementtypen, usw. bestimmt werden, die bezüglich vorher festgelegter Parameter wie Federsteifigkeit, E-Modul, Schalendicke etc. variiert werden sollen. Ein Model Updating dient zur Anpassung und Verbesserung des bisherigen Modells, um den realen Gegebenheiten möglichst nahe zu kommen.

Das Model Updating beschränkt sich in dieser Arbeit auf die Anpassung der Aufladegruppe. Das Augenmerk liegt hier im Bereich der Anbindungssteifigkeiten zwischen Konsole, Turbolader, Ladeluftkühler und Motorgestell. Um die Steifigkeit zu beeinflussen, können unterschiedliche Parameter variiert werden. Diese sind:

- Federsteifigkeiten K der Anbindungen zwischen Konsole und Motor, zwischen Turbolader (TL) und Konsole und zwischen Ladeluftkühler (LLK) und Konsole in allen drei Raumrichtungen
- Elastizitätsmodul E
- Elementdicke H
- Poissonzahl NU

#### Vorgehensweise

1. Um ein Model Updating durchführen zu können, müssen die Grundschritte aus FEMtools bereits erfolgt sein (Bildung von Node/Point Pairs und Mode Shape Pairs)
2. Selektieren der Elemente, Baugruppen, etc., deren Parameter variiert werden sollen
3. Auswahl der Parameter, die variiert werden sollen (K, E, H, NU), dabei kann zwischen lokaler und globaler Variation unterschieden werden
4. Auswahl der Moden, auf die das Modell optimiert werden soll (z.B. Torsion, Querbiegung)

5. Festlegung der Optimierung auf die Frequenz oder auf die Frequenz und den MAC-Wert
6. Festlegung der Konvergenzkriterien und der Iterationszahl
7. Beginn des Model Updating

Der Updating Prozess wird nach Abarbeitung der eingestellten Iterationszahl oder nach Erreichen eines Konvergenzkriteriums beendet.

Weiterhin wurden folgende Einstellungen getroffen:

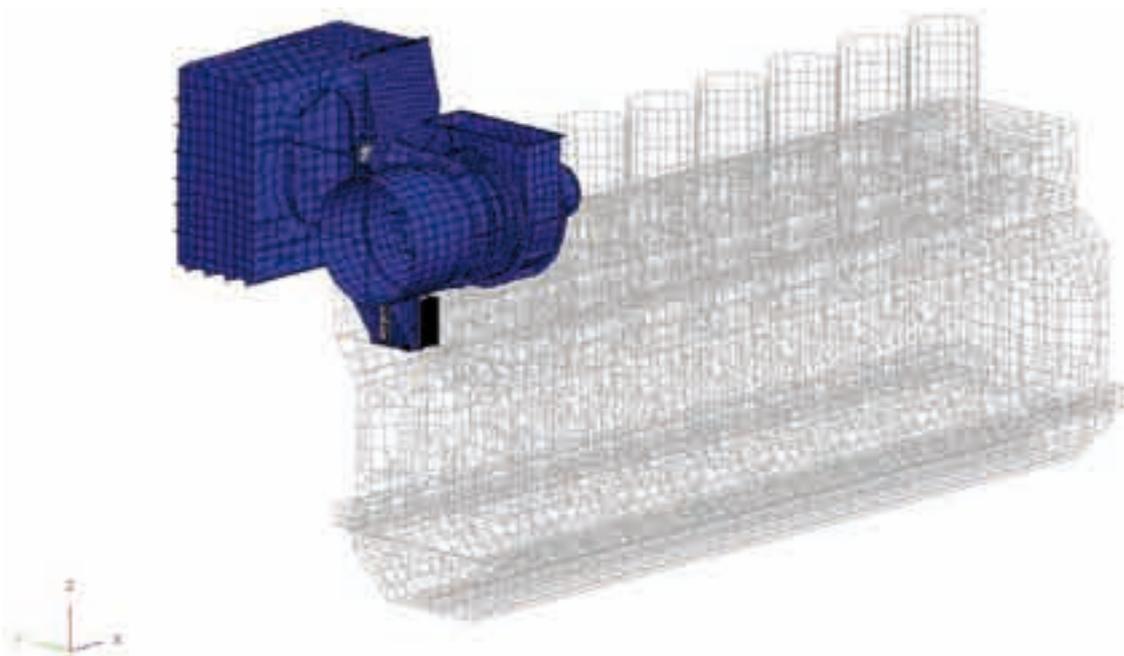
- Für die Variation der Parameter E, NU und H wurden alle Elemente der Aufladegruppe selektiert (siehe Bild 4).
- Die Variation der Parameter E, NU und H erfolgt lokal, d.h. jedes Element der Aufladegruppe kann einen anderen Parameterwert annehmen. Dies ist zwar physikalisch nicht immer sinnvoll, liefert aber einen guten Überblick über die Stellen, an denen eine Änderung effektiv ist.
- Die Federsteifigkeiten K werden nur global geändert, d.h. alle Federn innerhalb eines Anbindungsbereiches (Konsole-Motor, Konsole-TL, Konsole-LLK) haben die gleiche Federsteifigkeit. Die Steifigkeiten von Anbindungsbereich zu Anbindungsbereich können allerdings variieren.

Ziel des Model Updating war es, die Grundlagen zur Anpassung der Schwingformen und Bewegungen der Aufladegruppe zu erarbeiten, um so eine möglichst gute Übereinstimmung von FE-Modell und Messergebnissen zu erhalten. Die Variation der unterschiedlichen Parameter E, NU, H und K führte zu verschiedenen Sensitivitäten. Bei den untersuchten Motoren ergab die Modifikation des E-Moduls und der Poissonzahl in keinem der Fälle eine deutliche Verbesserung des MAC-Wertes oder der Frequenzabweichung.

Im Rahmen der Federsteifigkeitsvariation konnte bei unterschiedlichen Anbindungssteifigkeiten ein veränderter MAC-Wert ermittelt werden.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden eine Vielzahl verschiedener Dieselmotoren bezüglich deren Eigenfrequenzen und Schwingformen untersucht. Sie beschäftigt sich mit der Auswertung und dem Vergleich von Mess- und Berechnungsdaten sowie der Anpassung des Berechnungsmodells an die Messergebnisse. Ziel dieser Arbeit war es, die Eigenfrequenzen und Schwing-



**Bild 4:** Elemente der Aufladegruppe

**Prof. Dr.-Ing. Claus Schliekmann**

Tel.: 0941 943-5160

Fax: 0941 943-1428

claus.schliekmann@maschinenbau.fh-regensburg.de

formen aus Messung und Berechnung zu vergleichen, um daraus die notwendigen Information zur Optimierung der FE-Modelle zu gewinnen.

Untersucht wurde dazu die Visualisierung der Schwingformen aus den gemessenen Daten, sowie die Einflüsse auf den sogenannten MAC-Wert. Bei der Visualisierung wurden dazu die Schwinggeschwindigkeiten in den einzelnen Messpunkten und die Position der Messpunkte genauer betrachtet. Die Beeinflussung des MAC-Wertes wurde bezüglich lokaler Einflüsse, Störung durch benachbarte Eigenfrequenzen und der Schwingungsanregung in unterschiedlichen Ordnungen untersucht.

Das Programm FEMtools bietet eine gute Möglichkeit, um Mess- und Berechnungsdaten, aber auch Messdaten mit Messdaten untereinander zu vergleichen. Eine Bewertung der Korrelation von zwei gepaarten Schwingformen, bestehend aus Messung-Messung oder Messung-Berechnung, erfolgt mit Hilfe des sogenannten MAC-Wertes. Des Weiteren stehen in FEMtools eine Reihe von Analysewerkzeugen zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Erstellung und Analyse dieser Vergleiche in FEMtools ein Konzept erarbeitet, welches einen möglichen Weg zu geeigneten Ergebnissen aufzeigt.

Weiterhin wurden einige Zusammenhänge der Anbindungssteifigkeit des Motors ans Fundament mit der Lage der Eigenfrequenzen und deren Schwingformen erläutert. Mit FEMtools steht ein Programm zur Verfügung, welches die Auswertung und den Vergleich von Messdaten und Berechnungsdaten erleichtert und mit der Möglichkeit zum Model Updating einen hilfreichen Beitrag zur Optimierung der FE-Modelle liefert.

Im Laufe der Auswertung stellte sich heraus, dass die Korrelation zweier Schwingformen in einigen Fällen stark von den Schwingungen der Aufladegruppe beeinflusst wird. Aus diesem Grund wurde die Aufladegruppe im Rahmen eines Model Updating näher untersucht. Dazu gehörte auch die Überprüfung der modellierten Massen in den FE-Modellen. Diese Analyse zeigt auf, dass der wesentliche Systemparameter für die realitätsnahe Abbildung der Schwingformen in der Anbindungssteifigkeit zu finden ist.

**LITERATUR**

- [1]: H. Maass/ H. Klier: Kräfte und Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine, Band 2 (1981)– Springer Verlag, Wien
- [2]: Hans Günther Natke: Einführung in die Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse, 3. Auflage (1992) – Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden
- [3]: Diplomarbeit Jan Rehwinkel, Oktober 1994: Untersuchung des Vibrationsverhaltens mittelschnelllaufender Dieselmotoren
- [4]: FEMtools Theoretical Manual, Version 3.1
- [5]: G. Donath/ L. Bryndum: Schwingungen auf Schiffen in Zusammenhang mit der Antriebsanlage – Druckschrift MAN Diesel SE





- **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)

UMSCHLAGSEITE 4  
ANZEIGE INFINEON